



VNIVERSITAT
E VALÈNCIA [(ó)]
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Departament d'Informàtica

Tesis Doctoral

**APORTACIONES AL PROCESO DE ANOTACIÓN
EN REALIDAD AUMENTADA**

Inma García Pereira

Dirigida por:

Dr. Pedro Morillo Tena

Dr. Jesús Gimeno Sancho

Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información,
Comunicaciones y Computación

Valencia, abril de 2022

DR. PEDRO MORILLO TENA, profesor Catedrático de Universidad del área de Arquitectura y Tecnología de los Computadores de la Universitat de València.

DR. JESÚS GIMENO SANCHO, profesor Ayudante Doctor del área de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universitat de València.

CERTIFICAN que la presente memoria

“Aportaciones al proceso de anotación en Realidad Aumentada”

ha sido realizada bajo su dirección, en el Departamento de Informática de la Universitat de València, por **Inma García Pereira**, y constituye su tesis para optar al grado de Doctor.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, presentamos ante la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSE) de la Universitat de València, a 6 de abril de 2022.

LOS DIRECTORES

Pedro Morillo Tena

Jesús Gimeno Sancho

*A Sergio, Gada y Éric,
el motivo de todo.*

*A mis padres,
por estar siempre.*

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda de todos mis compañeros de ARTEC, a quienes quiero expresar mi gratitud:

A mis directores, Pedro y Jesús, por guiarme en cada paso e iluminarme en el camino que me ha llevado hasta aquí.

A Manolo, por estar siempre disponible para resolver cualquier problema.

A Marcos, por concederme todo el tiempo que he necesitado.

A Pablo, María, Pedro y Paco, por toda la ayuda prestada, y las risas.

A Cristina y Sergio, por ayudarme a publicar.

Y al resto del equipo de ARTEC, Bibi, Javi, Lucia, Inma y Josevi, porque, de una u otra forma, me han ayudado siempre que lo he necesitado.

Quiero agradecer, también, todo el apoyo que he recibido de mi familia, que siempre ha estado ahí y han hecho todo lo que estaba en su mano para que esta tesis llegara a buen puerto.

Resumen

Las tecnologías de Realidad Aumentada tienen la capacidad de combinar información sintética del mundo virtual con elementos existentes en el mundo físico. Gracias a ello, la información virtual queda contextualizada y georreferenciada en el entorno físico que rodea al usuario, permitiéndole interactuar con ambos mundos en tiempo real. Dentro del paradigma de interacción de Realidad Aumentada, las anotaciones son su mayor exponente, pues se vinculan a un elemento concreto del entorno físico enriqueciéndolo de tal forma que modifican la percepción que el usuario tiene del mismo. Sin embargo, a pesar de su importancia, la literatura de la materia muestra muy pocos trabajos que aborden la anotación basada en tecnologías de Realidad Aumentada a nivel teórico. La mayoría de aportaciones presentan aplicaciones ad hoc que buscan mejorar algún aspecto técnico relevante. En consecuencia, la definición y caracterización de estos elementos virtuales están dispersas en la literatura y no se abordan de una manera global.

En esta tesis, se presentan aportaciones al proceso de anotación en Realidad Aumentada. Éstas se concretan en dos contribuciones principales: una caracterización que permite definir de forma precisa cualquier tipo de anotación y un modelo de datos que facilita la implementación de dichas anotaciones con independencia del dispositivo utilizado. Para ello, se hace un exhaustivo análisis previo de los trabajos más relevantes sobre conceptos teóricos que ayuden a conseguir una caracterización lo más universal posible. Una vez desarrollados la caracterización y el modelo de datos, se aplican y validan a tres niveles: de forma teórica sobre sistemas publicados por otros autores; de forma práctica en un proyecto propio para el uso de Realidad Aumentada en inspección de edificios; y de forma experimental en el desarrollo de un sistema que puede ser utilizado en entornos sin preparación previa y con diferentes tipos de dispositivos. En esta última validación, se aporta, además, un método de calibración que permite el despliegue en diferentes dispositivos con variaciones mínimas de implementación.

Los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de toda la tesis permiten afirmar que el objetivo principal de la misma se ha alcanzado con éxito: desarrollar herramientas que permitan implementar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada con independencia del dispositivo final que se vaya a utilizar para interactuar con ella.

Índice

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	25
1.1. MOTIVACIÓN	26
1.2. OBJETIVOS	28
1.3. METODOLOGÍA	28
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	30

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE.....	33
2.1. LOS INICIOS DE LA REALIDAD AUMENTADA	33
2.2. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA REALIDAD AUMENTADA	36
2.2.1. Combinar lo real y lo virtual: dispositivos	38
2.2.2. Interacción en tiempo real.....	51
2.2.3. Registro e integración de lo virtual en el espacio físico en tres dimensiones...	62
2.3. SOFTWARE	77
2.3.1. Bibliotecas y SDK.....	77
2.3.2. IDE	84
2.4. ANOTACIONES DE REALIDAD AUMENTADA.....	86
2.4.1. Del papel a la Realidad Aumentada	87
2.4.2. Sistemas ad hoc.....	91
2.4.3. Teorización	108

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN Y MODELO DE DATOS DE LAS ANOTACIONES DE REALIDAD

AUMENTADA.....	111
3.1. DEFINICIÓN	111
3.2. CARACTERÍSTICAS	115
3.2.1. Las seis dimensiones de Wither et al.	115
3.2.2. Los cuatro desafíos de Hansen.....	119
3.2.3. Las cinco dimensiones de Tönnis et al.	121
3.2.4. Las siete características de Müller	126
3.2.5. La clasificación de los elementos virtuales de Keil et al.	130
3.3. CLASIFICACIÓN Y SÍNTESIS.....	136
3.4. CARACTERIZACIÓN	141
3.5. MODELO DE DATOS.....	144

3.5.1. Diagrama de clases	144
3.5.2. Documento de esquema XML.....	146
3.6. APLICACIÓN Y VALIDACIÓN	163
3.6.1. Realidad Aumentada monousuario espacial basada en proyectores	163
3.6.2. Realidad Aumentada colaborativa cara a cara para HMD	165
3.6.3. MARS para colaboración asíncrona in situ.....	168
3.6.4. Realidad Aumentada para asistencia remota mediante dispositivo móvil y ordenador	172
3.6.5. MARS para colaboración asíncrona remota.....	173
3.6.6. Realidad Aumentada monousuario para dispositivos portátiles	177
3.7. CONCLUSIONES	182

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO: USO DE ANOTACIONES DE REALIDAD AUMENTADA EN LA INSPECCIÓN DE EDIFICIOS PREFABRICADOS	183
4.1. INSPECCIÓN Y REALIDAD AUMENTADA	184
4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	186
4.3. INTEGRACIÓN DE LA REALIDAD AUMENTADA EN LA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN	188
4.4. ESPECIFICACIÓN	192
4.4.1. Requisitos técnicos.....	192
4.4.2. Requisitos de usuario	193
4.4.3. Especificación del sistema.....	194
4.5. ANÁLISIS	199
4.6. DISEÑO.....	202
4.6.1. Arquitectura general del sistema	202
4.6.2. Estructura de datos	203
4.6.3. Interfaz de usuario	206
4.7. IMPLEMENTACIÓN	208
4.7.1. Calibración y seguimiento.....	208
4.7.2. Anotaciones de Realidad Aumentada	209
4.7.3. Base de datos	211
4.8. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	214
4.8.1. Entorno, participantes y protocolo	215
4.8.2. Prueba de usabilidad.....	217
4.8.2. Prueba de satisfacción	220
4.8.3. Evaluación cualitativa.....	222
4.9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	224

CAPÍTULO 5

ESTUDIO EXPERIMENTAL: ANOTACIÓN COLABORATIVA ASÍNCRONA MULTIDISPOSITIVO EN ENTORNOS DESCONOCIDOS.....	227
5.1. ESTADO DEL ARTE	228
5.1.1. Colaboración asíncrona.....	229
5.1.2. Entornos desconocidos	231
5.1.3. Sistemas multidispositivo.....	233
5.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	235
5.3. ESPECIFICACIÓN	236
5.3.1. Requisitos de usuario	237
5.3.2. Especificación del sistema.....	238
5.4. ANÁLISIS.....	241
5.5. DISEÑO.....	247
5.5.1. Arquitectura general del sistema	248
5.5.2. Estructura de datos	249
5.5.3. Interfaz de usuario	250
5.6. IMPLEMENTACIÓN	252
5.6.1. Modelo de datos	252
5.6.2. Método de calibración	254
5.7. ESTUDIO EXPERIMENTAL	255
5.7.1. Entorno	256
5.7.2. Participantes	257
5.7.3. Protocolo.....	258
5.8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	263
5.8.1. Anotaciones encontradas y objetos correctamente identificados	263
5.8.2. Valoración subjetiva de los usuarios	267
5.8.3. Tiempos de ejecución	268
5.9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	270

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	273
6.1. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	273
6.2. TRABAJO FUTURO	275
6.3. PUBLICACIONES.....	277
BIBLIOGRAFÍA.....	279

Índice de figuras

Figura 2.1. Primeros dispositivos de Realidad Aumentada: a) prototipo del HUDset (fuente: (Caudell & Mizell, 1992)), b) lentes de obturación cerámicas para Realidad Aumentada proyectiva (fuente: (Schmandt, 1983)), c) HMD de Sutherland (fuente: (Sutherland, 1968)	34
Figura 2.2. Definición de Realidad Mixta en el contexto del continuo de la Realidad-Virtualidad. Fuente: (Milgram & Colquhoun, 1999)	35
Figura 2.3. Usuarios utilizando HMD de Realidad Virtual (izquierda, fuente: https://www.vive.com) y de Realidad Aumentada (derecha, fuente: https://www.microsoft.com/hololens)	36
Figura 2.4. Ejemplos de enfoques de Realidad Aumentada, con tecnologías y aplicaciones relevantes. Fuente: (Mackay, 1998)	39
Figura 2.5. Dispositivos de Realidad Aumentada en base al lugar en que se generan las imágenes virtuales. Fuente: (Bimber & Raskar, 2006).....	40
Figura 2.6. Diagrama conceptual de un dispositivo <i>video see-through</i> (izquierda) y de un dispositivo <i>optical see-through</i> (derecha). Fuente: (R. T. Azuma, 1997)	41
Figura 2.7. Esquema de un <i>Virtual Retinal Display</i> (izquierda, fuente: (Pryor et al., 1998)) y prototipo de un <i>Head-Mounted Projection Displays</i> (derecha, fuente: (Rolland et al., 2005))	43
Figura 2.8. Ejemplos de dispositivo óptico de mano (izquierda, fuente: (Stetten et al., 2001)) y de proyectores de mano para los sistemas de Realidad Aumentada iLamps (centro, fuente: (Raskar et al., 2006)) y AnatOnMe (derecha, fuente: (Ni et al., 2011)).....	45
Figura 2.9. Ejemplos de Realidad Aumentada basada en pantalla. Fuentes: (Scherrer et al., 2009) (arriba), (Martínez et al., 2018) (abajo)	48
Figura 2.10. Ejemplos de hologramas utilizados como dispositivos espaciales ópticos de Realidad Aumentada	49
Figura 2.11. Ejemplos de <i>projection-based spatial displays</i> . Fuentes: (Casas et al., 2020) (izquierda), (Sevilla et al., 2018) (derecha)	50
Figura 2.12. Ejemplo de aplicación de las cuatro técnicas de manipulación del mundo virtual a la acción de desplazar una mesa virtual. Fuente: (Sherman & Craig, 2002)	54
Figura 2.13. Esquematación de la transición de las GUI a las interfaces de usuario tangible. Fuente: (Ishii & Ullmer, 1997).....	55

Figura 2.14. Ejemplo de TUI aplicada a la Realidad Aumentada. Fuente: (Wojciechowski, 2017)	56
Figura 2.15. Matriz espacio-tiempo de los CSCW. Fuente: (Ellis et al., 1991)	58
Figura 2.16. Juego de LEGO de Realidad Aumentada colaborativa cara a cara. Fuente: https://www.apple.com/	60
Figura 2.17. Sistema MIME de Realidad Aumentada colaborativa síncrona distribuida. Fuente: (García-Pereira et al., 2018)	61
Figura 2.18. Representación gráfica de los 6DoF	63
Figura 2.19. Esquema de las técnicas de seguimiento. A partir de: (Palmarini et al., 2018)	65
Figura 2.20. Sistema multisensor para el seguimiento en tiempo real en Realidad Aumentada portátil. Fuente: (Fang et al., 2017)	70
Figura 2.21. Marcadores para sistemas de Realidad Aumentada en entornos desfavorables. Fuente: (Cejka et al., 2018)	71
Figura 2.22. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en características. Fuente: (García-Pereira et al., 2019)	72
Figura 2.23. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en modelos. Fuente: (Comport et al., 2003)	73
Figura 2.24. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en SLAM. Fuente: (Reitmayr et al., 2007)	74
Figura 2.25. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en flujo óptico. Fuente: (Mooser et al., 2007)	76
Figura 2.26. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento híbrido. Fuente: (Yang et al., 2018)	77
Figura 2.27. Funcionamiento del proceso de seguimiento de ARToolKit. Fuente: (<i>Artoolkit</i> , s. f.)	79
Figura 2.28. Características más significativas ofrecidas por Unity para diferentes plataformas de Realidad Aumentada. Fuente: (<i>Unity Real-Time Development Platform</i> , s. f.)	86
Figura 2.29. Arquitectura del sistema de anotaciones Annotea. Fuente: (Kahan & Koivunen, 2001)	87
Figura 2.30. Cyberguide, sistema ubicuo de anotaciones. Fuente: (Abowd et al., 1997)	88
Figura 2.31. Algunos de los primeros sistemas para realizar anotaciones con tecnologías de Realidad Aumentada. Fuentes: a) (Feiner et al., 1992), b-d) (Rekimoto & Nagao, 1995)	90

Figura 2.32. Las anotaciones de la imagen de la izquierda se colocan dinámicamente aplicando el método propuesto por Makita et al. mientras que las anotaciones de la imagen de la derecha se colocan fijando previamente una posición relativa entre la anotación y el usuario. Fuente: (Makita et al., 2009).....	96
Figura 2.33. Picos de montaña anotados con el sistema propuesto por Porzi et al. (izquierda, fuente: (Porzi et al., 2014)) y anotación de objetos múltiples en tiempo real con el sistema MARVEL (derecha, fuente: (Chen et al., 2018)).....	99
Figura 2.34. Modelado de sistemas industriales mediante Realidad Aumentada. Fuente: (Tomlein & Grønbaek, 2018)	99
Figura 2.35. Sistema para el aprendizaje de un idioma mediante el uso de un HMD de Realidad Aumentada. Fuente: (Huynh et al., 2019).....	100
Figura 2.36. Estudiantes de medicina utilizando de forma síncrona el sistema VesARlius (izquierda), componentes de la interfaz de usuario de dicho sistema (centro) y forma alternativa de mostrar las tomografías computarizadas (derecha). Fuente: (Bork et al., 2019)	101
Figura 2.37. Anotación de video en tiempo real con el método propuesto por Cao y Kim desde dos puntos de vista diferentes: vista frontal (izquierda) y vista lateral (derecha). Fuente: (Cao & Kim, 2020)	102
Figura 2.38. Anotaciones tomadas con el sistema propuesto por Langlotz et al. Fuente: (Langlotz et al., 2012)	103
Figura 2.39. Anotaciones de Realidad Aumentada superpuestas sobre un modelo virtual y su entorno real para marcar discrepancias de diseño. Fuente: (Bruno et al., 2019)	105
Figura 2.40. Sistema para asistencia remota mediante Realidad Aumentada espacial. Fuente: (Lanir et al., 2013).....	105
Figura 2.41. Un usuario remoto (derecha) dibuja un trazo sobre un elemento del entorno. El usuario local (izquierda) ve la anotación en tiempo real mediante Realidad Aumentada. Fuente: (Gauglitz et al., 2014a).....	106
Figura 2.42. Un trabajador local con un HMD (izquierda) genera un modelo 3D del entorno de trabajo (centro). Un experto remoto usa la malla resultante para crear instrucciones (derecha). Fuente: (Zillner et al., 2018).....	107
Figura 2.43. Sistema colaborativo asíncrono remoto para la creación de contenido virtual sobre un entorno real. Fuente: (Wang et al., 2021)	108
Figura 3.1. Edificios anotados con etiquetas de texto. Cuando la posición del anclaje y la de la información virtual no coincide, se unen con una línea. Fuente: (Bell et al., 2001).....	113

Figura 3.2. Componentes de una anotación de Realidad Aumentada representados sobre el mundo físico y el mundo virtual	115
Figura 3.3. Interrelaciones entre los desafíos señalados por Hansen y las dimensiones descritas por Wither et al.	121
Figura 3.4. Interrelaciones entre las dimensiones de Wither et al. y Tönnis et al.....	125
Figura 3.5. Interrelaciones entre las dimensiones de Wither et al. y Tönnis et al. y las características señaladas por Müller	130
Figura 3.6. Ejemplos de los diferentes tipos de elementos virtuales identificados en (Keil et al., 2018): a) anotaciones (https://www.wikitudo.com/), b) resaltados (Hattab & Taubin, 2019), c) etiquetas (Tong, 2018), d) rayos X (Bane & Hollerer, 2004), e) ayudas, guías e indicadores visuales (Brata & Liang, 2019), f) material transmedia (Ioannidi et al., 2017), g) diagrama de despiece (Kalkofen et al., 2009).....	133
Figura 3.7. Interrelaciones entre los elementos visuales de Keil et al., los objetos de información de Müller y las dimensiones de Wither et al.	136
Figura 3.8. Relación conceptual existente entre las características extraídas de (Hansen, 2006; Keil et al., 2018; Müller, 2019; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009) sobre anotaciones de Realidad Aumentada	137
Figura 3.9. Clasificación de las características extraídas de (Hansen, 2006; Keil et al., 2018; Müller, 2019; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009) sobre anotaciones de Realidad Aumentada	138
Figura 3.10. Síntesis de las características extraídas de (Hansen, 2006; Keil et al., 2018; Müller, 2019; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009) sobre anotaciones de Realidad Aumentada	139
Figura 3.11. Caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada	141
Figura 3.12. Diagrama de clases simplificado de una anotación de Realidad Aumentada	145
Figura 3.13. Diagrama de clases con atributos y estereotipos de una anotación de Realidad Aumentada	150
Figura 3.14. Ejemplo de anotación de Realidad Aumentada de tipo etiqueta	161
Figura 4.1. Concepto general del funcionamiento de SIRAE	187
Figura 4.2. Proceso de ensamblado de módulos CARACOLA (izquierda, fuente: DRAGADOS) y edificio construido a base de este tipo de módulos (derecha)	188
Figura 4.3. Programas de Puntos de Inspección (PPI) de componentes y módulos de edificios prefabricados	189
Figura 4.4. Esquema de inspección tradicional mediante PPI	190
Figura 4.5. Metodología de inspección propuesta por SIRAE que se basa en los tradicionales PPI	190

Figura 4.6. Proceso de montaje de la carcasa del iPad: a) las tres piezas de la carcasa (arriba: funda protectora de goma; medio: pieza rígida; debajo: funda transparente para la pantalla); b) el iPad montado sobre la funda rígida; c) la funda transparente montada sobre el iPad y la funda rígida; d) solución final del iPad protegido con las tres piezas de la carcasa	196
Figura 4.7. Carcasa 3D y Structure Sensor (izquierda); montaje final sobre la carcasa de goma (derecha).....	196
Figura 4.8. Diagrama de casos de uso de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE	199
Figura 4.9. Esquema detallado de la arquitectura general del sistema SIRAE.....	203
Figura 4.10. Diseño de la interfaz gráfica de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada. A la derecha se muestra desplegado el menú para crear una nueva anotación	206
Figura 4.11. Interfaz de usuario para crear anotaciones de tipo texto (arriba izquierda), imagen RGB (arriba derecha), trazo (abajo izquierda) y modelo 3D (abajo derecha).....	207
Figura 4.12. Interfaz de usuario para marcar como corregida una anotación con SIRAE..	207
Figura 4.13. Oclusión de una anotación de Realidad Aumentada durante una inspección	210
Figura 4.14. Escenario para las pruebas con la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE	216
Figura 4.15. Escala de calificación a las puntuaciones SUS (fuente: (Bangor et al., 2009))	218
Figura 4.16. Puntuaciones obtenidas para las preguntas del test de satisfacción de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada	221
Figura 5.1. Ejemplos de sistemas de Realidad Aumentada <i>markerless</i> . Fuentes: (Ahuja et al., 2019) (izquierda) y (Tregel et al., 2020) (derecha)	232
Figura 5.2. Ejemplos de Realidad Aumentada multidispositivo. Fuentes: (Baillard et al., 2017) (a y b) y (Speicher, Hall, et al., 2018) (c y d).....	234
Figura 5.3. Diagrama de casos de uso de la aplicación de anotaciones de Realidad Aumentada	241
Figura 5.4. Arquitectura general del sistema de anotaciones de Realidad Aumentada....	249
Figura 5.5. Diseño de la pantalla principal de la aplicación	251
Figura 5.6. Proyección isométrica (a) y planta (b) del método de calibración para un dispositivo de bajas prestaciones	255
Figura 5.7. Imagen de 360º del entorno en el que se realizó el estudio experimental	256

Figura 5.8. Anotaciones de Realidad Aumentada que los participantes deben encontrar durante el estudio experimental	257
Figura 5.9. Capturas de pantalla de la aplicación durante el proceso de calibración	260
Figura 5.10. Usuario probando la aplicación (a) y captura de pantalla de la aplicación durante la búsqueda de anotaciones de Realidad Aumentada (b)	261
Figura 5.11. Número de objetos anotados mediante Realidad Aumentada identificados con éxito por cada usuario	264
Figura 5.12. Porcentaje de aciertos para cada una de las anotaciones de Realidad Aumentada: grandes (L1 y H3), medianas (L2 y H2) y pequeñas (L3 y H1)	265
Figura 5.13. Superposición de las anotaciones de Realidad Aumentada encontradas por los 40 participantes del estudio	266
Figura 5.14. Tiempo total empleado por los participantes para completar todas las tareas (calibración y búsqueda de anotaciones)	269
Figura 5.15. Tiempo empleado por los participantes para calibrar el dispositivo	269

Índice de tablas

Tabla 2.1. Clasificación de los dispositivos de Realidad Aumentada con los diferentes nombres que reciben	51
Tabla 2.2. Principales características de los artículos seleccionados para esta SLR	95
Tabla 3.1. Características que cumple cada anotación analizada en la Sección 3.6.	179
Tabla 4.1. Preguntas realizadas en el test de usabilidad de SIRAE	218
Tabla 4.2. Resultados del test de usabilidad para la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE	219
Tabla 4.3. Preguntas realizadas en el test de satisfacción de SIRAE	221
Tabla 5.1. Flujo de eventos principal del caso de uso “Establecer puntos de anclaje”	242
Tabla 5.2. Flujos de eventos alternativos del caso de uso “Establecer puntos de anclaje”	243
Tabla 5.3. Flujo de eventos principal del caso de uso “Crear anotaciones de Realidad Aumentada”	244
Tabla 5.4. Flujos de eventos alternativos del caso de uso “Crear anotaciones de Realidad Aumentada”	245
Tabla 5.5. Flujo de eventos principal del caso de uso “Asignar puntos de calibración”	246
Tabla 5.6. Flujo de eventos alternativo del caso de uso “Asignar puntos de calibración”	246
Tabla 5.7. Flujo de eventos principal del caso de uso “Visualizar anotaciones de Realidad Aumentada”	247
Tabla 5.8. Preguntas realizadas a los participantes del estudio experimental	262
Tabla 5.9. Medias y desviaciones estándar de las respuestas al cuestionario de todos los participantes	267

Índice de códigos

Código 3.1. Prólogo y cuerpo base de un documento de esquema XML	147
Código 3.2. Conversión de dos clases UML a XML mediante la utilización de los elementos <code>complexType</code> y <code>element</code>	152
Código 3.3. Conversión de los atributos de una clase UML a XML mediante dos usos diferentes de los elementos <code>attribute</code> y <code>element</code>	153
Código 3.4. Ejemplo de uso de los elementos XML <code>list</code> , <code>restriction</code> y <code>union</code>	155
Código 3.5. Conversión de UML a XML de una clase de tipo enumeración	156
Código 3.6. Declaración del elemento raíz del documento de esquema XML de las anotaciones de Realidad Aumentada	157
Código 3.7. Propuesta de documento de esquema XML para las anotaciones de Realidad Aumentada	161
Código 3.8. Ejemplo de aplicación del documento de esquema XML propuesto en el Código 3.7 para la anotación de la Figura 3.14	162
Código 3.9. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Hattab & Taubin, 2019)	166
Código 3.10. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Bork et al., 2019, 2021).....	169
Código 3.11. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Ioannidi et al., 2017).....	171
Código 3.12. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Gauglitz et al., 2014a)	174
Código 3.13. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Wang et al., 2021).....	176
Código 3.14. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema planteado en el Apartado 3.6.6.	181
Código 4.1. Elemento que indica que una anotación ha sido marcada como corregida ...	211
Código 4.2. Elemento que indica con qué otra anotación está vinculada una anotación .	212
Código 4.3. Localización de la información virtual de todas las anotaciones de SIRAE	212
Código 4.4. BSON de una anotación de SIRAE	213
Código 4.5. XML de una anotación de SIRAE	214
Código 5.1. Implementación de una anotación creada con el sistema desarrollado	253

Capítulo 1

Introducción

A menudo, se define la Realidad Aumentada como el conjunto de tecnologías que permiten mostrar información virtual superpuesta sobre el mundo físico o real. Sin embargo, las tecnologías de Realidad Aumentada son mucho más que eso. Como se describe en (Tönnis et al., 2013), *“With the principle of Augmented Reality [...] a virtual world co-exists with and is embedded in the physical world. Both worlds have their own full 3D existence in geometric and photometric properties and have dynamic evolvement over time. There are intricate relationships and exchanges between the two worlds in which one world adapts to, or influences, the other”*. Ambos mundos pueden existir por sí solos, pues poseen propiedades que los dotan de identidad propia. Sin embargo, las relaciones e intercambios de información que se producen entre ellos dotan de sentido a la parte virtual y enriquecen a la parte física. En condiciones óptimas, la información virtual se incrusta de tal modo en el mundo físico que ambos mundos son capaces de influir e, incluso, adaptarse al otro.

Esta simbiosis consigue su máxima eficiencia cuando la interacción del usuario con ambos mundos fluye como si de uno solo se tratase. A diferencia de lo que ocurre con la Realidad Virtual, en la Realidad Aumentada, el usuario no tiene que aprender a navegar por el entorno, pues es real y sabe cómo desplazarse en él. Este hecho convierte a la Realidad Aumentada en una tecnología de fácil manejo para la mayoría de usuarios, especialmente ahora que puede ser desplegada en casi cualquier teléfono móvil inteligente. Es responsabilidad de los desarrolladores, por tanto, diseñar sistemas capaces de fusionar el mundo virtual y el mundo físico de forma precisa y coherente. Para ello, el primer paso es definir en detalle cada propiedad de la información virtual y su forma de vincularse con el mundo físico.

Según (Wither et al., 2009), cuando la información virtual tiene tanto un componente que depende espacialmente de algún elemento del mundo físico como un componente que es espacialmente independiente de este, estamos ante una anotación de Realidad Aumentada. Esto supone que la información virtual

debe, por un lado, vincularse a un elemento físico concreto para enriquecerlo de algún modo y, por otro lado, aportar algún tipo de información nueva al mundo físico modificando así la percepción que el usuario tiene de él. Las anotaciones son, por tanto, los elementos virtuales por excelencia de la Realidad Aumentada, pues aspiran a conseguir la máxima integración en el mundo físico y, a su vez, dotarlo de valor añadido.

1.1. Motivación

Los primeros sistemas que utilizaban tecnologías de Realidad Aumentada fueron diseñados para ser usados a modo de gafas con lentes especiales con la intención de integrar lo mejor posible la información virtual en el campo de visión del usuario. Desde entonces, tanto el hardware como el software han ido evolucionando en diferentes ramas dependiendo de la finalidad que buscaba cada sistema desarrollado: precisión, economía, ergonomía, etc. Actualmente, puede encontrarse una gran variedad de herramientas de desarrollo, librerías y dispositivos de Realidad Aumentada. Esta diversidad, a priori beneficiosa, trae consigo un gran problema de incompatibilidad. A menudo, migrar una aplicación de un dispositivo a otro supone implementar e, incluso, diseñar de nuevo el sistema casi por completo.

Como se apuntaba arriba, el proceso de anotación en Realidad Aumentada implica vincular información virtual con elementos del mundo físico. Éste es un proceso complejo ya que involucra una gran cantidad de factores de diversa índole. El más evidente de ellos es el registro y seguimiento o *tracking*. Para poder empezar a utilizar un sistema de Realidad Aumentada en un determinado entorno, lo primero que hay que hacer es alinear el mundo virtual con el mundo físico para que toda la información virtual quede correctamente posicionada con respecto a los elementos físicos que está anotando. Además, esta alineación debe mantenerse lo más precisa posible durante la utilización del sistema, haciendo un seguimiento continuo de la posición y orientación del usuario. Existen multitud de sensores, librerías, algoritmos y técnicas que se aproximan desde diferentes perspectivas a la solución de este problema. Depende de la propia idiosincrasia del sistema que se esté desarrollando, y de los recursos disponibles, la elección de una y otra (o una combinación de varias) metodologías. Esto condiciona todo el flujo de trabajo de

los desarrolladores de sistemas de Realidad Aumentada. Por ejemplo: una aplicación que se basa en el seguimiento de marcadores se desarrolla de manera completamente diferente a una que funciona con mapeo espacial. Por tanto, antes de diseñar cualquier sistema, hay que pensar en qué dispositivo se va a usar y qué técnicas se pueden utilizar en éste, haciendo muy difícil el desarrollo de aplicaciones que se puedan ejecutar, indistintamente, en dispositivos de diversa índole.

La problemática descrita arriba es extrapolable al resto de factores involucrado en los procesos de anotación mediante Realidad Aumentada: modos de interacción, formas de representación de la información, sistemas de referencia, condiciones del entorno, tipos de colaboración, evolución temporal (tanto de la información virtual como del entorno físico), etc. Todos estos factores, unidos a la diversidad tecnológica existente, hacen que sea fácil encontrar cientos de sistemas ad hoc, pero prácticamente ninguno transversal.

Tras años de trabajo en el campo de la Realidad Aumentada, ha ido surgiendo, de forma cada vez más imperiosa, la necesidad de disponer de un marco de trabajo que facilite el desarrollo de sistemas robustos y reutilizables. Esto implica, por un lado, tener un esquema claro que permita definir de forma sistemática cualquier anotación, sea cual sea la forma final que vaya a tener el sistema que se está desarrollando. Por otro lado, disponer de mecanismos que faciliten la implementación de dichas anotaciones en sistemas de diversa índole, sin un sobreesfuerzo de reescritura. El desarrollo de herramientas enfocadas a la resolución del problema de incompatibilidad entre sistemas de Realidad Aumentada permitiría desarrollar soluciones universales en una amplia variedad de campos de aplicación (industria, construcción, patrimonio, turismo, medicina, educación, entretenimiento, etc.), facilitando el trabajo tanto de los investigadores y desarrolladores como de los usuarios finales. Este razonamiento ha motivado el desarrollo del trabajo que se expone en el presente documento.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es:

“Desarrollar herramientas que permitan implementar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada con independencia del dispositivo final que se vaya a utilizar para interactuar con ella”.

Para conseguir este objetivo general, es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar las diferentes aportaciones de autores que teorizan sobre las anotaciones de Realidad Aumentada, identificando cada una de las propiedades que definen a estos elementos virtuales.
- Sintetizar toda la información obtenida y desarrollar una caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada. Esta caracterización ha de servir para definir cualquier tipo de anotación de forma precisa y sistemática.
- Diseñar un modelo de datos a partir de dicha caracterización que permita almacenar en cualquier dispositivo toda la información referente a las anotaciones de Realidad Aumentada (tanto de la información virtual propiamente dicha como de su vínculo con el mundo físico).
- Validar la caracterización y el modelo de datos desarrollados en diferentes escenarios, tanto a nivel teórico como a nivel práctico y con usuarios reales.
- Desarrollar un método de calibración que permita utilizar un sistema de anotaciones de Realidad Aumentada en diferentes dispositivos con las mínimas variaciones de implementación posibles.

1.3. Metodología

Para el desarrollo de esta tesis doctoral, se utiliza una metodología experimental y empírica típica de los procesos de I+D. Para ello, se siguen una serie de fases que desembocan en la consecución de los objetivos propuestos. Estas fases son: observación, planteamiento del problema, búsqueda de información y estructuración de un marco teórico, planteamiento de hipótesis, análisis, experimentación y obtención de conclusiones. Estas son las bases del método científico que han guiado todo el trabajo desarrollado y que están avaladas por la

comunidad científica como herramienta para exponer y confirmar sus teorías. El método científico puede apoyarse en experimentos que certifiquen su validez y minimicen la influencia de la subjetividad. Es por ello que las ciencias de la computación son un campo de estudio en el que resulta beneficioso aplicar el método científico, pues permiten aplicar todas sus fases y, especialmente, la experimentación. En (Dodig-Crnkovic, 2002), se destacan tres grandes áreas que evidencian el beneficio de aplicar el método científico en las ciencias de la computación: la informática teórica, que sigue la metodología clásica de construir teorías definiendo axiomas y reglas para derivar y demostrar teoremas; la informática experimental, cuyo enfoque consiste principalmente en identificar conceptos que faciliten las soluciones a un problema y luego evaluar las soluciones a través de la construcción de sistemas prototipo; y la simulación por computadora, que se ha convertido en la tercera metodología de investigación, complementando la teoría y la experimentación, pues hace posible estudiar fenómenos que no se pueden replicar en laboratorios. El trabajo de esta tesis se engloba dentro de la informática experimental, aunque se respalda en un alto componente teórico para alcanzar con éxito los objetivos propuestos.

Así pues, tras observar y plantear los problemas expuestos arriba, se realiza una exhaustiva revisión bibliográfica para conocer y estudiar a fondo el estado actual del proceso de anotación en Realidad Aumentada. Con ello, se recopilan las aportaciones teóricas más relevantes que pueden ayudar a alcanzar el objetivo principal de esta tesis. Con este marco teórico, se desarrolla una caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada y un modelo de datos. En este punto, se está en disposición de plantear la hipótesis de que dichas aportaciones permiten implementar cualquier tipo de anotación con independencia del dispositivo utilizado. El primer análisis encaminado a la validación de esta hipótesis se centra en aplicar la caracterización y el modelo de datos propuestos a sistemas ya publicados en la literatura científica. A continuación, se plantea un caso de estudio que permite aplicar las aportaciones de esta tesis al caso concreto de la anotación colaborativa durante la inspección de edificios prefabricados. Finalmente, se lleva a cabo un estudio experimental para validar la caracterización y el modelo de datos en uno de los escenarios más adversos: anotación colaborativa asíncrona multidispositivo en entornos desconocidos. En este punto, además, se propone y evalúa un método de calibración que permite utilizar el mismo sistema de

anotación en diferentes dispositivos de Realidad Aumentada. Con todos los datos obtenidos de las diversas validaciones, se procede a la elaboración de las conclusiones de esta tesis.

1.4. Estructura de la tesis

El presente documento está dividido en 6 capítulos, el primero de los cuales es esta introducción. En el Capítulo 2, se hace un breve repaso histórico de la Realidad Aumentada y se describe el estado actual de la misma. Para ello, se define este paradigma de interacción y se detallan sus principales características y las tecnologías implicadas. Por último, se ahonda en el caso concreto de las anotaciones de Realidad Aumentada, incluyendo una revisión de la literatura científica que ejemplifica la versatilidad de estos elementos virtuales y los retos que aún quedan por superar.

En el Capítulo 3, se analizan con gran detalle las aportaciones más relevantes sobre conceptos teóricos de las anotaciones de Realidad Aumentada (o que pueden ser aplicados a éstas). A continuación, se analizan todas las características extraídas y las interrelaciones que se establecen entre ellas. De la síntesis y clasificación de las mismas, se obtiene la propuesta de caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada. Ésta sirve de base para diseñar un modelo de datos que permita implementar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada independientemente del dispositivo utilizado, objetivo principal de esta tesis. Por último, se hace una primera aplicación y validación de la caracterización y del modelo de datos a algunos de los sistemas publicados en la literatura revisada en el Capítulo 2.

En el Capítulo 4, se presenta el caso de estudio SIRAE, un proyecto que permite aplicar las aportaciones del Capítulo 3 al desarrollo de un sistema de Realidad Aumentada para la inspección de edificios prefabricados. Para exponer este caso práctico, se han seguido las fases tradicionales de la metodología de gestión de proyectos: especificación, análisis, diseño, implementación y pruebas. Se completa el capítulo con una primera parte en la que se presenta el proyecto y se expone el marco teórico, y una parte final de resultados, conclusiones y trabajo futuro.

El Capítulo 5 tiene una estructura muy similar a la del Capítulo 4 pero, en este caso, se desarrolla un sistema orientado específicamente a cumplir algunos de los objetivos de esta tesis. Esto se concreta en la realización de un estudio experimental con usuarios reales cuya finalidad es validar la siguiente hipótesis: con el sistema desarrollado, es posible visualizar anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos con independencia del dispositivo utilizado. Para ello, además de aplicar las aportaciones del Capítulo 3, se propone un método de calibración extrapolable a otros sistemas.

Finalmente, se concluye con un Capítulo 6 que sintetiza las aportaciones más relevantes de esta tesis, propone posibles líneas de trabajo futuro y lista las contribuciones científicas derivadas de este trabajo.

Capítulo 2

Estado del arte

Las primeras tecnologías que hicieron posible la aparición del paradigma de interacción de Realidad Aumentada ya han cumplido medio siglo y su evolución es más que notable. Desde los aparatosos y costosos artefactos iniciales hasta los ligeros y económicos dispositivos actuales, se ha llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones y han salido al mercado numerosos productos comerciales. En este capítulo, se exponen los inicios de la Realidad Aumentada, su definición más extendida y todos los aspectos técnicos y conceptuales que engloba: dispositivos para su uso, modos de interacción, técnicas de registro y seguimiento y software de desarrollo. Por último, se profundiza en el caso específico de las anotaciones de Realidad Aumentada, aunque todo lo detallado anteriormente es también aplicable a este elemento virtual concreto.

2.1. Los inicios de la Realidad Aumentada

El término “Realidad Aumentada” fue acuñado en 1992 por Caudell y Mizell en (Caudell & Mizell, 1992). En dicho trabajo, se muestra un prototipo que permite superponer imágenes virtuales creadas por un ordenador sobre objetos del mundo físico para su uso en tareas que han de realizar humanos durante la fabricación de aeronaves. El dispositivo en cuestión, denominado HUDset, consistía en una pantalla frontal transparente montada sobre la cabeza del usuario a modo de gafas, tal y como se aprecia en la Figura 2.1a. Como los propios autores explican en el citado artículo, esta tecnología se utiliza para “aumentar” el campo visual del usuario con la información dinámica que necesita durante el desempeño de una determinada tarea. Es por ello que Caudell y Mizell se refirieron a la tecnología como “Realidad Aumentada” y es el término que se sigue utilizando hoy en día.

Sin embargo, esta idea no fue una novedad de Caudell y Mizell. Anteriormente, ya se habían realizado diversas investigaciones y desarrollos que trataban de

integrar elementos virtuales en el mundo físico. Uno de los trabajos más destacados fue el presentado en 1968 por Sutherland en (Sutherland, 1968). Sutherland construyó una pantalla tridimensional diseñada para ir montada sobre la cabeza del usuario, como muestra la Figura 2.1c. Su objetivo era envolver a éste con información tridimensional y en perspectiva que cambiaba y se movía acorde con los movimientos de su cabeza. Dicha tecnología permitía mostrar imágenes producidas por tubos de rayos catódicos sobre los objetos reales del entorno. Otro trabajo destacable, previo a la aparición del término “Realidad Aumentada”, fue el de Schmandt, publicado en 1983 (Schmandt, 1983). En él, se pretendía construir un espacio de trabajo estereoscópico que permitiera al usuario interactuar con una imagen tridimensional superpuesta sobre el mundo físico. Para ello, construyeron un sistema que daba la posibilidad de explorar diferentes tipos de recursos virtuales proyectados sobre las manos u otras partes del cuerpo del usuario. La Figura 2.1b muestra a un usuario con las lentes de obturación cerámicas desarrolladas en esta investigación y un espejo semitransparente que refleja los gráficos proyectados por un monitor. El usuario puede manipular estas imágenes con el digitalizador magnético de seis grados de libertad que tiene en su mano.

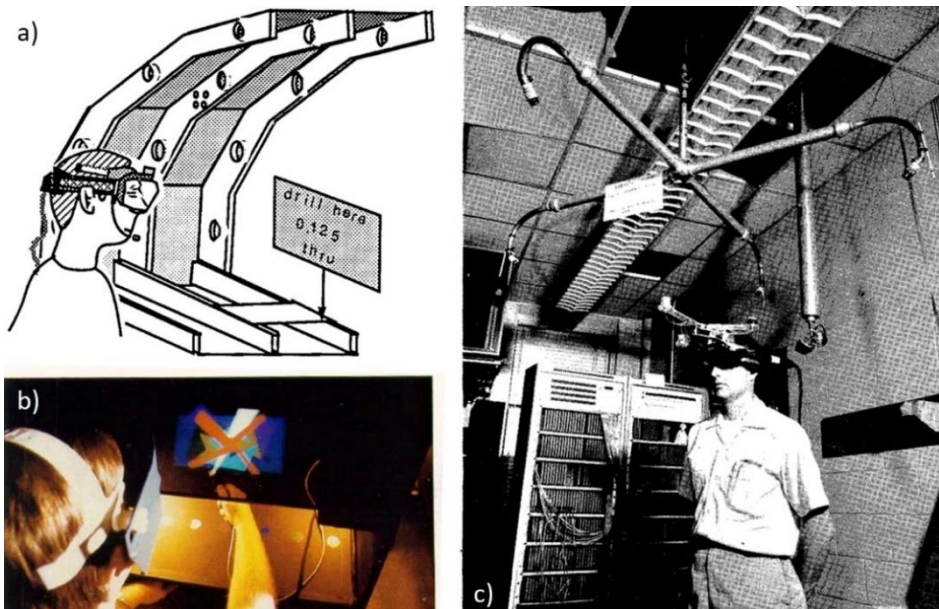


Figura 2.1. Primeros dispositivos de Realidad Aumentada: a) prototipo del HUDset (fuente: (Caudell & Mizell, 1992)), b) lentes de obturación cerámicas para Realidad Aumentada proyectiva (fuente: (Schmandt, 1983)), c) HMD de Sutherland (fuente: (Sutherland, 1968))

En 1994, Milgram y Kishino realizaron en (Milgram & Kishino, 1994) una taxonomía de las pantallas visuales de Realidad Mixta en la que presentaron el “Continuo de la Virtualidad”, al que posteriormente llamarían “Continuo de la Realidad-Virtualidad” (Milgram & Colquhoun, 1999) y que es más conocido como el “Continuo de Milgram”. Como muestra la Figura 2.2, la Realidad Aumentada es una parte de lo que se conoce como “Realidad Mixta”. Los componentes de este continuo se diferencian por la cantidad de virtualidad o de realidad que incluyen. Tanto en los Entornos Virtuales (más conocidos como Realidad Virtual) como en la Virtualidad Aumentada, el entorno circundante es virtual y, en el caso de la Virtualidad Aumentada, se le agregan objetos reales (como vídeos, imágenes o texturas). Sin embargo, en la Realidad Aumentada, el usuario se encuentra en un entorno real al que se le añaden algunos elementos virtuales. Otros términos como Realidad Amplificada, Realidad Mediatizada o Realidad Virtualizada se han ido incorporando al concepto de Realidad Mixta con el fin de matizar las fronteras entre los diferentes componentes mostrados en el continuo de Milgram, como se explica en (Schnabel et al., 2007).

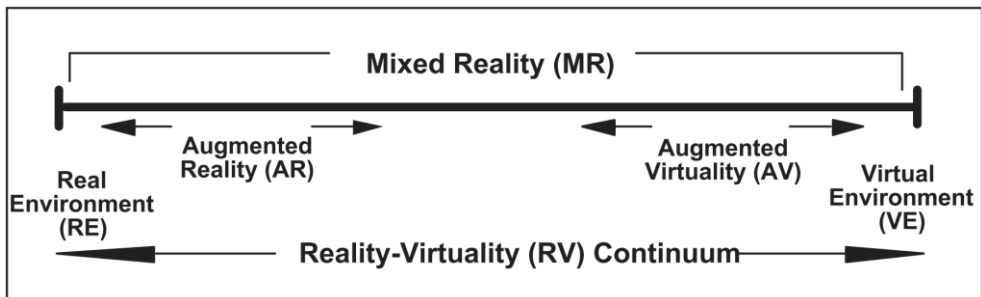


Figura 2.2. Definición de Realidad Mixta en el contexto del continuo de la Realidad-Virtualidad. Fuente: (Milgram & Colquhoun, 1999)

La definición de Realidad Aumentada más generalizada hoy en día es la que dio en 1997 Azuma (R. T. Azuma, 1997). Lo que diferencia esta definición, que se analiza a continuación, de los conceptos aportados en trabajos anteriores es su independencia de los dispositivos utilizados. Hasta entonces, se consideraban exclusivamente los dispositivos montados sobre la cabeza o *Head-Mounted Displays* (HMD), pues era en los únicos en los que se había probado. Pero pronto se empezaron a desarrollar aplicaciones de Realidad Aumentada para otro tipo de dispositivos y su definición se extendió y se disoció de la tecnología de visualización utilizada. Para Azuma, la Realidad Aumentada es una variación de la Realidad

Virtual. La principal diferencia con ésta es que la Realidad Virtual sumerge completamente al usuario dentro de un entorno sintético sin posibilidad de ver el mundo físico que hay a su alrededor. Sin embargo, la Realidad Aumentada sí permite al usuario ver el mundo físico ya que los elementos virtuales se superponen a éste. Esto significa que la Realidad Aumentada complementa al mundo físico, pero no lo reemplaza completamente como hace la Realidad Virtual. El escenario ideal es que el usuario tenga siempre la sensación de que los objetos virtuales y los físicos coexisten en el mismo espacio. La Figura 2.3 muestra dos ejemplos de aplicaciones que utilizan estas tecnologías. A la izquierda, un usuario utiliza un HMD de Realidad Virtual; está sumergido en un entorno virtual que simula un océano y no ve nada del entorno físico que le rodea en ese momento. A la derecha, otro usuario utiliza un HMD de Realidad Aumentada; está trabajando en una fábrica y, a la vez que ve la máquina que está utilizando, puede ver información virtual superpuesta sobre el mundo físico.

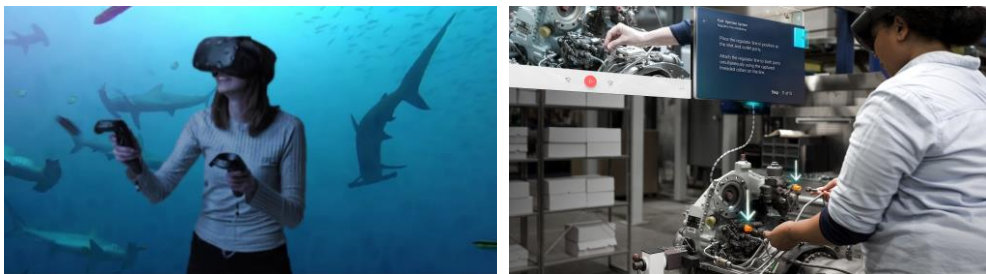


Figura 2.3. Usuarios utilizando HMD de Realidad Virtual (izquierda, fuente: <https://www.vive.com>) y de Realidad Aumentada (derecha, fuente: <https://www.microsoft.com/hololens>)

2.2. Definición y características de la Realidad Aumentada

Azuma define la Realidad Aumentada en (R. T. Azuma, 1997) como cualquier sistema que posea simultáneamente las siguientes tres características:

- combinar lo real y lo virtual
- ser interactivo en tiempo real y
- estar registrado en tres dimensiones, de forma que lo virtual se integre adecuadamente en el espacio físico.

Esta definición permite diferenciar fácilmente lo que es Realidad Aumentada de lo que no. Por ejemplo: una película que mezcla imágenes grabadas del mundo físico con imágenes creadas por ordenador no es Realidad Aumentada porque no es interactiva. Del mismo modo, imágenes virtuales interactivas superpuestas a imágenes del mundo físico en un punto fijo de la pantalla no es un sistema de Realidad Aumentada ya que lo virtual no se integra en el espacio 3D del mundo físico.

Conviene hacer algunas puntualizaciones para matizar aún más lo que implica la Realidad Aumentada. Por un lado, la Realidad Aumentada no sirve únicamente para añadir información virtual al mundo físico, sino que también es capaz de “borrar” elementos de éste. Para ello, ha de reproducir virtualmente partes del mundo físico, como paredes, suelo u otros objetos, y superponerlos al mundo físico para ocultar parte de éste. Por otro lado, la Realidad Aumentada puede aplicarse a cualquier sentido, no únicamente al de la vista, que es el más explotado. La incorporación de sonido en las aplicaciones para involucrar el sentido del oído es también bastante común. Poco a poco se están desarrollando sistemas de Realidad Aumentada que estimulan también los sentidos del gusto, del olfato y del tacto, el sentido kinestésico y el vestibular y la propiocepción, la termocepción y la nocicepción. En nuestra interacción con el mundo que nos rodea, los seres humanos tenemos una estimulación multisensorial constante. Es por ello que, como demuestran diversos estudios (Lehmann & Murray, 2005; Luria, 1987), aprovechar todos estos sentidos en entornos con recreación virtual, como es la Realidad Aumentada, es fundamental para proporcionar una capacidad de memoria, aprendizaje e inmersión superior que con los entornos unisensoriales. En (García-Pereira, Vera, et al., 2020), se profundiza más sobre este tema.

El propio Azuma justifica la importancia y utilidad de la Realidad Aumentada. Por un lado, esta tecnología mejora la percepción e interacción del usuario con el mundo físico ya que los objetos virtuales muestran información que el usuario no puede detectar directamente con sus propios sentidos. Por otro lado, la información que transmiten los objetos virtuales puede ayudar al usuario a realizar tareas en el mundo físico. Es por ello que los ámbitos de aplicación de la Realidad Aumentada son muy numerosos y variados. Azuma los resumió en seis: medicina, mantenimiento y reparación, anotación y visualización, entretenimiento y navegación, robótica y aviación militar; a los que se pueden añadir otros tantos:

turismo, arte y patrimonio cultural, educación, deporte, comercio y publicidad, ingeniería y construcción, diseño, industria, etc.

En los siguientes apartados, se analizan cada una de las tres características que Azuma establece como necesarias a la hora de desarrollar cualquier sistema de Realidad Aumentada. La primera de ellas, combinar lo real y lo virtual, se concreta en los dispositivos utilizados para la visualización de la Realidad Aumentada. La segunda, interacción en tiempo real, tiene que ver principalmente con el tipo de interacción que se le permite al usuario. También se incluye, en esta característica, el grado de colaboración del sistema, es decir: si sólo puede utilizarlo un usuario a la vez o si es multiusuario. Por último, lo virtual ha de estar registrado en tres dimensiones, de forma que se integre adecuadamente en el espacio físico. Esto está íntimamente relacionado con la captura del punto de vista del usuario y su seguimiento o *tracking*. A continuación, se detallan cada uno de estos aspectos.

2.2.1. Combinar lo real y lo virtual: dispositivos

En 1998, Mackay publicó un trabajo (Mackay, 1998) que sigue siendo un referente a la hora de analizar los sistemas de Realidad Aumentada. En él, la autora describe tres enfoques básicos para aumentar los objetos del mundo físico desde el punto de vista de los dispositivos utilizados. Estas tres estrategias pueden utilizarse de forma única o combinadas en un mismo sistema:

- **Aumentar el usuario.** El usuario lleva un dispositivo, generalmente en la cabeza o en las manos, para obtener información virtual sobre los objetos físicos. Por ejemplo: el usuario ve la información virtual sobre los objetos físicos de su entorno gracias a unas gafas de Realidad Aumentada.
- **Aumentar el objeto físico.** Al objeto físico se le incorporan dispositivos de entrada, salida o computacionales para que puedan ser aumentados. Por ejemplo: objetos a los que se les incrusta un sensor para que un teléfono inteligente pueda localizarlos y vincularles información virtual mediante Realidad Aumentada. Hoy en día, los marcadores de Realidad Aumentada, aunque sean simples piezas gráficas, también pueden considerarse una forma de aumentar el objeto físico.
- **Aumentar el entorno que rodea al usuario y al objeto.** Ni el usuario ni el objeto se ven afectados directamente, sino que dispositivos

independientes proporcionan y recopilan información del entorno circundante, mostrando información sobre los objetos y capturando información sobre las interacciones del usuario con ellos. Por ejemplo: un proyector que superpone imágenes virtuales sobre objetos físicos acompañado de un detector de movimientos que permita la interacción.

Si bien la aparición de nuevas tecnologías hace necesario hacer una revisión de su aplicación práctica, en la Figura 2.4 se ejemplifican diferentes tecnologías y aplicaciones de cada uno de los tres enfoques descritos por Mackay.

Augment:	Approach	Technology	Applications
Users	Wear devices on the body	VR helmets Goggles Data gloves	Medicine Field service Presentations
Physical objects	Imbed devices within objects	Intelligent bricks Sensors, receptors GPS, electronic paper	Education Office facilities Positioning
Environment surrounding objects and users	Project images and record remotely	Video cameras, Scanners Graphics tablets Bar code readers Video Projectors	Office work Film-making Construction Architecture

Figura 2.4. Ejemplos de enfoques de Realidad Aumentada, con tecnologías y aplicaciones relevantes. Fuente: (Mackay, 1998)

Esta clasificación de Mackay está íntimamente relacionada con lo que Bimber y Raskar publicaron en 2006. En (Bimber & Raskar, 2006), se clasifican los dispositivos de visualización de Realidad Aumentada en base al lugar donde se combina lo real con lo virtual. La Figura 2.5 presenta diferentes posibilidades a la hora de formar la imagen virtual, es decir: dónde se sitúan las pantallas de visualización con respecto al usuario y al objeto físico. Los dispositivos colocados en la cabeza del usuario (*head-attached* en la Figura 2.5), como pueden ser unas gafas de Realidad Aumentada, y aquellos que sujeta con la mano (*hand-held*), como puede ser un teléfono móvil inteligente, se pueden considerar sistemas que aumentan al usuario, siguiendo la nomenclatura de Mackay. Por su parte, los dispositivos que permiten una Realidad Aumentada espacial (*spatial*) equivalen a sistemas que aumentan el entorno que rodea al usuario y al objeto. Sin embargo, el concepto de Mackay de “aumentar el objeto físico” no puede relacionarse directamente con los dispositivos que se utilizan para visualizar la Realidad Aumentada según la clasificación de

Bimber y Raskar. Esto se debe a que se trata más bien de un recurso transversal que puede utilizarse en cualquiera de los otros dos enfoques. Por ejemplo: una aplicación desarrollada para un dispositivo móvil puede requerir que los objetos físicos sobre los que va a mostrar la información virtual dispongan de un marcador de Realidad Aumentada para conseguir una buena correlación de lo real y lo virtual, como se verá en el Apartado “2.2.3. Registro e integración de lo virtual en el espacio físico en tres dimensiones”.

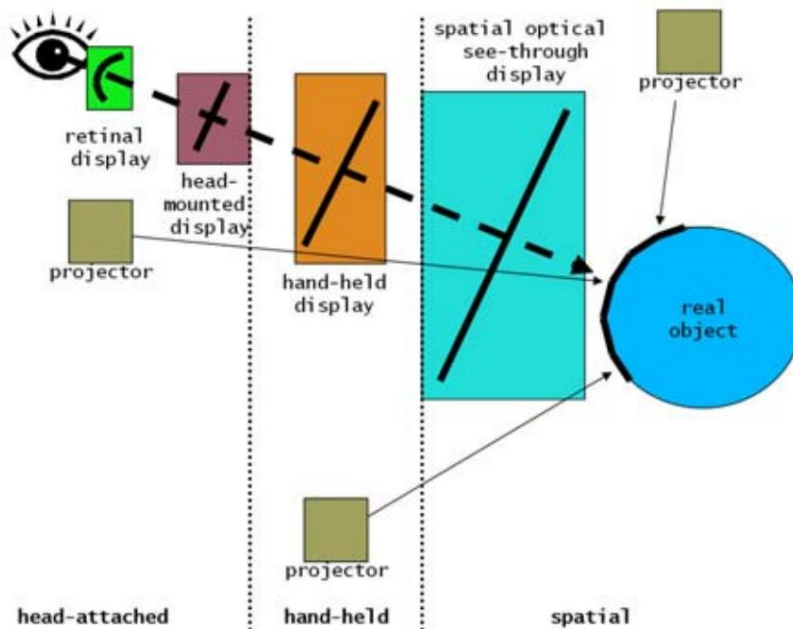


Figura 2.5. Dispositivos de Realidad Aumentada en base al lugar en que se generan las imágenes virtuales. Fuente: (Bimber & Raskar, 2006)

La clasificación más básica de los dispositivos que pueden utilizarse en sistemas de Realidad Aumentada se basa en si el usuario percibe la imagen del mundo físico a través de una pantalla (lo que en inglés se denomina *video see-through*) o de forma directa (en inglés, *optical see-through*). En las **tecnologías de vídeo**, la imagen del mundo físico es capturada por una cámara y se muestra en una pantalla combinada con las imágenes virtuales generadas por ordenador. Por tanto, el usuario no ve el aumento de la realidad de forma directa sino siempre a través de una pantalla. La Figura 2.6 (izquierda) muestra un diagrama conceptual de una pantalla *video see-through* montada sobre la cabeza del usuario. Este tipo de

sistemas es el más extendido y puede adoptar múltiples formatos, por ejemplo: gafas o cascos de Realidad Aumentada, aplicaciones de Realidad Aumentada para dispositivos móviles, aplicaciones de escritorio o, incluso, grandes pantallas que posibilitan la Realidad Aumentada en espejo.

Por su parte, las **tecnologías ópticas** consiguen que el mundo físico pueda verse de forma directa y no a través de un vídeo en una pantalla. Sin embargo, sí es necesario un dispositivo de visualización que muestre las imágenes virtuales en el campo de visión del usuario. Su formato suele ser el de unas gafas o unos cascos con lentes transparentes sobre las que se proyectan las imágenes virtuales y a través de las cuales el usuario ve el mundo físico, como se ejemplifica en el diagrama de la Figura 2.6 (derecha). Años atrás, estos dispositivos estaban mucho menos extendidos que los anteriores, principalmente porque la integración de la imagen virtual con el mundo físico era más deficiente. Sin embargo, en los últimos años, se ha vuelto a apostar por esta tecnología en HMD como Microsoft HoloLens o Magic Leap. Aún así, quedan algunos problemas por resolver. Por un lado, el campo de visión es todavía pequeño, por lo que el usuario no siente que la información virtual le envuelve por completo. Por otro lado, el usuario puede llegar a sentir malestar físico derivado de la acomodación continua de la retina.

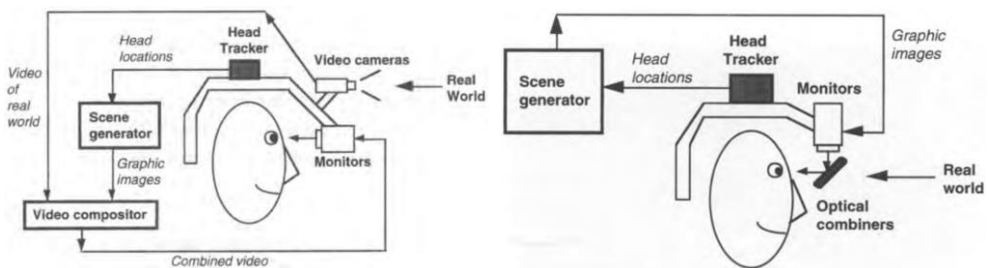


Figura 2.6. Diagrama conceptual de un dispositivo *video see-through* (izquierda) y de un dispositivo *optical see-through* (derecha). Fuente: (R. T. Azuma, 1997)

A estas dos categorías hay que añadir una tercera que consiste en proyectar las imágenes virtuales directamente sobre los objetos del mundo físico, lo que en inglés se conoce como **Projection-based Augmented Reality**. En este caso, el usuario no necesita ni una pantalla translúcida ni una de vídeo pues son los propios proyectores portados por el usuario o colocados en el entorno los que superponen las imágenes virtuales sobre el mundo físico aumentándolo. Además, muchos de

estos sistemas están provistos de dispositivos de captura de movimiento que posibilitan una interacción más activa del usuario.

Independientemente de la forma en que el usuario percibe el mundo físico, los dispositivos de Realidad Aumentada pueden ser clasificados, como se explicaba anteriormente, en función de la distancia a la que se genera la imagen virtual con respecto al usuario y al objeto aumentado. Así, se puede diferenciar entre: dispositivos colocados en la cabeza del usuario (*head-attached* o *head-worn*), dispositivos que se llevan en la mano (*hand-held*) y dispositivos situados en el entorno y completamente separados del usuario (*spatial*).

Head-attached

Dentro de los dispositivos diseñados para ser llevados en la cabeza, existen principalmente tres tipos: los retinianos, las pantallas y los proyectores. Las pantallas retinianas son, junto con los proyectores de cabeza, los sistemas menos extendidos. Esto se debe, principalmente, a su complejidad técnica y, por tanto, a su elevado coste económico. En 1995, Furness y Kollin patentaron uno de los primeros sistemas retinianos (Furness & Kollin, 1995). Tal y como describieron años más tarde en (Pryor et al., 1998), lo que hace un **Virtual Retinal Display** (VRD) es escanear luz láser modulada de baja potencia directamente en la retina del usuario para que éste perciba la imagen virtual. Las principales ventajas de este sistema son que ofrece una mayor resolución, una mayor luminancia y un campo de visión más amplio que con las pantallas sujetas en la cabeza. Todo ello, junto con su bajo consumo, hacen que sea una opción muy adecuada para su uso en exteriores. La Figura 2.7 (izquierda) muestra el sistema desarrollado por estos autores.

Por su parte, los sistemas compuestos por proyectores situados sobre la cabeza de los usuarios o **Head-Mounted Projection Displays** (HMPD) proyectan las imágenes virtuales a lo largo de la línea de visión del usuario sobre los objetos del mundo físico, en vez de en sus retinas. Con este tipo de cascos de Realidad Aumentada, múltiples usuarios pueden ver diferentes imágenes en el mismo objeto físico proyectadas por sus respectivos sistemas, ya que las imágenes virtuales sólo pueden verse a lo largo de la línea de proyección. Además, proporcionan un campo de visión bastante amplio y evitan las distorsiones que se producen en otros sistemas si no se ajusta de forma correcta el sistema a la distancia entre las pupilas

del usuario. Sin embargo, suelen ser dispositivos bastante engorrosos y pesados y su resolución y luminancia son limitadas, requiriendo a veces superficies de proyección especiales. La Figura 2.7 (derecha) muestra un prototipo de HMPD diseñado por Rolland et al. en su afán por conseguir un dispositivo cada vez más ligero (Rolland et al., 2005).

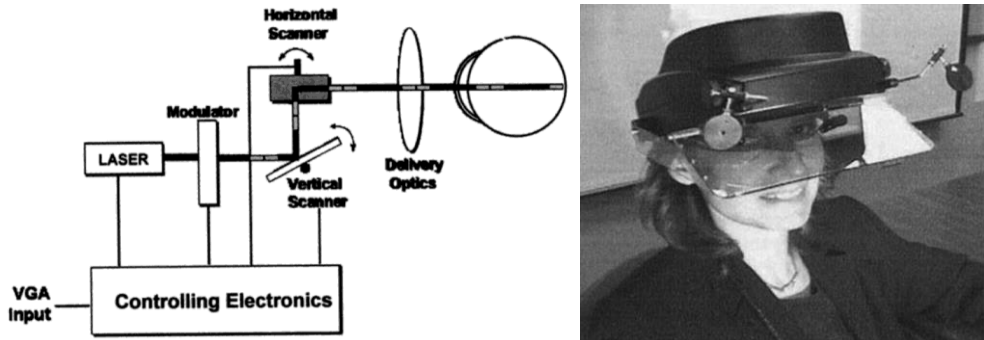


Figura 2.7. Esquema de un *Virtual Retinal Display* (izquierda, fuente: (Pryor et al., 1998)) y prototipo de un *Head-Mounted Projection Displays* (derecha, fuente: (Rolland et al., 2005))

El tercero de los tres tipos de sistemas englobados en el término *head-attached display* son los denominados **head-mounted displays** (HMD), aunque algunos autores, como (Sherman & Craig, 2018), consideran más adecuada la expresión *head-based display* (HBD). Los HMD destinados a ser utilizados con Realidad Aumentada deben permitir al usuario ver el entorno físico que le rodea, ya sea de forma directa (*optical see-through*) o a través de una pantalla (*video see-through*). Esto es lo que los diferencia de los HMD de Realidad Virtual, en los que el usuario es envuelto completamente por el mundo virtual y pierde toda referencia del mundo físico. Los HMD de Realidad Aumentada suelen ser cascos o gafas y pueden tener una o dos lentes o pantallas en las que se mezcla el mundo físico con el virtual. Estos dispositivos van equipados con sistemas de posicionamiento que informan al ordenador de dónde está mirando el usuario (o, como mínimo, de dónde están sus ojos). Con esta información, el ordenador puede situar las imágenes virtuales de tal forma que se integren adecuadamente en el espacio físico. Para conseguir una mayor interacción por parte del usuario, los HMD suelen incorporar dispositivos de entrada tales como sistemas de reconocimiento de voz o controladores de mano (guantes hápticos, mandos...), ya que la pantalla donde se muestran las imágenes virtuales está situada muy cerca de los ojos y el usuario no puede interactuar directamente con ella. En los últimos años, se ha apostado por hacer un

seguimiento de los gestos de las propias manos sin necesidad de que éstas sostengan ningún artefacto. Los HMD están mucho más extendidos que los dispositivos retinianos o basados en proyectores de cabeza. Actualmente, destacan los siguientes dispositivos en el mercado: Microsoft HoloLens, Magic Leap y Google Glass, entre otros, aunque éste último no ha tenido un gran desarrollo.

Uno de los principales inconvenientes de todos estos tipos de dispositivos diseñados para ser llevados sobre la cabeza de los usuarios ha sido siempre la restricción de la movilidad, tanto por la aparatosidad de los sistemas como por la duración de la batería si se desea evitar el cableado. Actualmente, los sistemas cada vez pesan menos, son más cómodos y tienen unas baterías más duraderas, especialmente los HMD. Otro de los grandes problemas es la precisión a la hora de conseguir una calibración y un seguimiento que garanticen una superposición gráfica correcta. Caudell y Mizell ya apuntaban, en (Caudell & Mizell, 1992), que uno de los principales problemas de la Realidad Aumentada es el seguimiento, ya que su precisión debe ser mucho más estricta que en el caso de la Realidad Virtual. La ubicación del dispositivo en relación a los ojos del usuario y al entorno físico debe determinarse antes de empezar a utilizar la aplicación de Realidad Aumentada y mantenerse durante todo su uso. Dado que el dispositivo puede no mantenerse completamente fijo en la cabeza del usuario, deben existir métodos que detecten la pérdida de registro y permitan una recalibración.

Hand-held

Los dispositivos de mano para Realidad Aumentada son aquellos que el usuario utiliza con las manos a modo de cámara de vídeo, o de linterna, para enfocar los objetos del mundo físico que quiere aumentar. Por tanto, el usuario no tiene las manos libres como sí ocurría con los dispositivos de cabeza, pero, a cambio, tiene libre el sentido de la vista, lo que hace que sus desplazamientos por el mundo físico sean menos peligrosos. Existen diversos tipos de pantallas de mano para Realidad Aumentada, como son: pantallas *video see-through*, pantallas *optical see-through* y proyectores de mano. Las primeras de ellas son las más extendidas gracias al uso extensivo de los *smartphones* o teléfonos inteligentes, quedando los otros dos tipos relegados casi exclusivamente a prototipos de laboratorio. En (Stetten et al., 2001), encontramos un ejemplo de **dispositivo óptico de mano** que permite combinar, en tiempo real, la superficie externa del cuerpo de un paciente con una ecografía

simultánea de su interior. Para ello, utilizan un transductor de ultrasonido que escanea los objetos, se muestran en un pequeño monitor y se reflejan en un espejo semitransparente. La Figura 2.8 (izquierda) muestra un prototipo real de este sistema.

Del mismo modo, los **proyectores de mano** se han utilizado en Realidad Aumentada de forma minoritaria, pero pueden encontrarse algunos trabajos. En (Raskar et al., 2006), por ejemplo, los autores presentan una nueva técnica para realizar proyecciones adaptativas en superficies no planas gracias a la cual consiguen aumentar objetos del mundo físico con un proyector de mano e incluir técnicas de interacción. La Figura 2.8 (centro) muestra en uso el sistema al que Raskar et al. llamaron iLamps. En (Ni et al., 2011), desarrollan un sistema similar al de (Stetten et al., 2001) pero utilizando un proyector de mano en vez de un dispositivo óptico de mano. Como muestra la Figura 2.8 (derecha), el sistema AnatOnMe presentado por los autores tiene por objetivo facilitar la comunicación médico-paciente mediante el uso de un dispositivo de mano que proyecta imágenes de huesos y músculos sobre el cuerpo del paciente.



Figura 2.8. Ejemplos de dispositivo óptico de mano (izquierda, fuente: (Stetten et al., 2001)) y de proyectores de mano para los sistemas de Realidad Aumentada iLamps (centro, fuente: (Raskar et al., 2006)) y AnatOnMe (derecha, fuente: (Ni et al., 2011))

Sin embargo, los dispositivos *hand-held* de tipo *video see-through* son, a día de hoy, los sistemas de Realidad Aumentada más extendidos en el mercado. Esto se debe, principalmente, al bajo coste de los dispositivos móviles inteligentes, a que son más fáciles de manejar y mucho menos aparatosos que los HMD u otros sistemas de mano y a la aparición de entornos de desarrollo como ARKit o ARCore, de los que se hablará más adelante. Así, los denominados **Mobile Augmented Reality System** (MARS) integran en un único dispositivo los siguientes elementos: una cámara que captura en tiempo real imágenes del mundo físico, una pantalla para la visualización de esas imágenes junto con las del mundo virtual y diversos

sistemas de interacción (pantalla táctil, botones, micrófono, etc.). Además, el ordenador que genera las imágenes virtuales y que se encarga de su correcta integración con el mundo físico está integrado en el propio dispositivo de mano, por lo que no es necesario ningún cable. Existen multitud de aplicaciones de Realidad Aumentada de este tipo, tanto en el mercado como en trabajos científicos. Un ejemplo transversal de ello es el famoso videojuego Pokémon Go (*Pokémon GO*, s. f.), desarrollado por Niantic, Inc. en 2016 para dispositivos iOS y Android. Su aparición produjo un alto impacto en la sociedad, hasta el punto de que se han publicado un gran número de artículos científicos sobre ella, sobre todo desde el punto de vista sociológico (Colley et al., 2017; Rauschnabel et al., 2017) y médico (Althoff et al., 2016; Tateno et al., 2016).

Uno de los principales problemas de los primeros MARS venía derivado del pequeño tamaño de los dispositivos. Por un lado, la memoria, el procesador y la tarjeta gráfica de los teléfonos móviles no eran equiparables a los de los ordenadores de sobremesa. Sin embargo, estos dispositivos tienen cada vez más capacidad y son más rápidos y potentes, superando, en algunos casos, a muchos ordenadores. Además, la industria del videojuego está impulsando el desarrollo de mejores tarjetas gráficas aptas para móviles. Por otro lado, el tamaño de la pantalla es otro de los inconvenientes a superar, pero cada vez aparecen en el mercado teléfonos y tabletas más grandes y con mayor resolución. Lo mismo ocurre con la óptica y los sensores de las cámaras, mucho mejores y con más especificaciones que las de los primeros MARS, que ni siquiera tenían autofocus. Así pues, como ya apuntaban Bimber y Raskar, los MARS son una alternativa real a los HMD, ya que tienen el potencial de llevar la Realidad Aumentada a un público masivo con un bajo coste de producción.

Spatial

Además de los dispositivos de Realidad Aumentada portados por el usuario, ya sea en la cabeza o en las manos, existen otro tipo de sistemas que se sitúan de forma estática en el entorno físico y el usuario está completamente separado de ellos. Son los llamados *spatial displays* o Realidad Aumentada espacial. Como ocurre con los dispositivos *head-attached* y los *hand-held*, existen tres tipos de sistemas espaciales que se diferencian, básicamente, en la forma de aumentar el

entorno: de vídeo, ópticos y proyectores. Este tipo de Realidad Aumentada suele ser adecuada para exhibiciones grandes y con baja interactividad.

Los **dispositivos espaciales de vídeo** o *screen-based video see-through displays* (SBVD) son conocidos también como Realidad Aumentada de escritorio, ya que hacen uso de monitores normales, generalmente de ordenador, y pequeñas cámaras web que capturan la imagen del mundo físico. Ésta imagen se muestra en la pantalla fusionada con las imágenes virtuales generadas por el ordenador y el usuario puede visualizarlas sin necesidad de llevar ningún dispositivo en su cuerpo. Otras veces se utilizan grandes pantallas para ser utilizadas en espacios multitudinarios, por lo que la expresión **Realidad Aumentada basada en pantalla** resulta más apropiada que la de Realidad Aumentada de escritorio pues engloba más usos. La Figura 2.9 muestra, en la parte superior, un ejemplo de SBVD en el que una lámpara ilumina un libro y, a su vez, oculta una cámara web; paralelamente, un ordenador estándar procesa las imágenes capturadas por la cámara y les añade elementos virtuales que serán mostrados en la pantalla del ordenador junto al libro. El trabajo completo se describe en (Scherrer et al., 2009). La Figura 2.9 muestra, en la parte inferior, otro ejemplo de SBVD, pero en este caso se utiliza una gran pantalla para que el sistema, que presenta piezas cerámicas virtuales sobre marcadores fiduciales, pueda ser utilizado por varios usuarios a la vez, tal y como se explica en (Martínez et al., 2018). Este tipo de sistemas, en los que los usuarios se ven reflejados en una pantalla, también adquiere el nombre de Realidad Aumentada en espejo.

Este tipo de Realidad Aumentada genera un bajo grado de inmersión, principalmente porque el campo de visión está limitado al tamaño del monitor en el que se muestran las imágenes y por la baja movilidad del usuario (no puede alejarse demasiado del monitor ni ponerse en un ángulo muy cerrado). Por contra, su principal ventaja es el bajo coste, pues sólo es necesario un ordenador estándar, y se suele emplear cuando no es posible usar opciones móviles u ópticas.



Figura 2.9. Ejemplos de Realidad Aumentada basada en pantalla. Fuentes: (Scherrer et al., 2009) (arriba), (Martínez et al., 2018) (abajo)

Por su parte, los **dispositivos espaciales ópticos** o *spatial optical see-through displays* generan imágenes virtuales alineadas con el entorno físico mediante componentes tales como divisores de haz, pantallas transparentes u hologramas ópticos. La Figura 2.10 muestra dos ejemplos de hologramas desarrollados por el grupo ARTEC del Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y Comunicación (IRTIC) y expuestos en la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia. A la izquierda, un holograma a tamaño real que nos traslada al planeta Marte. A la derecha, un sistema que escanea un dibujo de un animal pintado por un niño y lo muestra en el holograma dándole vida. Estos sistemas presentan algunas ventajas: facilitan la acomodación y convergencia ocular, ofrecen un entorno más controlable y permiten una calibración más fácil y estable. Sin embargo, también son numerosos los inconvenientes a superar: no permiten aplicaciones móviles, en la mayoría de casos no es posible una interacción manipulativa de los objetos físicos y virtuales situados detrás de la óptica y los objetos virtuales pueden verse cortados si se encuentran fuera del área de la pantalla o si el usuario se sitúa en una posición muy escorada.



Figura 2.10. Ejemplos de hologramas utilizados como dispositivos espaciales ópticos de Realidad Aumentada

Por último, los **proyectores espaciales** o *projection-based spatial displays* (PSD) proyectan directamente las imágenes virtuales sobre las superficies de los objetos físicos. Los proyectores pueden ser estáticos o dirigibles e individuales o múltiples, pudiendo de esta forma aumentar el área de visualización. Además, para permitir la interacción con el usuario, deben incorporar algún sistema de captura de movimientos o de reconocimiento de voz. En (Casas et al., 2020), los autores tratan de solucionar el problema de la visualización de información resumida en un sistema complejo, como puede ser una ciudad inteligente, mediante el uso de Realidad Virtual y Realidad Aumentada. En concreto, utilizan la Realidad Aumentada espacial basada en proyectores para visualizar información sobre el estado y la gestión de la ciudad sobre una maqueta de la misma. La Figura 2.11 (izquierda) muestra cómo la información virtual generada por varios proyectores ilumina de diferentes colores los edificios y carreteras para proporcionar información sobre el estado del tráfico, el consumo de energía, etc. En (Sevilla et al., 2018), se describe otro trabajo que también hace uso de PSD. En este caso, la Realidad Aumentada espacial se utiliza para ayudar a personas con Trastorno del Espectro Autista a realizar sus tareas dentro del Sistema de Trabajo Individual, diseñado por la Universidad de Carolina del Norte, en Estados Unidos. En la Figura 2.11 (derecha) puede observarse cómo se ilumina de azul una bandeja de trabajo para que el usuario centre su atención sobre ella.



Figura 2.11. Ejemplos de *projection-based spatial displays*. Fuentes: (Casas et al., 2020) (izquierda), (Sevilla et al., 2018) (derecha)

Las principales desventajas de estos sistemas son: la restricción del área de visualización (sólo se puede proyectar sobre los objetos, pero no mostrar imágenes a su lado), la limitación de enfoque en un único plano focal y la complejidad de la calibración para conseguir una alineación exacta entre lo virtual y lo físico, especialmente cuando hay más de un proyector. Otras desventajas que existían en los primeros sistemas basados en proyectores espaciales apuntadas en (Bimber & Raskar, 2006) se han ido superando gracias al desarrollo de la tecnología. La proyección de sombras de los usuarios que pasan frente a la luz proyectada, por ejemplo, se evita actualmente con proyectores de tiro ultra corto. También existen numerosos estudios que intentan minimizar el problema de la profundidad de campo, ya sea con un único proyector o con varios, como se explica en (Grundhöfer & Iwai, 2018). Además, estos sistemas presentan algunas ventajas como un campo de visión teóricamente ilimitado, una resolución escalable y una acomodación ocular fácil.

Resumen de los dispositivos de Realidad Aumentada

La Tabla 2.1 muestra todos los dispositivos explicados en este apartado, con los diferentes nombres utilizados, para obtener una visión general de los diversos formatos que puede adoptar esta tecnología. En algunos casos, se incluye el nombre que se le da al tipo de Realidad Aumentada asociada a esos dispositivos. La cabecera horizontal clasifica los dispositivos en función de dónde se sitúan las pantallas de visualización con respecto al usuario y al objeto físico mientras que la cabecera vertical diferencia las formas en que el usuario puede percibir el mundo físico.

	Head-attached / Head-worn	Hand-held	Spatial
Retinal	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Virtual Retinal Display (VRD)</i> • Dispositivo retiniano 		
Optical see-through		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Hand-held optical see-through display</i> • Dispositivo óptico de mano 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Spatial optical see-through display</i> • Dispositivo espacial óptico
Video see-through	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Head-Mounted Displays (HMD)</i> • <i>Head-Based Display (HBD)</i> • Casco o Gafas de RA 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Hand-held video see-through display</i> • <i>Mobile Augmented Reality System (MARS)</i> • RA para dispositivos móviles inteligentes (teléfono móvil o tableta) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Screen-based video see-through display (SBVD)</i> • Dispositivo espacial de vídeo • RA basada en pantalla • RA de escritorio • RA en espejo
Projection-based	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Head-Mounted Projection Display (HMPD)</i> • Proyector de cabeza 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Hand-held projective display</i> • Proyector de mano 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Projection-based spatial display (PSD)</i> • Proyector espacial

Tabla 2.1. Clasificación de los dispositivos de Realidad Aumentada con los diferentes nombres que reciben

2.2.2. Interacción en tiempo real

Otro de los requisitos de un sistema de Realidad Aumentada es que sea interactivo. Esto significa que ha de existir algún tipo de retroalimentación entre el ordenador (el mundo virtual) y el usuario. Sin embargo, el grado de esta interacción varía mucho de un sistema a otro: desde aquellas aplicaciones que sólo permiten al usuario moverse por el espacio y observar la información virtual que se le presenta integrada en el mundo físico hasta aquellas que permiten a los usuarios no sólo interactuar con la información virtual sino también editarla e, incluso, crear nuevo contenido.

La interacción del usuario con el entorno aumentado se produce a través de las interfaces de usuario. A nivel de hardware, puede realizarse a través de diferentes

sistemas, que van desde los tradicionales dispositivos de entrada (teclado, ratón, mandos...) hasta otros más complejos como la captura de movimiento o el reconocimiento de voz, entre otros. También forman parte del proceso de interacción los diferentes sistemas de visualización (pantallas, proyecciones...). Por tanto, existen multitud de tipos de interfaces (gráficas, hápticas, sonoras, multimodales...) que implican, a su vez, diferentes formas de interacción del usuario con la información virtual en tiempo real.

En 1995, Mine realizó un estudio (Mine, 1995) sobre las diferentes técnicas de interacción en los entornos virtuales que ha sido la base de muchos trabajos posteriores. El autor describe cuatro formas fundamentales de interacción en un mundo virtual: movimiento, selección, manipulación y escalado. En la mayoría de los trabajos posteriores, se han acabado reduciendo estas cuatro formas a dos: **manipulación** y **navegación**. Esto se debe a que el escalado se entiende como una forma de manipulación y la selección como un paso previo necesario para la manipulación, por lo que va implícito en ella. A estas dos formas principales de interactuar con el mundo virtual se ha sumado posteriormente una tercera: la comunicación o **colaboración** entre usuarios. A continuación, se profundiza en estas tres formas claves de interacción.

Manipulación

La manipulación permite al usuario modificar el mundo y sus objetos. En la mayoría de sistemas, la manipulación implica una primera tarea de selección para poder identificar el elemento que va a ser modificado. A continuación, se realiza la acción de manipulación propiamente dicha, que puede suponer realizar diversos cambios en los elementos virtuales, desde modificar su posición, orientación o escalado hasta variar otros parámetros como el color o la transparencia o, incluso, añadirle o quitarle partes de su estructura. La libertad que ofrece el mundo virtual en este sentido es muchísimo más amplia que la del mundo físico.

En el mundo virtual, la manipulación puede llevarse a cabo de diferentes formas. Mine definió tres técnicas fundamentales: interacción directa del usuario, controles físicos y controles virtuales. Posteriormente, Sherman y Craig añadieron en su libro (Sherman & Craig, 2002) un cuarto método: control de agente. A continuación, se describen estas cuatro formas de manipulación del mundo virtual.

El **control directo del usuario** supone que éste interactúa con los objetos virtuales tal y como lo haría en el mundo físico. Por tanto, los gestos de la interfaz de usuario buscan imitar la interacción en el mundo real. Por ejemplo: para desplazar una mesa virtual, el usuario tiene que empujarla con las manos tal cual lo haría con una mesa física. Se trata de un tipo de interacción flexible pero sus resultados dependen del mapeo intuitivo y natural entre la acción del usuario y la acción resultante en el mundo virtual. La mayoría de interacciones mediante control directo del usuario utilizan gestos o miradas para seleccionar y manipular los objetos virtuales (por ejemplo: cerrar la mano en un puño se interpreta como una operación de agarre y hace que el objeto virtual colocado en la mano siga el movimiento de ésta).

Cuando el **control** es **físico**, la interacción ocurre mediante el uso de dispositivos del mundo real que el usuario puede tocar físicamente (botones, mandos, volantes, pedales, etc.). Los dispositivos de control físico proporcionan retroalimentación háptica y un control muy preciso. Sin embargo, carecen de flexibilidad. Esto implica que el usuario debe memorizar la funcionalidad de cada control físico y su asociación con los objetos virtuales. Cuanto más relacionado esté el control físico con el mundo virtual, más intuitiva será la interacción.

Por su parte, el **control virtual** implica que los controles sólo existen en el mundo virtual, por lo que su apariencia, ubicación y visibilidad son completamente flexibles. Sin embargo, requieren de algún tipo de entrada física para funcionar, aunque sea mínima (por ejemplo, un único mando utilizado para controlar muchas entradas virtuales). Los dispositivos físicos pueden incluso desaparecer completamente si se utilizan otros medios para interactuar con los elementos virtuales, como pueden ser el reconocimiento de movimientos o de voz. Esto suele hacer los sistemas más complejos y se puede perder precisión en la interacción. Además, los controles virtuales sufren la falta de retroalimentación háptica.

Por último, puede encontrarse el **control de agente**. En este caso, las acciones que el usuario quiere realizar con los elementos virtuales del entorno las hace a través de un intermediario (agente). Éste puede ser una persona o un agente virtual controlado por la computadora a través de los comandos especificados por el usuario (normalmente mediante voz o gestos). La Figura 2.12 muestra cómo puede moverse una mesa virtual utilizando cada una de las técnicas de interacción

descritas. Mientras que en las tres primeras imágenes el usuario se encarga de mover la mesa de forma más o menos directa (realizando el gesto de empujar una mesa, utilizando un mando como control físico o mediante un control virtual), en el caso del control de agente es un avatar el que mueve la mesa siguiendo las instrucciones de voz que le está dando el usuario.

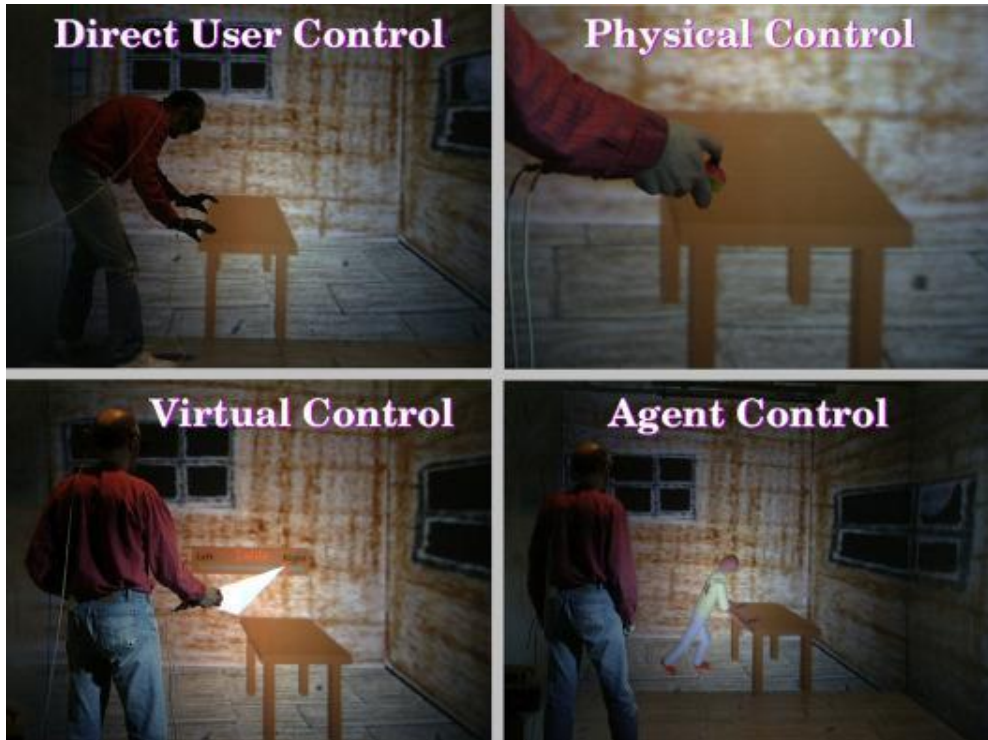


Figura 2.12. Ejemplo de aplicación de las cuatro técnicas de manipulación del mundo virtual a la acción de desplazar una mesa virtual. Fuente: (Sherman & Craig, 2002)

En la Realidad Aumentada, existe una estrecha relación entre los objetos virtuales y los objetos físicos, por lo que es muy importante que exista una retroalimentación háptica cuando se manipula el entorno. Es por ello que el control directo del usuario y el control físico son las dos formas más características de manipulación en este tipo de sistemas. Los usuarios pueden operar físicamente con los objetos de su entorno y éstos pueden actuar como interfaz y estar directamente relacionados con objetos virtuales. Con esto se consigue que el usuario tenga la sensación de manipular directamente los objetos virtuales. Por tanto, la existencia

de una **interfaz de usuario tangible** en entornos de Realidad Aumentada es fundamental.

En 1997, Ishii y Ullmer presentaron una investigación cuyo objetivo era mostrar formas concretas de ir más allá del modelo de interfaz dominante, la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, del inglés *Graphical User Interface*), vinculada a un ordenador con pantalla, teclado y ratón (Ishii & Ullmer, 1997). Lo que buscaban era establecer un nuevo tipo de Interacción Persona-Computadora (HCI, del inglés *Human-Computer Interaction*) a la que llamaron Interfaz Tangible de Usuario (TUI, del inglés *Tangible User Interface*). El objetivo de las TUI es convertir los objetos del mundo físico en dispositivos de entrada y salida para interfaces de computadora. Las TUI aumentan el mundo físico real ya que acoplan la información virtual a los objetos y entornos físicos cotidianos. Se trata, pues, de interfaces de usuario en las que los usuarios interactúan con la información digital a través del entorno físico. En la Figura 2.13 ilustraron la transición que la HCI debe hacer para transformar el mundo en una interfaz, esto es: pasar de las GUI a las TUI.

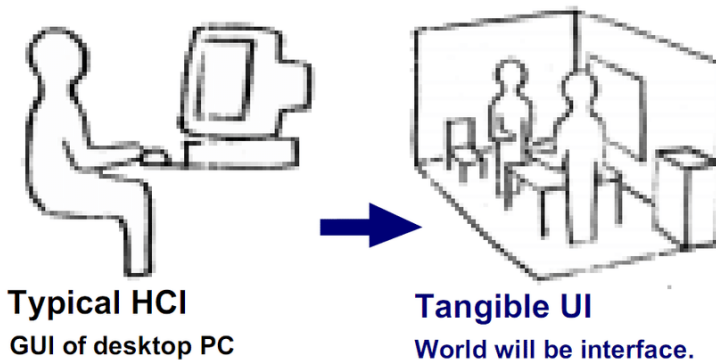


Figura 2.13. Esquematización de la transición de las GUI a las interfaces de usuario tangible. Fuente: (Ishii & Ullmer, 1997)

Como puede deducirse, estos conceptos están íntimamente relacionados con la Realidad Aumentada y por eso son tan importantes las TUI en este campo. En 2000, Kato et al. se centraron en el concepto de Realidad Aumentada tangible en su trabajo (Kato et al., 2000), que más tarde ampliarían en (Billinghurst et al., 2008). Según las investigaciones de los autores, las interfaces de Realidad Aumentada tangible combinan las posibilidades mejoradas de visualización de la Realidad Aumentada con las ventajas de las TUI, esto es: la manipulación intuitiva y la

interacción directa con los objetos físicos. Así pues, definen las interfaces de Realidad Aumentada tangible como aquellas en las que cada objeto virtual se registra en un objeto físico y en las que el usuario interactúa con los objetos virtuales manipulando los objetos tangibles correspondientes. La Figura 2.14 muestra un ejemplo de un sistema de escenas versátiles de Realidad Aumentada que permite construir escenarios que se adaptan dinámicamente a diferentes entornos del mundo físico que son aumentados con información virtual, tal y como describe el autor en (Wojciechowski, 2017).



Figura 2.14. Ejemplo de TUI aplicada a la Realidad Aumentada. Fuente: (Wojciechowski, 2017)

La mayor limitación de este tipo de interfaces radica en conseguir un registro y un seguimiento precisos entre los objetos reales y virtuales en cualquier parte del espacio. Este problema puede elevar la complejidad del desarrollo de un sistema, tanto a nivel de hardware como de software. Este es uno de los principales motivos por el que muchas aplicaciones de Realidad Aumentada no utilizan una TUI y prefieren optar, por ejemplo, por sistemas de control virtual.

Navegación

Otra de las formas clave de interacción con el mundo virtual es la navegación. Ésta permite al usuario moverse por el mundo físico y virtual. La navegación incluye, además del desplazamiento, la orientación, esto es: conocimiento de dónde se está y hacia dónde (y cuándo) se va. Mientras que en la Realidad Virtual el usuario se desplaza por un mundo ficticio, en la Realidad Aumentada la navegación se realiza en el propio mundo físico, por lo que el usuario camina por un entorno real (ya sabe hacerlo) mientras recibe una percepción aumentada e interactiva del mismo. En algunas experiencias de Realidad Aumentada, la única interacción disponible es navegar por el mundo. En tales aplicaciones (comunes en el campo del patrimonio

cultural, la arqueología o las actividades museísticas), el mundo virtual es estático o sigue una secuencia de eventos preprogramada.

Según el dispositivo elegido para la implementación de la Realidad Aumentada, la navegación será más o menos flexible. En (Sherman & Craig, 2018), los autores actualizan su trabajo de 2002 y describen en detalle una serie de ayudas que se utilizan tanto en el mundo físico como en el virtual para mejorar la **orientación** de los usuarios: seguir un camino, mapas, señales, nombres de lugares memorables, dejar un rastro, brújulas, navegadores, vista exocéntrica, visualización de coordenadas u otra información en forma de texto (como el nombre de las ciudades circundantes) y viajes restringidos. En cuanto al **desplazamiento**, los autores describen los siguientes métodos como los utilizados más comúnmente, independientemente de la interfaz en la que se apliquen: locomoción física (deambulación del usuario), paseo dirigido con diferentes grados de libertad de movimiento, vuelo (con movimiento en tres dimensiones), control de algún vehículo, mover el mundo alrededor del usuario (mientras éste permanece quieto), escalar el mundo, teletransporte y visualización orbital.

La elección de los métodos de desplazamiento y de orientación y de cómo implementarlos va a depender de diferentes factores, tales como: la finalidad de la aplicación, la experiencia que se le presupone al usuario, los dispositivos de entrada y salida de los que dispone el desarrollador y el dispositivo final en el que el usuario utilizará la aplicación. Así, una aplicación diseñada para un HMD de Realidad Aumentada hará uso de los mandos que el fabricante diseñó para él mientras que una aplicación desarrollada específicamente para el entrenamiento de pilotos de avión incluirá controles físicos mucho más personalizados. Hay que tener en cuenta que la elección del dispositivo final en el que el usuario utilizará la aplicación es, muy probablemente, el mayor condicionante del tipo de navegación. Un teléfono móvil, por ejemplo, permite que el usuario camine libremente por un espacio a priori infinito mientras que, en aplicaciones de Realidad Aumentada de escritorio o de pantalla, no existe una navegación física del usuario o ésta es muy limitada.

Como puede deducirse, para que el desplazamiento y la orientación se desarrollen de forma adecuada durante la utilización de un sistema de Realidad Aumentada, es fundamental hacer un buen seguimiento de todos los movimientos del usuario. El objetivo es saber en cada momento dónde se encuentra

exactamente para que exista una correlación entre lo virtual y lo real lo más precisa posible. En el siguiente apartado se profundiza más en el tema de la captura del punto de vista y del seguimiento del usuario.

Colaboración

El último tipo clave de interacción es la comunicación o colaboración entre usuarios, que permite pasar de una perspectiva centrada en un único usuario a sistemas que pueden ser utilizados por varios individuos que comparten la misma información virtual. Es lo que se conoce como Realidad Aumentada colaborativa. Una de las formas más comunes de clasificar los trabajos colaborativos asistidos por computadora o CSCW (del inglés *Computer Supported Collaborative Work*) es mediante el uso de la matriz espacio-tiempo desarrollada en (Bullen & Johansen, 1988) y revisada en (Ellis et al., 1991). Como se muestra en la Figura 2.15, se diferencia entre cuatro tipos de interacción:

- **Cara a cara:** los colaboradores trabajan juntos en un mismo espacio físico y en tiempo real
- **Asíncrona:** los colaboradores trabajan en un mismo espacio físico, pero en diferentes periodos de tiempo
- **Síncrona distribuida:** los colaboradores trabajan al mismo tiempo, pero desde diferentes ubicaciones
- **Asíncrona distribuida:** los colaboradores trabajan desde diferentes ubicaciones y sin necesidad de estar conectados en el mismo momento

	Same Time	Different Times
Same Place	face-to-face Interaction	asynchronous Interaction
Different Places	synchronous distributed Interaction	asynchronous distributed Interaction

Figura 2.15. Matriz espacio-tiempo de los CSCW. Fuente: (Ellis et al., 1991)

Cada uno de estos tipos de comunicación tiene sus ventajas y desventajas. Las herramientas asíncronas y remotas, como el correo electrónico, permiten una difusión rápida y fácil de la información. Esto, a su vez, hace que fácilmente se produzca una sobrecarga de información y una falta de comunicación. En cambio, las reuniones cara a cara son menos propensas a distracciones y a confusiones porque existe la comunicación no verbal. Sin embargo, ponerse de acuerdo para encontrar un momento y un lugar adecuados para todos puede convertirse en un problema (Pidel & Ackermann, 2020).

Los sistemas de Realidad Aumentada colaborativos se basaron inicialmente en experiencias cara a cara, como fue el caso del sistema Transvision de Rekimoto (Rekimoto, 1996) o del concepto Shared Space de Billingham et al. (Billingham et al., 1998). Ya entonces se vio que la Realidad Aumentada podría mejorar significativamente la colaboración cara a cara al fusionar el espacio de trabajo y el espacio de comunicación, a menudo separados en los sistemas de escritorio (Irlitti et al., 2016). Desde entonces, la mayor parte de la investigación se ha centrado en la colaboración síncrona, tanto distribuida como cara a cara. En cambio, el problema de la colaboración asincrónica está particularmente poco explorado (Irlitti et al., 2016; Pidel & Ackermann, 2020). Además, en los últimos años, los sistemas distribuidos son los que han recibido más atención, debido a que el escenario más estudiado es el de expertos remotos asistiendo a usuarios locales (Ens et al., 2019). Sin embargo, la Realidad Aumentada colaborativa permite otras muchas funcionalidades como, por ejemplo, colocar anotaciones para transmitir información sobre un elemento o ubicación cuando productor y consumidor no pueden estar presentes en el mismo momento. A continuación, se profundiza en las diferentes modalidades de CSCW-AR.

En la **colaboración cara a cara o presencial**, los usuarios se encuentran en la misma habitación o entorno físico. Esto hace que puedan utilizar el lenguaje verbal y no verbal para comunicarse de la manera más clara posible. Por tanto, en este tipo de aplicaciones, la interacción entre los usuarios se hace sin necesidad del sistema de Realidad Aumentada y éste se limita a proporcionar la capacidad de trabajar de forma conjunta con la misma información virtual. Así pues, una de las principales ventajas de la colaboración presencial es que los usuarios pueden ver las expresiones faciales y el lenguaje corporal del resto de participantes, lo que incrementa enormemente la eficiencia de la comunicación. Un ejemplo de este tipo

de colaboración es la aplicación multijugador que en 2018 presentó la empresa de juguetes LEGO junto con Apple. Como muestra la Figura 2.16, varios usuarios pueden apuntar con sus iPads a una construcción hecha con bloques y la aplicación de Realidad Aumentada agrega figuras animadas virtuales (personas, coches, animales...) en los diferentes espacios de la construcción (habitaciones, jardines, calles...).



Figura 2.16. Juego de LEGO de Realidad Aumentada colaborativa cara a cara. Fuente: <https://www.apple.com/>

Por su parte, la **colaboración síncrona distribuida** (también conocida como **remota**) implica que los usuarios no están cara a cara por lo que el sistema de Realidad Aumentada ha de utilizarse necesariamente para crear un canal de comunicación entre ellos. Uno de los usos más extendidos de este tipo de aplicaciones es la asistencia remota, en la que un usuario trata de resolver un problema a otro usuario que no se encuentra en la misma habitación que él. Uno de los principales objetivos de las aplicaciones de colaboración remota es mejorar la sensación de presencia del usuario remoto para mejorar así la transmisión de información entre los participantes.

En el trabajo realizado en (García-Pereira et al., 2018), se comparan diferentes formas de colaboración remota. En él, se presenta MIME, un sistema tricolaborativo en espacio mixto. Esto significa que existen tres tipos diferentes de usuarios, cada uno de ellos situado en un espacio diferente y provistos de

dispositivos con diferente grado de inmersión (HMD, dispositivo móvil de mano y aplicación de escritorio). Los participantes pueden interactuar simultáneamente navegando por el espacio, apuntando a objetos o ubicaciones y haciendo anotaciones. Todos los usuarios ven las representaciones virtuales del resto para poderlos ubicar en el espacio y crear así una sensación de compartir el entorno. Los resultados de las pruebas de usuario fueron bastante satisfactorios y demostraron que la comunicación remota es factible incluso utilizando diferentes sistemas de Realidad Aumentada. La Figura 2.17 muestra el sistema MIME en uso: a la izquierda, un usuario remoto equipado con un HMD; en la segunda imagen, la representación virtual de dos usuarios remotos junto con el modelo 3D del espacio compartido; en la tercera imagen, un usuario virtual en el espacio real (pueden verse las oclusiones); en la imagen de la derecha, la representación virtual de un usuario remoto que señala con el dedo una ubicación del entorno físico y hace anotaciones que pueden ver el resto de participantes.

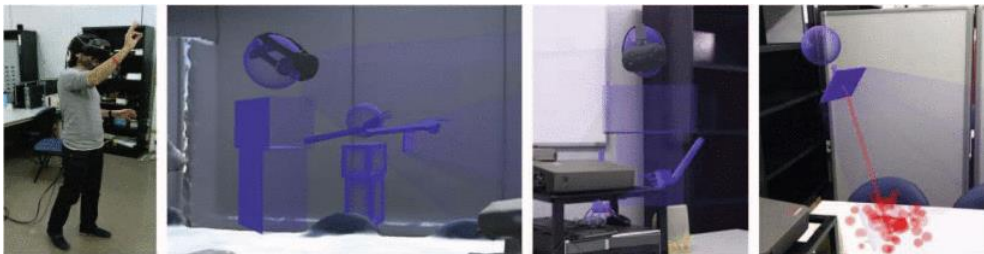


Figura 2.17. Sistema MIME de Realidad Aumentada colaborativa síncrona distribuida.

Fuente: (García-Pereira et al., 2018)

En la **colaboración asíncrona**, los usuarios se sitúan en el mismo entorno físico, pero en momentos diferentes por lo que consumen la información virtual de forma espaciada en el tiempo. Al igual que en el caso anterior, el canal de comunicación entre usuarios ha de crearse mediante el sistema de Realidad Aumentada ya que no pueden verse cara a cara. Aunque existe una amplia variedad de campos en los que potencialmente podrían utilizarse los CSCW-AR asíncronos no distribuidos (industria (Jalo et al., 2018), buscadores, navegadores, turismo y patrimonio histórico (Ioannidi et al., 2017), entretenimiento y deporte (Daiber et al., 2013), etc.), existen pocos trabajos que exploren este tipo de colaboración. Y es que aún quedan varios retos que superar en este campo, como son la creación in situ de anotaciones de Realidad Aumentada ancladas al mundo físico y cómo retener y visualizar dicha información posteriormente (Serenio et al., 2020).

Por último, la **colaboración asíncrona distribuida** es, probablemente, la modalidad de CSCW-AR menos explorada (Pidel & Ackermann, 2020). En el citado estudio, los autores lo justifican del siguiente modo: dado que la Realidad Aumentada se basa principalmente en la ubicación, tiene sentido que haya casos de uso limitados cuando se usa de forma independiente a la ubicación. En (Guo et al., 2019), puede encontrarse un ejemplo, aunque la aplicación presentada, Blocks, explora los cuatro tipos de colaboración. Se trata de una aplicación móvil de Realidad Aumentada que permite crear, de forma colaborativa, estructuras virtuales que persisten en el entorno físico. Los usuarios pueden colaborar de forma sincrónica o asíncrona, ya sea cara a cara o de forma remota.

En (Szalavári et al., 1998), los autores identificaron las seis características clave de un entorno colaborativo de Realidad Aumentada, aún vigentes hoy en día y que nos sirven de recapitulación a todo lo mencionado en este apartado:

- **Virtualidad:** los objetos virtuales pueden verse y examinarse.
- **Aumentación:** los objetos del mundo físico se pueden aumentar con información virtual alineada espacialmente.
- **Multiusuario:** varios usuarios se pueden ver entre sí (o, como mínimo, pueden ver la información aportada por el resto) y cooperar de manera natural.
- **Independencia:** cada usuario controla su propio punto de vista, que es independiente del del resto de participantes.
- **Compartir vs. Individualidad:** los datos mostrados pueden ser compartidos por todos los usuarios, pero también pueden ser diferentes para cada participante, permitiendo así diferentes roles en un mismo sistema.
- **Interacción:** los datos visualizados se pueden explorar de forma interactiva y los cambios se pueden ver de inmediato.

2.2.3. Registro e integración de lo virtual en el espacio físico en tres dimensiones

La última de las tres características que Azuma definió en (R. T. Azuma, 1997) como esencial en cualquier sistema de Realidad Aumentada es la necesidad de estar registrado en tres dimensiones, de forma que lo virtual se integre

adecuadamente en el espacio físico. Esto significa que ha de existir necesariamente una correlación entre lo físico y lo virtual. Para conseguir esto, hay que generar la imagen de la escena virtual con una cámara virtual colocada en el punto de vista del usuario. Además, durante todo el uso de la aplicación, se debe mantener una alineación lo más precisa posible de los dos mundos, por lo que hay que hacer un seguimiento continuo de la posición y orientación del usuario, capturando siempre su punto de vista. Este proceso es conocido en el ámbito de la Realidad Aumentada como registro y seguimiento o *tracking*.

El seguimiento calcula la localización relativa de la cámara en tiempo real. Esta localización está definida tanto por la posición como por la orientación, es decir, requiere de seis grados de libertad o 6DoF (del inglés *Six Degrees Of Freedom*). Estos grados de libertad, que se muestran en la Figura 2.18, son: adelante/atrás (*forward/back*), arriba/abajo (*up/down*), izquierda/derecha (*left/right*), cabeceo (*pitch*), guiñada (*yaw*) y alabeo (*roll*).

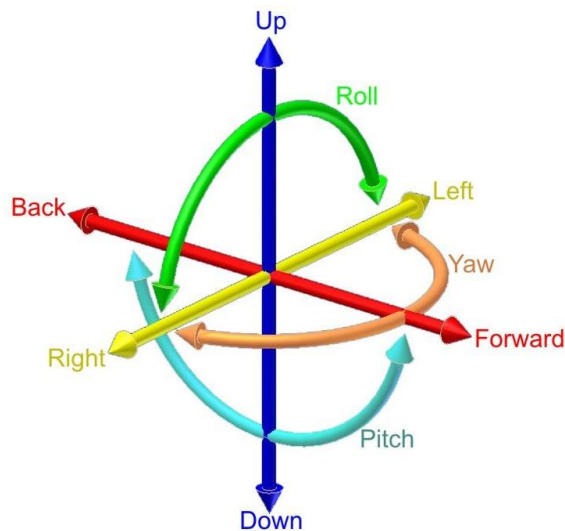


Figura 2.18. Representación gráfica de los 6DoF

Uno de los problemas más básicos que limitan a las aplicaciones de Realidad Aumentada es el problema del registro. Los elementos del mundo virtual y del mundo físico deben estar correctamente alineados entre sí pues, si no es así, la ilusión de que los dos mundos coexisten se verá comprometida. Un seguimiento preciso, que localiza a los usuarios y sus movimientos en referencia a su entorno, es un requisito crucial para una aplicación de Realidad Aumentada, especialmente

en determinados ámbitos de trabajo, como puede ser la cirugía. Es por ello que el seguimiento sigue siendo uno de los temas principales de investigación de Realidad Aumentada. Una muestra de ello es que, de los cientos de trabajos publicados en el ISMAR (*International Symposium on Mixed and Augmented Reality*) entre 2008 y 2017, cinco de los diez estudios con las tasas de citas más altas fueron sobre técnicas de seguimiento. Además, en 2008 el tema más frecuente de investigación fue el *tracking*, con un 20,1%, y en 2018 se mantuvo en la primera posición con un 19,4%, tal y como se analiza en (K. Kim et al., 2018).

Los errores de registro son difíciles de controlar adecuadamente debido al requisito imprescindible de alta precisión de los sistemas de Realidad Aumentada y a las numerosas fuentes de error, que pueden ser de tipo estático o dinámico. Los errores estáticos son los que producen fallos de registro incluso cuando el punto de vista del usuario y los objetos del entorno permanecen completamente quietos. Los errores dinámicos son los que no tienen efecto hasta que el punto de vista o los objetos se mueven.

Siguiendo la reciente revisión llevada a cabo en (Palmarini et al., 2018) sobre las aplicaciones de Realidad Aumentada en mantenimiento (aunque sus conclusiones se pueden extrapolar a otros campos de aplicación), las técnicas de seguimiento se pueden clasificar en: basadas en visión (o en imagen, según la nomenclatura de otros autores), basadas en sensores e híbridas. El seguimiento híbrido es aquel que utiliza al mismo tiempo las otras dos técnicas. Las técnicas de seguimiento basadas en visión se dividen a su vez en dos categorías: métodos a priori y métodos en tiempo real. El primero implica que el sistema de Realidad Aumentada tiene un conocimiento previo sobre el objeto que será rastreado. Esta información se puede generar utilizando, entre otros, un método en tiempo real, que será el que proporcione la inicialización que necesitan los sistemas a priori. La Figura 2.19 muestra un esquema de las técnicas de seguimiento existentes que se analizan a continuación.

Tracking

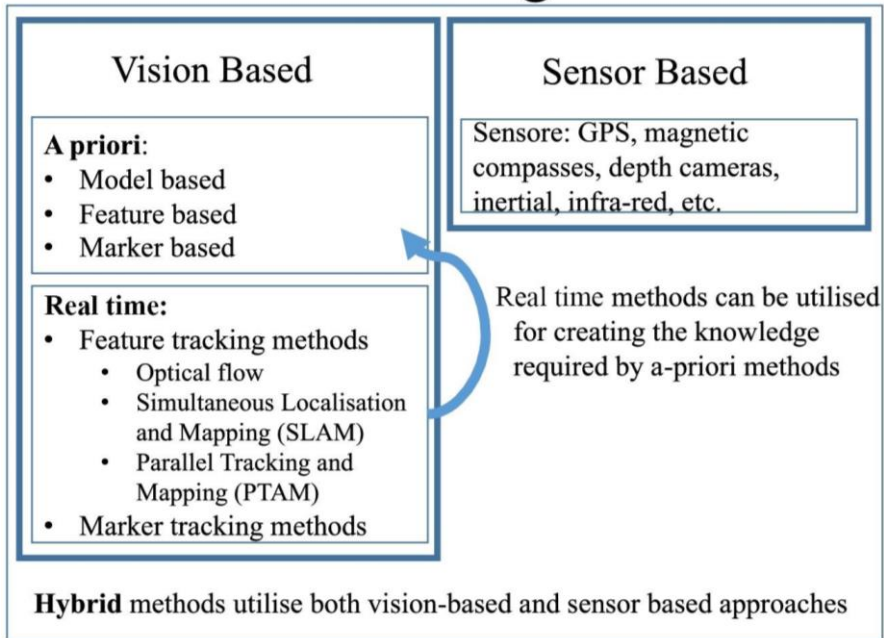


Figura 2.19. Esquema de las técnicas de seguimiento. A partir de: (Palmarini et al., 2018)

Seguimiento basado en sensores

Los sensores tienen la capacidad de realizar un registro del usuario o de la cámara (esto es, del punto de vista) en tiempo real y proporcionar datos de entrada al ordenador en sistemas de Realidad Aumentada. Los sensores pueden utilizarse en dos modalidades diferentes: colocados de forma fija en el entorno (actúan como receptores de una serie de emisiones del objeto móvil que hay que posicionar) y colocados en el propio objeto móvil (son capaces de determinar su posición relativa por sí mismos o en referencia a emisores fijos en el entorno). El seguimiento basado en sensores se utilizaba en los primeros sistemas de Realidad Virtual, pero en la actualidad se utiliza menos que el basado en visión. Sin embargo, algunos sensores sí son utilizados en combinación con las técnicas basadas en imagen para conseguir una mayor precisión con menor costo computacional. Es por ello que se analizan a continuación los tipos de sensores más importantes, tomando como referencia principal el estudio sobre el seguimiento en Realidad Aumentada llevado a cabo en (Rabbi & Ullah, 2013), así como el trabajo (Portalés Ricart, 2008), entre otros.

Ópticos

Los sensores ópticos basan su funcionamiento en la emisión de un haz de luz que es interrumpido o reflejado por el objeto a detectar. En los sistemas de seguimiento basados en sensores ópticos, se utilizan una o más cámaras de vídeo, que pueden ser de luz visible o infrarroja. Con una única cámara sólo es posible un seguimiento 2D mientras que si se colocan dos o más cámaras en diferentes ángulos se consigue un seguimiento 3D con 6DoF. Existen diferentes metodologías para el registro de la posición y la orientación ya que la distancia se puede medir por triangulación, por tiempos o por interferometría. El seguimiento óptico es económico. Además, si el entorno es controlado, proporciona unos resultados precisos y robustos. Sin embargo, estos sensores son sensibles al ruido óptico (fluctuaciones de la potencia óptica del láser), a las condiciones de iluminación y a la oclusión. Además, requieren de cálculos pesados, por lo que el sistema puede ser relativamente lento.

Magnéticos

Los sensores magnéticos efectúan una conmutación electrónica mediante la presencia de un campo magnético externo, próximo y dentro del área sensible. En un sistema de seguimiento magnético, se utilizan numerosas variaciones de campos magnéticos y la posición y orientación de los receptores se miden en relación con la fuente. Se suelen utilizar varios sensores para registrar el movimiento del cuerpo entero. Fueron unos de los sensores de posicionamiento más populares debido a su bajo coste, a su comodidad de manejo y a que proporcionan una precisión modesta pero razonable (aunque inferior a la de los sensores ópticos). A diferencia de los anteriores, no sufren problemas de visibilidad, pero sí se ven alterados por la presencia de dispositivos electrónicos cercanos. Los sensores de seguimiento magnéticos han caído cada vez más en desuso porque sufren en términos de fluctuación, la precisión se degrada con la distancia y son sensibles al ruido electromagnético.

Acústicos

En un sistema de seguimiento acústico, el usuario lleva consigo emisores de ultrasonido y en el entorno se fijan sensores acústicos, normalmente micrófonos, que actúan a modo de receptores. La posición y orientación del usuario se calcula

en base al tiempo que tarda el sonido en llegar a los sensores. Se necesita de al menos tres micrófonos para poder triangular la señal proveniente del emisor. La velocidad del sonido es relativamente baja por lo que los sistemas de seguimiento acústico son bastante lentos en comparación con otros. Para aplicaciones que no requieran excesiva precisión y velocidad, estos sensores pueden ser una alternativa económica a los sensores magnéticos, ya que los rangos son mayores y se evitan interferencias magnéticas, tan frecuentes en los entornos de trabajo. La velocidad del sonido en el aire puede cambiar debido al cambio de temperatura o humedad en el ambiente, lo que puede afectar a la eficiencia del sistema de seguimiento. Además, se debe mantener una línea de visión clara entre el transmisor y el receptor y pueden existir interferencias acústicas y ecos del ultrasonido en superficies duras.

Inerciales

La inercia se define como la propiedad de los cuerpos de mantener su estado de reposo o movimiento si no es por la acción de una fuerza. Los sensores inerciales se basan, pues, en fenómenos físicos para medir la aceleración y la rotación relativas al sistema de referencia terrestre. Se trata de sistemas de seguimiento que suelen estar integrados por giroscopio y acelerómetro. A partir de los datos registrados por estos sensores, se obtienen de manera inmediata rotaciones 3D. Para el cálculo de la posición, los datos deben ser doblemente integrados, asumiendo que su posición y velocidad inicial son conocidas. Sin embargo, el resultado es sensible a la deriva y al sesgo del sensor y los errores en la posición calculada se acumulan con el tiempo. Se trata de sensores livianos, que no necesitan referencia y cuya área de captura es ilimitada. Al ser económicos y estar integrados en la mayoría de dispositivos móviles actuales, son bastante utilizados en sistemas de seguimiento híbridos, a pesar de ofrecer una precisión relativamente baja.

Mecánicos

Los sensores mecánicos son dispositivos que cambian su comportamiento bajo la acción de una magnitud física. Utilizan potenciómetros montados sobre una estructura articulada para medir los ángulos, que dan información de la posición. Los sistemas mecánicos pueden registrar la posición de una parte del cuerpo o,

incluso, del cuerpo entero del usuario. Son muy precisos y poseen latencias muy bajas. No se encuentran con el problema de pérdida de la línea de visión ni padecen interferencias externas. Sin embargo, este tipo de sensores limitan la libertad de movimientos (pues se montan sobre un exoesqueleto y pueden tener cables), suelen ser voluminosos y pesados y pueden resultar más caros que otro tipo de sensores.

Señales

Aunque en la mayoría de clasificaciones sólo se incluyen los sensores vistos hasta ahora, existen otros que también son capaces de realizar un registro de la posición del usuario en tiempo real mediante la recepción de determinadas señales, como son: el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, del inglés *Global Positioning System*) y la Identificación por Radiofrecuencia (RFID, del inglés *Radio Frequency Identification*).

El **GPS** se define como un sistema que permite conocer la posición de un objeto o de una persona gracias a la recepción de señales emitidas por una red de satélites. Esta red está compuesta por 24 satélites que forman diferentes órbitas alrededor de la Tierra y son utilizados por los receptores GPS para posicionar elementos mediante trilateración. Esto significa que, con las posiciones conocidas de un mínimo de 4 satélites y la distancia entre ellos y el punto a posicionar, se puede realizar una localización con una precisión de metros (o de centímetros si se usa un sistema de GPS diferencial). Este tipo de sensores sólo se pueden utilizar en aplicaciones de exterior y, debido a que vienen integrados en cualquier dispositivo móvil actual, son muy utilizados en sistemas de navegación de Realidad Aumentada.

Por su parte, la **RFID** es una forma de comunicación inalámbrica entre un lector y un emisor. Podría compararse a un código de barras, solo que en vez de utilizar marcas de tinta utiliza ondas de radio. Los emisores, etiquetas o *tags* se utilizan para localizar objetos o personas y pueden ser activos o pasivos, dependiendo de si cuentan o no con una fuente de alimentación. La ventaja de las activas frente a las pasivas es que el alcance es el mayor. Por contra, las pasivas son más pequeñas, similares a una pegatina, por lo que son más sencillas de colocar en cualquier tipo de objeto. El funcionamiento de esta tecnología se basa en que el lector envía una señal continua dentro de un radio de alcance concreto y, cuando la etiqueta entra

en contacto con dicha señal, le envía la información que tiene programada al lector para que éste la interprete. No es necesaria una visión directa entre emisor y receptor en este tipo de sistemas. Así pues, estos sensores pueden ser útiles en determinadas aplicaciones de Realidad Aumentada para, por ejemplo, localizar los elementos que han de ser aumentados.

Además del seguimiento conseguido mediante GPS o RFID, existen otros tipos de señales que también pueden ser utilizadas para la localización de personas u objetos. Las dos más destacadas son el **Bluetooth** (sobre todo mediante la utilización de balizas electrónicas o *beacons*) y el **WiFi** (más concretamente el *WiFi Positioning Systems* o WPS). Se trata de dos alternativas al GPS cuando es necesario posicionar un elemento en un espacio interior. Sin embargo, la precisión de este tipo de sensores no es suficiente para la mayoría de sistemas de Realidad Aumentada, por lo que su uso es minoritario.

Aunque son muchos los estudios realizados desde los inicios de la Realidad Aumentada sobre aplicaciones que utilizan el seguimiento basado en sensores, actualmente son pocos los sistemas que se diseñan utilizando exclusivamente este tipo de seguimiento. En (Fang et al., 2017), puede leerse un trabajo reciente que realiza un seguimiento con 6DoF en tiempo real utilizando un sistema multisensor que evita el uso de marcadores (aunque sí utiliza algunas técnicas de seguimiento basado en imagen en tiempo real). Su método de fusión de sensores combina una cámara de profundidad, una cámara monocular de gran angular y sensores inerciales. La cámara de profundidad sólo se utiliza en la fase inicial para proporcionar una estimación de la escala por lo que, a diferencia del SLAM, no implica un consumo computacional continuo. Posteriormente, para abordar el problema de la deriva de la escala en el seguimiento monocular, se utilizan los sensores inerciales. La Figura 2.20 muestra la plataforma experimental desarrollada por los autores (izquierda) y una comparativa de los resultados obtenidos con el seguimiento del sistema multisensor frente a otro basado en visión (derecha).

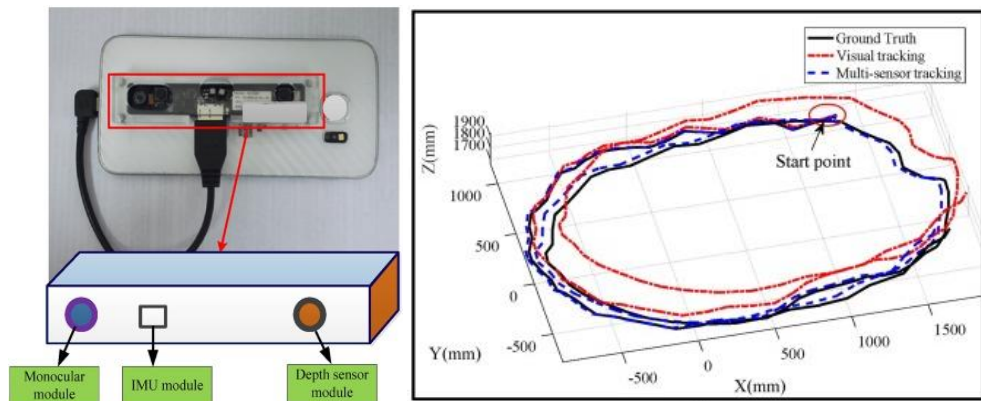


Figura 2.20. Sistema multisensor para el seguimiento en tiempo real en Realidad Aumentada portátil. Fuente: (Fang et al., 2017)

Seguimiento basado en visión o imagen

Los métodos de seguimiento basados en el análisis de imagen utilizan técnicas de visión por computador o de fotogrametría para calcular el punto de vista de una cámara a partir del análisis de las imágenes que captura. Estos métodos requieren mucha más capacidad de procesamiento que los basados en sensores, pero, por contra, no suelen requerir de ningún hardware adicional. En las últimas décadas, han sido éstos los sistemas que más se han investigado, por lo que han experimentado una gran evolución. Además, los métodos de seguimiento basados en visión generalmente se prefieren debido a la amplia difusión de las cámaras RGB en los diferentes equipos utilizados para la Realidad Aumentada. Es por ello que, en la actualidad, son la base de un porcentaje muy alto de aplicaciones de Realidad Aumentada. Como se vio anteriormente, las técnicas de seguimiento basadas en visión se dividen a su vez en dos categorías: métodos a priori y métodos en tiempo real, que se detallan a continuación.

A priori

Tras el análisis de los 30 artículos seleccionados en la revisión (Palmarini et al., 2018), publicados entre 1997 y 2017, los autores concluyeron que el 90% de los trabajos utilizan técnicas de seguimiento basadas en imagen a priori. Este dato no hace más que incidir en la importancia de este tipo de sistemas en el campo de la Realidad Aumentada. Esta técnica se divide a su vez en: basado en marcadores, basado en características y basado en modelo. Esto significa que la información

requerida para ejecutar el seguimiento a priori es, respectivamente: un marcador, un mapa de características o un modelo. Estos datos generalmente son desarrollados por los autores para el propósito de su proyecto y, en ocasiones, se usan sistemas de seguimiento ad hoc para conseguirlos.

El seguimiento basado en **marcadores** consiste en colocar, físicamente y de forma artificial, marcadores fiduciales o de referencia en objetos del mundo físico. Estos marcadores tienen algunas propiedades específicas que facilitan la identificación de su posición en el mundo físico para conseguir un correcto seguimiento en un sistema de Realidad Aumentada. Por tanto, es importante que la configuración de los marcadores se diseñe adecuadamente. La posición y orientación de los marcadores en relación con el objeto físico que están marcando se registra a priori en el sistema de Realidad Aumentada. De esta manera, reconocer el marcador significa reconocer el objeto. El enfoque basado en marcadores, que se considera robusto y preciso, podría no ser así en determinados entornos. Su limitación principal se basa en la necesidad de que los marcadores sean visibles en todo momento; si no es así, el registro puede perderse. Es importante tener en cuenta, además, cómo los reflejos y las condiciones lumínicas en general pueden afectar al reconocimiento. En (Cejka et al., 2018), analizan este problema en un entorno particularmente desafiante: los fondos submarinos. Los autores describen un método de mejora de las imágenes subacuáticas para conseguir una mejor detección de los marcadores de Realidad Aumentada. Como muestra la Figura 2.21, la turbidez del entorno o los desequilibrios de colores pueden afectar al reconocimiento y seguimiento de los marcadores.



Figura 2.21. Marcadores para sistemas de Realidad Aumentada en entornos desfavorables. Fuente: (Cejka et al., 2018)

A diferencia de los marcadores, que se colocan de forma artificial en la escena, el seguimiento basado en **características** es una técnica de seguimiento basada en

visión que detecta y rastrea las características que se encuentran de forma natural en la imagen capturada por la cámara. Éstas pueden ser puntos, bordes, texturas, etc. Por tanto, no utiliza necesariamente marcadores fiduciales diseñados específicamente (Ćuković et al., 2015). Sin embargo, una vez identificadas las características, el modo de proceder es el mismo que el de los sistemas basados en marcadores: por medio de algoritmos de minimización del error, se calcula la posición y orientación de la cámara. Para ello se siguen tres fases: generar una lista de puntos conocidos con sus coordenadas en 3D, extraer las características de la imagen 2D y calcular la posición de la cámara en función de ambos conjuntos de puntos (Gimeno Sancho, 2015). En (García-Pereira et al., 2019), se presenta la aplicación ARFAT, un ejemplo de cómo la Realidad Aumentada puede ayudar en la enseñanza de procedimientos de salud y seguridad en el sector de la construcción. Esta aplicación hace un seguimiento basado en características, ya que utiliza la portada del libro que los usuarios tendrán de forma natural a su alcance cuando vayan a hacer uso de la Realidad Aumentada, como muestra la Figura 2.22.



Figura 2.22. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en características.
Fuente: (García-Pereira et al., 2019)

En los últimos años, se ha venido investigando un tercer enfoque de seguimiento basado en imagen a priori: el seguimiento basado en **modelos**, que ya lo incluyen algunos productos comerciales como Vuforia, del que se hablará más adelante. Estos sistemas utilizan modelos 3D que describen el mundo físico para poder

realizar la localización y el seguimiento. Por tanto, el análisis no se basa en la coincidencia de puntos sino en estructuras más complejas, como un modelo CAD (diseño asistido por ordenador, del inglés *Computer-Aided Design*). Este tipo de sistemas no está tan extendido como los anteriores por su mayor complejidad, pero poco a poco van apareciendo más trabajos que muestran su gran potencial, especialmente para exteriores. En muchas aplicaciones de Realidad Aumentada, tener un modelo 3D del entorno y los objetos circundantes es beneficioso para proporcionar una experiencia más realista con oclusiones e interacciones plausibles entre el contenido virtual y el entorno físico. Uno de los primeros trabajos que utilizó el seguimiento basado en modelos fue (Comport et al., 2003), donde se calculaba la posición de la cámara a partir de las líneas, círculos, cilindros y esferas de un modelo. Los resultados mostraron un método robusto para la oclusión, los cambios de iluminación y el seguimiento erróneo. La Figura 2.23 muestra un ejemplo de uso del sistema, en el que la alineación visual de los elementos virtuales en el entorno físico, su seguimiento y la oclusión de los objetos físicos se lleva a cabo con mucha precisión.



Figura 2.23. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en modelos. Fuente: (Comport et al., 2003)

En tiempo real

El seguimiento basado en visión con métodos en tiempo real pretende ser una alternativa a los enfoques tradicionales de seguimiento en Realidad Aumentada ya que evita la necesidad de disponer de información previa sobre el entorno físico. Uno de los mayores representantes de este método de seguimiento es la Localización y el Mapeo Simultáneos o **SLAM** (del inglés *Simultaneous Localization and Mapping*). SLAM es una técnica computacional cuyo objetivo es construir y actualizar un mapa de un espacio desconocido a la vez que se estima la ubicación y trayectoria de un sistema que se mueve a través de dicho entorno.

Cada vez son más los sistemas de Realidad Aumentada que utilizan SLAM ya que han demostrado ser capaces de construir un modelo 3D de un entorno desconocido con una única cámara mientras se rastrea la posición de la misma. Sin embargo, estos sistemas presentan una problemática cuando se aplican a sistemas de Realidad Aumentada: en un entorno desconocido, las aplicaciones de Realidad Aumentada no tienen la información necesaria sobre qué elementos virtuales se deben superponer en cada lugar del mundo físico. Es decir, no se puede establecer un marco de referencia y, por tanto, hay que considerar cuidadosamente el uso de SLAM en Realidad Aumentada, tal y como se analiza en (Reitmayr et al., 2010). A pesar de esta problemática, se pueden encontrar diversos ejemplos que demuestran que el uso de SLAM en sistemas de Realidad Aumentada es posible. Un ejemplo de ello es (Reitmayr et al., 2007), en el que se desarrolla una aplicación que permite determinar con precisión la ubicación de nuevas anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos y en tiempo de ejecución utilizando técnicas de SLAM. El usuario tiene que seleccionar una característica destacada en el entorno una única vez, sin necesidad de especificar completamente su ubicación. El sistema es quien estima automáticamente la posición exacta de la característica y de la anotación asociada a partir de los fotogramas de vídeo posteriores. La Figura 2.24 muestra un ejemplo de cómo el usuario selecciona una zona de la máquina, coloca una nota y el sistema se encarga de estimar la ubicación 3D de la anotación y registrarla correctamente en el entorno cuando la cámara varía su posición.

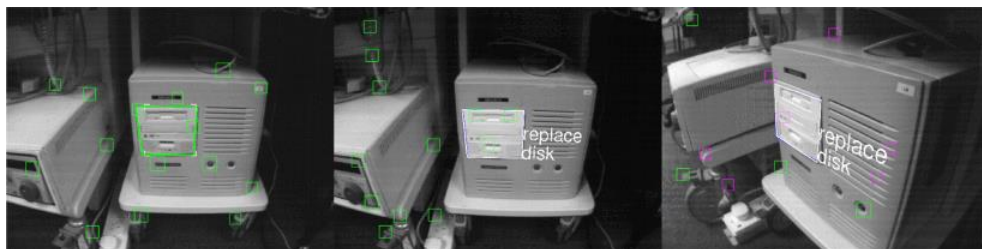


Figura 2.24. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en SLAM. Fuente: (Reitmayr et al., 2007)

Una variante de la técnica SLAM es el Seguimiento y Mapeo Paralelos o **PTAM** (del inglés *Parallel Tracking and Mapping*). El objetivo de esta técnica es el mismo que el visto anteriormente: rastrear una cámara en una escena desconocida sin ningún tipo de marca de inicialización a la vez que se construye un mapa del espacio. En el campo de la Realidad Aumentada, una vez se ha construido un mapa

rudimentario, se utiliza para insertar objetos virtuales en la escena de forma que queden registrados con precisión en los objetos físicos del entorno. PTAM fue descrito en (Klein & Murray, 2007) como una alternativa a los enfoques SLAM presentados hasta el momento, utilizando un mapa mucho más denso pero con características de menor calidad. Los autores proponen dividir el seguimiento y el mapeo en dos tareas que se ejecutan en subprocesos paralelos en una computadora de doble núcleo. De esta forma, un subproceso se encarga de la tarea de rastrear de manera robusta el movimiento de la cámara mientras que el otro produce un mapa en 3D de las características de los fotogramas de vídeo previamente observados. Esto permite el uso de técnicas de optimización de tareas que tienen un coste computacional elevado y que, por tanto, no se suelen poder llevar a cabo en tiempo real.

Otro método de seguimiento en tiempo real es el *optical flow* o **flujo óptico**. Éste se define como el movimiento aparente de píxeles individuales en el plano de la imagen, que puede atribuirse al verdadero movimiento físico de los objetos en la escena. Esta técnica proporciona una descripción concisa tanto de las regiones de la imagen en movimiento como de la velocidad del movimiento. Sin embargo, la mayoría de los métodos que calculan el flujo óptico suponen que el color y la intensidad de un píxel es invariable bajo el desplazamiento de un fotograma de vídeo al siguiente. En la práctica, el cálculo del flujo óptico es susceptible a los cambios de ruido e iluminación, lo que puede causar errores de seguimiento. Además, los métodos de flujo óptico se basan en cálculos informáticos del movimiento de las intensidades de la imagen a lo largo del tiempo en un vídeo por lo que son técnicas computacionalmente complejas que requieren recursos sustanciales (J. Lee & Bovik, 2009; Turaga et al., 2010). Estos inconvenientes hacen que, en la práctica, sean pocas las aplicaciones de Realidad Aumentada que utilizan el flujo óptico como método único de seguimiento. En (Mooser et al., 2007), por ejemplo, se combina el flujo óptico con la segmentación de imágenes basada en el método de *graph cuts* o cortes de grafo para elaborar un algoritmo de seguimiento en tiempo real sin necesidad de ninguna información previa sobre el entorno. El trabajo expone cómo esta tecnología puede aplicarse a sistemas de Realidad Aumentada, como muestra la Figura 2.25, donde un manómetro es anotado en tiempo real y, a medida que la cámara se mueve, el sistema hace un seguimiento preciso y muestra la información virtual en su posición correcta.



Figura 2.25. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento basado en flujo óptico.
Fuente: (Mooser et al., 2007)

Sistemas de seguimiento híbridos

Como se ha visto en las secciones anteriores, cada tipo de seguimiento tiene sus propias limitaciones: los métodos de seguimiento basados en visión pueden no ser útiles en entornos sin texturas mientras que los métodos de seguimiento basados en sensores pueden no proporcionar un registro preciso. Es por ello que, en determinadas aplicaciones de Realidad Aumentada, no es posible encontrar una solución de seguimiento robusta si no se combinan diferentes técnicas, esto es: es necesario utilizar métodos de seguimiento híbridos. Las técnicas de seguimiento híbrido son una alternativa prometedora ya que pueden combinar múltiples fuentes de datos para mejorar la calidad del seguimiento. Por ejemplo: un sistema de Realidad Aumentada puede aprovechar el GPS para mejorar la precisión del seguimiento basado en modelos o características.

El seguimiento híbrido es particularmente útil en dispositivos móviles ya que disponen de varios sensores, como acelerómetro y giroscopio, e integran una cámara RGB. En este caso, los sensores proporcionan una referencia de los movimientos rápidos de la cámara mientras que el análisis de la imagen capturada por ésta permite calcular la posición con una mayor precisión. En (Yang et al., 2018), por ejemplo, se utilizan los sensores inerciales presentes en dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes o pequeños drones, para acelerar el proceso de seguimiento basado en características y mejorar su robustez. Además, el resultado de este seguimiento se revisa periódicamente utilizando seguimiento basado en modelos para reducir los errores acumulados. La Figura 2.26 muestra su sistema en funcionamiento en escenas potencialmente difíciles, como son: imágenes borrosas (izquierda), grandes cambios en el punto de vista (centro) y desorden en el fondo y oclusión (derecha).



Figura 2.26. Sistema de Realidad Aumentada con seguimiento híbrido. Fuente: (Yang et al., 2018)

2.3. Software

Para poder desarrollar un sistema de Realidad Aumentada teniendo en cuenta todas las características descritas en la sección anterior, es necesario disponer del software adecuado. Por un lado, se necesitan **bibliotecas** o librerías informáticas que faciliten la implementación de las tareas de registro, interacción en tiempo real y combinación de lo real y lo virtual. De hecho, más que bibliotecas, se precisa la utilización de kits de desarrollo de software o **SDK** (del inglés *Software Development Kit*). Por otro lado, dada la complejidad de este tipo de aplicaciones, es necesario el uso de entornos de desarrollo integrado o **IDE** (del inglés *Integrated Development Environment*) con herramientas desarrolladas específicamente para la creación de Realidad Aumentada. A continuación, se reseñan los SDK y los IDE más destacados actualmente.

2.3.1. Bibliotecas y SDK

Desde que en 1999 se lanzó la primera versión de ARToolkit, han sido muchas las librerías diseñadas para la implementación de aplicaciones de Realidad Aumentada, como ARTag, StudierStube o BazAR entre otras. Sin embargo, con el paso de los años y la aparición y supremacía de grandes empresas de tecnología informática, como Google y Apple, todo ha ido convergiendo hacia la hegemonía de los SDK ARCore y ARKit, aunque también Vuforia Engine sigue teniendo mucha aceptación. Por su parte, Microsoft, dentro de su servicio de computación en la nube Azure, ofrece diversas herramientas encaminadas al desarrollo de sistemas de Realidad Mixta, como son: Azure Spatial Anchors, Azure Object Anchors y Azure Remote Rendering. Éstas adquieren su mayor potencial combinadas con el HMD HoloLens 2 y con el periférico Azure Kinect DK. A continuación, se describen las bibliotecas y SDK más extendidas.

ARToolKit

La aparición de la librería ARToolKit (*Artoolkit*, s. f.) en 1999 revolucionó el desarrollo de aplicaciones de Realidad Aumentada. En poco tiempo se convirtió en la biblioteca más utilizada por los investigadores del sector y permitió avanzar a esta tecnología en sus diferentes campos de aplicación. ARToolKit fue desarrollada originalmente por Hirokazu Kato y lanzada por el Human Interface Technology Laboratory (HIT Lab) de la Universidad de Washington. En 2001, se incorporó ARToolWorks y se liberó la versión 1.0 de código abierto, ya con Mark Billinghurst también como creador. La biblioteca continuó desarrollándose como código abierto y en 2015 fue adquirida por DAQRI. En 2017, la actividad de la comunidad de ARToolKit había descendido considerablemente y Ben Vaughan y Phil Lamb, ex altos cargos de ARToolworks, crearon ARToolKitX (*artoolkitX*, s. f.) con el objetivo de garantizar que tanto el software como la comunidad se siguieran desarrollando y manteniendo. En (Kato & Billinghurst, 1999), se encuentra el trabajo considerado como la presentación de la biblioteca, aunque en ningún momento aparezca el nombre de ARToolKit.

Como puede leerse en el sitio web oficial, ARToolKit es una biblioteca de software para construir aplicaciones de Realidad Aumentada, esto es: aplicaciones que implican la superposición de imágenes virtuales en el mundo físico. ARToolKit utiliza algoritmos de visión por computador para resolver el problema del seguimiento del punto de vista del usuario. Sus bibliotecas de seguimiento de vídeo calculan la posición y orientación reales de la cámara en relación con los marcadores físicos en tiempo real. Estos marcadores fiduciales consisten en cuadrados blancos con un marco negro grueso y con símbolos negros en su interior, como muestra la Figura 2.27. Este diseño de marcadores fue pensado para simplificar el proceso de reconocimiento dada la limitación de procesamiento de los ordenadores de aquella época, pero aún hoy se siguen utilizando en muchas aplicaciones de Realidad Aumentada. El proceso de seguimiento de ARToolKit, ilustrado en la Figura 2.27, funciona de la siguiente manera:

1. La cámara de vídeo captura las imágenes del mundo físico y las envía al ordenador.
2. El software del ordenador busca en cada fotograma cualquier forma cuadrada.

3. Si se encuentra un cuadrado, el software utiliza algoritmos matemáticos para calcular la posición de la cámara con respecto al cuadrado negro.
4. Una vez que se conoce la posición de la cámara, se dibuja la información virtual desde esa misma posición.
5. La información virtual se dibuja en la parte superior del vídeo del mundo físico, por lo que parece encajada en el marcador y se mueve a la vez que éste en tiempo real.
6. El resultado final se muestra en la pantalla del dispositivo del usuario de forma que éste ve la información virtual superpuesta en el mundo físico.

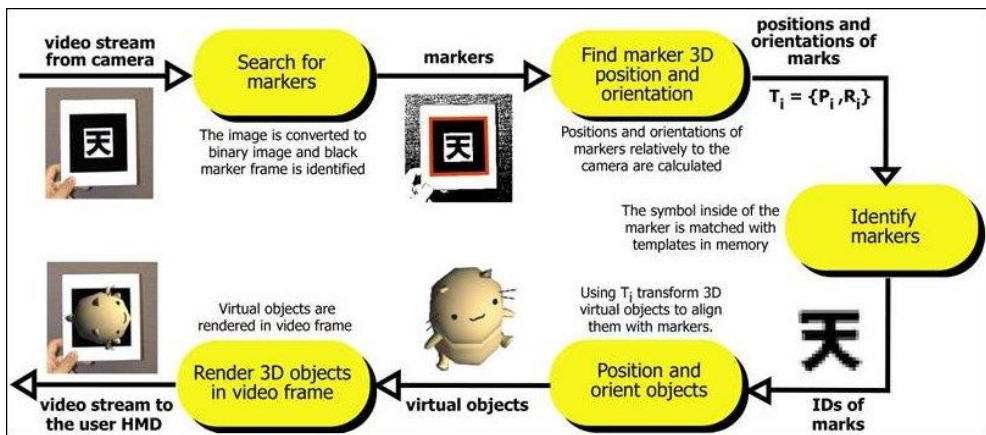


Figura 2.27. Funcionamiento del proceso de seguimiento de ARToolkit. Fuente: (Artoolkit, s. f.)

ARToolkit sigue siendo muy utilizado hoy en día, entre otras cosas por ser de código abierto. Muchos desarrolladores lo usan como base para hacer sus propios SDK y lo extienden. Sin embargo, existen una serie de limitaciones derivadas del uso de seguimiento basado en marcadores, como son: la información virtual sólo aparece cuando los marcadores están en el campo de visión de la cámara; la distancia entre la cámara y el marcador es limitada; la complejidad de los patrones de las marcas influye en el reconocimiento (a mayor simplicidad, mejor reconocimiento); también la orientación relativa entre cámara y marcador repercute (a mayor grado de inclinación, menos fiable es el reconocimiento); y las condiciones de iluminación han de ser las adecuadas para evitar reflejos y puntos brillantes.

Vuforia Engine

Vuforia fue lanzado en 2010 de la mano de Qualcomm como un SDK y en 2015 fue adquirido por PTC. Año tras año se ha ido desarrollando hasta convertirse en una plataforma de desarrollo de Realidad Aumentada. Por tanto, ya no es sólo un SDK (aunque un gran número de usuarios lo usa únicamente como tal), sino que ofrece otras herramientas, tales como un IDE propio o una herramienta para la colaboración in situ y la asistencia remota. De hecho, su nombre actual es Vuforia Engine (*Vuforia Enterprise Augmented Reality Software*, s. f.) y enfoca sus esfuerzos comerciales hacia el sector industrial. En muchos sitios web se sigue anunciando como “la plataforma más utilizada para el desarrollo de Realidad Aumentada”.

Si bien comenzó permitiendo únicamente un seguimiento basado en marcadores fiduciales o características naturales, las últimas versiones permiten reconocer múltiples modelos desde múltiples vistas y hacer seguimiento en tiempo real mediante técnicas SLAM. Da soporte para desarrollos en dispositivos móviles (teléfonos y tabletas) y gafas de Realidad Aumentada para las plataformas Android, iOS y UWP. Además, es compatible con Unity y proporciona API (Interfaz de Programación de Aplicaciones, del inglés *Application Programming Interface*) para los lenguajes C#, C++ y Java.

Vuforia Engine gestiona de forma transparente para el usuario la cámara del dispositivo y descarga automáticamente los parámetros intrínsecos en función de la imagen de reconocimiento. Permite la interacción directa con los objetos del mundo físico y la interacción mediante botones virtuales e incorpora un algoritmo para detectar la mano del usuario. Este SDK dispone de un servicio de reconocimiento en la nube que permite a los desarrolladores alojar y administrar en línea las imágenes (y sus metadatos) a reconocer durante el uso de la aplicación de Realidad Aumentada. Su uso depende del tipo de licencia que haya adquirido el cliente ya que el número de imágenes de reconocimiento y de consultas mensuales que se pueden hacer está limitado. Este servicio es muy útil para aplicaciones que usan muchas imágenes de reconocimiento que necesitan actualizarse con frecuencia. La alternativa es almacenar la información en la memoria del dispositivo asociada a la aplicación de proyecto, lo que supondría no sólo un gasto de memoria innecesario sino también tener que sacar una nueva actualización de la aplicación cada vez que se tuviera que modificar o añadir una imagen de reconocimiento.

Así pues, se trata de un conjunto de herramientas muy versátil que permite el desarrollo de aplicaciones de Realidad Aumentada con diferentes grados de complejidad. Sin embargo, no es una herramienta de código abierto como ARToolKit y sólo algunas de sus funcionalidades pueden ser utilizadas de forma gratuita. Su principal ventaja frente a ARKit y ARCore es que tiene una lista más amplia de dispositivos compatibles y admite el desarrollo de aplicaciones para dispositivos Windows 10 basados en Intel, incluidos Microsoft Surface y HoloLens.

ARKit

ARKit (*ARKit Overview - Augmented Reality - Apple Developer*, s. f.) fue lanzado en junio de 2017 dentro de la undécima versión principal del sistema operativo móvil iOS desarrollado por Apple (iOS 11). Si bien en algunos sitios web se presenta como una API y en otros como una SDK, en realidad podría decirse que es un entorno de trabajo que permite a los desarrolladores crear aplicaciones de Realidad Aumentada para iPhone y iPad aprovechando la cámara, la CPU, la GPU y los sensores de movimiento del dispositivo. Se puede programar utilizando los lenguajes Swift y Objective-C y su uso es gratuito. En cada nueva versión, incorporan novedades en Realidad Aumentada que permite aprovechar al máximo el hardware de los dispositivos iPhone y iPad más modernos.

ARKit se basa en tres procesos fundamentales: *world tracking*, comprensión de la escena (que incluye tres fases: detección del plano, prueba de impacto o *hit-testing* y estimación de luz) y renderizado. Para crear una correspondencia entre los elementos virtuales y el mundo físico, ARKit utiliza una técnica llamada odometría visual inercial. La odometría visual es un proceso por el cual se puede determinar la posición y orientación de un sistema mediante el análisis de las imágenes de la cámara o cámaras de las que dispone. En el caso que nos ocupa, este proceso combina la información del hardware de detección de movimiento del dispositivo iOS con el análisis de visión por computadora de la escena capturada por la cámara del dispositivo. Así, ARKit reconoce las características más notables en la imagen de la escena, rastrea las diferencias en las posiciones de esas características con los fotogramas del vídeo y compara esa información con los datos de detección de movimiento. También utiliza el método de proyección de rayos o *ray-casting* para encontrar superficies del mundo físico que se

correspondan a un punto en la imagen de la cámara y colocar e interactuar con el contenido virtual en la escena.

Otras características destacadas de ARKit son: detección de hasta 100 imágenes a la vez, detección robusta de objetos 3D, oclusión de personas, captura del movimiento del cuerpo humano en tiempo real, seguimiento de hasta tres caras a la vez, sesiones colaborativas, uso simultáneo del seguimiento facial con la cámara frontal y del seguimiento de superficie con la cámara trasera (para, por ejemplo, interactuar con el contenido aumentado utilizando los gestos de la cara), etc.

A partir de la versión 3.5, ARKit utiliza el nuevo escáner LiDAR y el sistema de detección de profundidad en iPad Pro para hacer que las experiencias de Realidad Aumentada sean más realistas. Un lídar (acrónimo del inglés LIDAR, *Light Detection and Ranging*) es un dispositivo que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie. Para ello utiliza un haz láser pulsado y mide el tiempo entre la emisión del láser y la detección de la señal reflejada. Esto permite obtener de forma rápida una nube de puntos del entorno, lo cual es muy útil en el seguimiento de Realidad Aumentada. Además, la nueva API Scene Geometry permite capturar una representación 3D del mundo en tiempo real y crear un mapa topológico del espacio con etiquetas que identifican pisos, paredes, techos, ventanas, puertas y asientos. Esto permite la oclusión de objetos y la física del mundo real para objetos virtuales. Además, permite una colocación instantánea de los objetos virtuales sobre el mundo físico sin escanear gracias a la rápida detección del plano que hace el escáner LiDAR.

ARCore

En 2017, poco después del anuncio de ARKit, fue presentada la plataforma ARCore (ARCore, s. f.) desarrollada por Google para crear experiencias de Realidad Aumentada. Aunque generalmente se asocia esta SDK con el sistema operativo Android, lo cierto es que con ella también se pueden crear aplicaciones para iOS. De hecho, lo primero que te sugiere su web para desarrolladores es que elijas tu entorno de desarrollo: Android, iOS, Unity o Unreal Engine. Sus principales lenguajes de programación son Java y Kotlin y su uso es gratuito.

Tal y como explican en su portal web, ARCore permite que, mediante el uso de diferentes API, un dispositivo móvil compatible detecte el entorno, comprenda el

mundo que le rodea e interactúe con la información. Para integrar el contenido virtual con el mundo físico tal y como se ve a través de la cámara del teléfono, ARCore utiliza tres capacidades clave: el seguimiento de movimiento o *motion tracking*, que permite que el teléfono entienda y rastree su posición en relación con el mundo; la comprensión ambiental, que permite detectar el tamaño y la ubicación de todo tipo de superficies; y la estimación de luz, que permite estimar las condiciones actuales de iluminación del entorno.

De forma similar a como trabaja ARKit, a medida que el teléfono se mueve, ARCore utiliza un proceso llamado odometría y mapeos concurrentes para comprender dónde está el teléfono en relación con el mundo que lo rodea. ARCore detecta características visualmente distintas en las imágenes capturadas por la cámara y las utiliza para calcular sus cambios de ubicación. La información visual se combina con mediciones inerciales del dispositivo para estimar la posición y orientación de la cámara en relación con el mundo a lo largo del tiempo. De esta forma, los desarrolladores pueden alinear la cámara virtual con la real y renderizar el contenido virtual desde la perspectiva correcta. Esta comprensión de ARCore del mundo físico permite colocar objetos, anotaciones u otra información virtual de manera que se integre perfectamente con el mundo físico. Aunque el usuario se mueva o salga de la habitación, podrá ver esa información desde cualquier ángulo y seguirá en su sitio cuando regrese.

Las últimas actualizaciones principales de ARCore trajeron algunas nuevas funcionalidades destacadas, como son: reconocer y aumentar caras e imágenes, modo ambiental HDR (utiliza el aprendizaje automático para analizar la imagen de la cámara y sintetizar la iluminación ambiental para representar un objeto virtual), *Cloud Anchors* (permite crear experiencias de Realidad Aumentada multijugador o colaborativas de forma que los usuarios de Android e iOS pueden ver e interactuar con objetos virtuales simultáneamente desde diferentes posiciones en un espacio físico compartido), *Sceneform Animations* (que permite importar modelos con animación adjuntando nodos a su esqueleto para controlar sus movimientos), etc.

2.3.2. IDE

Diversos entornos de desarrollo han ido apareciendo y desapareciendo hasta encontrarnos en la actualidad con Unity y Unreal Engine como los mayores exponentes del sector. Existen plataformas más recientes, como Amazon Sumerian o Reality Composer, u otras de menor relevancia como ZapWorks, HP Reveal o Wikitude, que ofrecen a los usuarios kits completos de herramientas para el desarrollo de aplicaciones de Realidad Aumentada en diferentes plataformas. A continuación, se detallan aquellas herramientas con mayores posibilidades y dirigidas a desarrolladores expertos.

Unreal Engine

Unreal Engine (*Unreal Engine*, s. f.) es un motor de videojuego creado por la compañía Epic Games en 1998. Aunque inicialmente se desarrolló principalmente para los *shooters* (videojuegos de disparos) en primera persona, rápidamente se fue utilizando para otro tipo de videojuegos, películas o aplicaciones, incluidas las de Realidad Virtual y Realidad Aumentada. Actualmente se definen como una herramienta de creación 3D en tiempo real. Su código está escrito en C++ y desde 2015 está disponible de forma gratuita. Actualmente se encuentra en la versión 4 y permite el desarrollo para múltiples plataformas, como Microsoft Windows, macOS, Linux, iOS, Android, PlayStation 4, Nintendo Switch, HTC Vive, Oculus Rift o Microsoft HoloLens entre otras.

Unreal Engine dispone de un marco de trabajo específico de Realidad Aumentada que permite el desarrollo de aplicaciones para dispositivos de mano con ARKit o ARCore y para las gafas de Realidad Mixta Magic Leap One y Microsoft HoloLens. Unreal Engine AR permite a los desarrolladores la posibilidad de implementar sus aplicaciones de forma transparente: independientemente de si la plataforma destino es iOS, Android o ambas, su código será el mismo. Esto incluye las funcionalidades básicas que ambos comparten, como seguimiento, alineación, estimación de luz, fijación, estado de sesión o resultados de seguimiento. Sin embargo, como se vio en el apartado anterior, existen algunas características que son exclusivas de ARKit o de ARCore, como la oclusión de personas para el primero y el aumento de caras para el segundo, que no podrán utilizarse si se desea implementar aplicaciones compatibles con los dos sistemas.

Unity

Unity (*Unity Real-Time Development Platform*, s. f.) es también un motor de videojuegos multiplataforma. Fue creado por Unity Technologies en 2005 exclusivamente para macOS. Obtuvo un éxito notable, lo que le hizo continuar con el desarrollo tanto del motor como de nuevas herramientas. Al igual que Unreal Engine, actualmente se define como una plataforma de desarrollo 3D en tiempo real. La última versión estable es Unity 2019 (a partir de Unity 5, lanzada en 2015, cambió su nomenclatura) y está disponible para Microsoft Windows, macOS y Linux. Admite código en C#, JavaScript y ActionScript y ofrece tanto una licencia gratuita como varias de pago. Tiene soporte de compilación para un gran número de plataformas, como Windows, OS X, GNU/Linux, WebGL, Android, iOS, Windows Phone, Android TV, PlayStation, Xbox, Oculus Rift o HTC Vive, entre otras.

Unity ofrece potentes herramientas para crear experiencias de Realidad Aumentada. Entre las más significativas está AR Foundation, un marco de trabajo que permite desarrollar una aplicación una única vez para luego implantarla en diferentes dispositivos de Realidad Aumentada, tanto de mano (con ARKit o ARCore) como de cabeza (Magic Leap y HoloLens). Incluye las funciones esenciales de cada plataforma y otras específicas de Unity, como el renderizado fotorrealista, física u optimización de dispositivos. La Figura 2.28 muestra las características más significativas ofrecidas para cada plataforma. Unity ofrece también una extensión llamada MARS que permite producir aplicaciones de Realidad Mixta y Aumentada que interactúan de forma inteligente con cualquier entorno del mundo físico prácticamente sin necesidad de códigos personalizados. Como explican en su web, esto significa que se pueden crear aplicaciones de Realidad Aumentada responsivas al espacio físico, que actúan según el contexto y que funcionan en cualquier lugar y con cualquier tipo de dato. Otras dos capacidades reseñables de este IDE es que permite integrar Unity como una biblioteca para insertar las funcionalidades de Realidad Aumentada en una aplicación que ya está creada y que dispone del XR Interaction Toolkit para agregar interactividad a las aplicaciones de Realidad Aumentada de forma sencilla.

Unity's AR Foundation Supported Features



Functionality	ARKit	ARCore	Magic Leap	HoloLens
Pass-through video	●	●		
Device tracking	●	●	●	●
Raycast	●	●	●	●
Plane tracking	●	●	●	●
Reference points	●	●	●	●
Point cloud detection	●	●	●	
Gestures			●	●
Face tracking	●	●		
2D image tracking	●	●	●	
3D object tracking	●			
Environment probes	●	●	●	
Meshing			●	●
2D & 3D body tracking	●			
Human segmentation and occlusion	●			
Collaborative participants	●			

Figura 2.28. Características más significativas ofrecidas por Unity para diferentes plataformas de Realidad Aumentada. Fuente: (*Unity Real-Time Development Platform*, s. f.)

2.4. Anotaciones de Realidad Aumentada

Una de las grandes ventajas de la Realidad Aumentada es que tiene la capacidad de contextualizar y localizar la información virtual. Es por ello que las anotaciones representan la mayoría del contenido virtual en Realidad Aumentada, pues son una forma poderosa de ofrecer a los usuarios más información sobre el mundo que los rodea (Wither et al., 2009). En esta sección, se hace un recorrido histórico que muestra la evolución de las anotaciones y se recopila un número significativo de publicaciones científicas que ejemplifican la versatilidad de estos elementos virtuales, los retos a superar y la escasa teorización que hay en este campo.

2.4.1. Del papel a la Realidad Aumentada

La anotación es un método de interacción esencial en la vida diaria. Tradicionalmente, las personas hemos utilizado las anotaciones manuscritas sobre papel como herramienta para resumir y destacar elementos importantes de textos escritos (mediante palabras subrayadas o resaltadas) o para añadir recordatorios, traducciones, explicaciones o mensajes para otras personas en documentos compartidos (mediante notas al margen, por ejemplo). Pero no sólo se anota el texto o la información en papel. En general, cualquier objeto físico de nuestro entorno puede ser anotado (Hansen, 2006). Por ejemplo: podemos colocar un cartel sobre un banco para advertir de que está recién pintado o pegar un pósit junto a un interruptor para explicar su funcionalidad.

Cuando los textos se digitalizaron, se comenzaron a desarrollar herramientas que permitían seguir realizando anotaciones en (y mediante) los nuevos medios informáticos. Posteriormente, se explotaron los sistemas hipermedia y las ventajas de la web para enriquecer los procesos de toma de notas. Un ejemplo de ello es el trabajo (Kahan & Koivunen, 2001), donde se presenta Annotea, un sistema de anotaciones compartidas basado en web. Estas anotaciones se visualizan como notas hechas por un autor sobre un documento web, pero se almacenan en servidores externos en forma de metadatos e independientes del documento. La Figura 2.29 muestra la arquitectura básica del sistema.

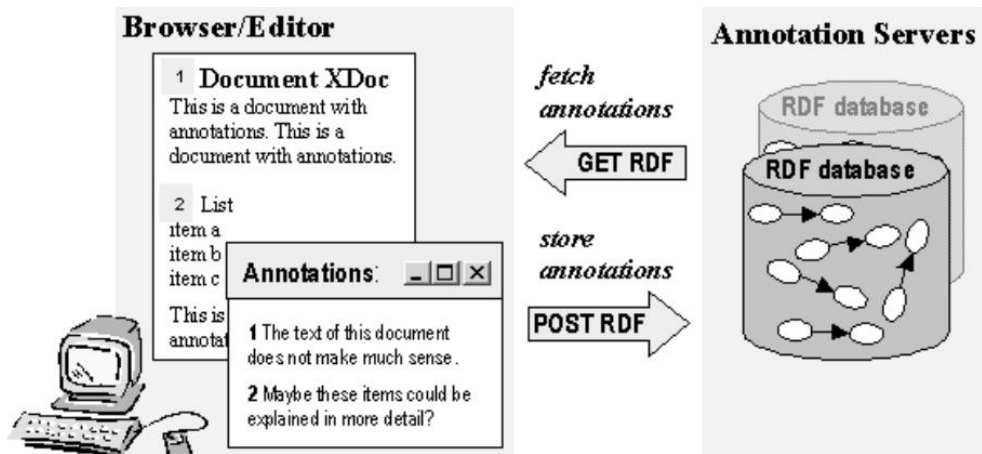


Figura 2.29. Arquitectura del sistema de anotaciones Annotea. Fuente: (Kahan & Koivunen, 2001)

Con la llegada de los dispositivos informáticos móviles y ubicuos, la anotación digital se ha extendido aún más, pues permiten anotar objetos del mundo físico. Los usuarios son ya capaces de obtener y crear información relacionada con su contexto, por ejemplo: conocer su ubicación en el mundo físico, introducir datos o extraer información adicional de los objetos que le rodean, recibir ayuda en la realización de una determinada tarea, etc. Toda esta información es virtual y, por tanto, no se coloca directamente en los objetos físicos mediante notas de papel como se ejemplificó anteriormente. En su lugar, se almacena en servidores y se utilizan diferentes métodos para identificar los objetos físicos a los que hace referencia cada anotación (GPS, posicionamiento WLAN, Bluetooth, RFID, códigos de barras, etc.) (Hansen, 2006). Para visualizarlas, los usuarios deben ir provistos de PDA, teléfonos inteligentes o, incluso, ordenadores portátiles. Un ejemplo de estos primeros sistemas de anotaciones ubicuos puede verse en (Abowd et al., 1997). En él se presenta Cyberguide, una guía turística para dispositivos móviles que utiliza la ubicación actual del usuario y su historial de ubicaciones pasadas para ofrecerle información relacionada con su entorno. Realizaron prototipos tanto para interior como para exterior y para diferentes plataformas portátiles. La Figura 2.30 muestra una Cyberguide para exteriores con su correspondiente unidad GPS.

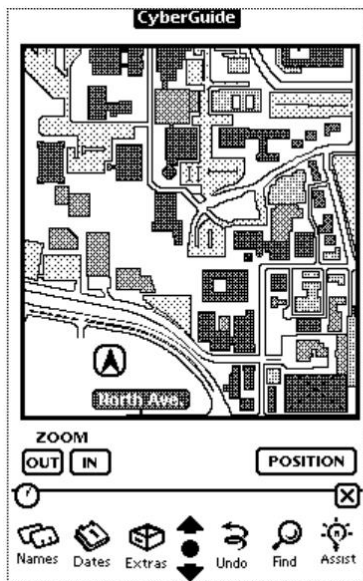


Figura 2.30. Cyberguide, sistema ubicuo de anotaciones. Fuente: (Abowd et al., 1997)

Un paso más allá en la virtualización de las anotaciones se ha conseguido gracias al desarrollo de la Realidad Aumentada. De hecho, las anotaciones son un componente intrínseco de esta tecnología. Como se ha descrito hasta ahora, los seres humanos dejan notas, signos, ilustraciones, etc. en el mundo físico para compartir información. Paralelamente, colocan textos, imágenes, audios, etc. en formato digital para comunicarse a través del mundo virtual. Gracias a la Realidad Aumentada, es posible desdibujar la frontera entre el mundo físico y el mundo virtual de forma que se puede presentar la información virtual en la misma ubicación que el elemento del mundo físico con el que se relaciona (Tseng et al., 2019).

Aunque el término Realidad Aumentada no se acuñó hasta 1992, como se explica al principio de este capítulo, en 1986 Furness diseñó el sistema Super Cockpit en una base militar aérea estadounidense (Furness, 1986). Esta propuesta puede considerarse como una de las primeras aplicaciones prácticas de las tecnologías de Realidad Aumentada para su uso como mecanismo de anotación. Super Cockpit consistía en un HMD a través del cual los pilotos de un avión podían ver su entorno aumentado con información virtual. Así, al mirar un ala del avión, por ejemplo, visualizaban sobre ésta el número de misiles que le quedaban. El sistema incluía, además, control dirigido por voz y por movimientos de cabeza, panel sensible al tacto (gracias a unos guantes especiales que debían llevar los usuarios), controles de mano virtuales e, incluso, un sistema de control ocular.

Poco después de la presentación de Super Cockpit, comenzaron a surgir estudios en los que aparecían diferentes tipos de aplicaciones que hacían uso de anotaciones de Realidad Aumentada, como (Feiner et al., 1992; Rekimoto & Nagao, 1995). En el primero de estos trabajos, los autores diseñaron un sistema experimental que consistía en un HMD con pantalla transparente que permitía superponer gráficos sobre la visión del usuario del mundo físico. Estos gráficos consistían en modelos 3D de objetos físicos, anotaciones, textos y otro tipo de elementos virtuales, como flechas. El posicionamiento se realizaba mediante sensores ultrasónicos y magnéticos. La Figura 2.31a muestra el prototipo del HMD usándose para testear una aplicación de mantenimiento de una impresora láser. Por su parte, el segundo de los trabajos citados arriba presenta el sistema NaviCam, una computadora portátil con cámara de vídeo que detecta la posición del usuario en el mundo físico mediante marcadores y muestra información virtual relevante en una pantalla. La

Figura 2.31 muestra las dos versiones de hardware que desarrollaron los autores: un dispositivo de cabeza (c) y otro de mano (d). En la Figura 2.31b, se aprecia un claro ejemplo de anotación de Realidad Aumentada: al enfocar con el dispositivo NaviCam a un calendario del mundo físico, se superpone en la pantalla información virtual sobre las citas programadas para una fecha en concreto.

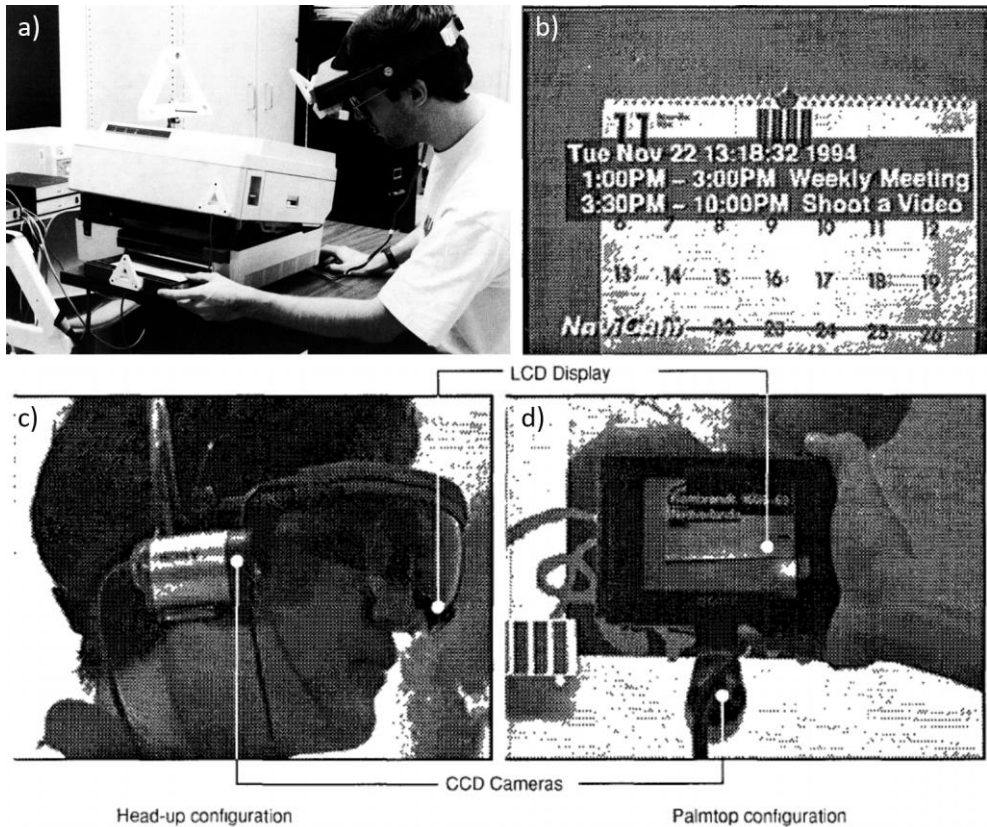


Figura 2.31. Algunos de los primeros sistemas para realizar anotaciones con tecnologías de Realidad Aumentada. Fuentes: a) (Feiner et al., 1992), b-d) (Rekimoto & Nagao, 1995)

Desde entonces, han sido muchos los artículos publicados en esta línea y, a día de hoy, las anotaciones de Realidad Aumentada siguen siendo motivo de divulgación de trabajos que se centran en el desarrollo de sistemas que las utilizan. Con la intención de incidir en la gran cantidad de aspectos técnicos que involucran estos sistemas y en los numerosos campos de aplicación en los que se utilizan, se presenta a continuación una selección de publicaciones en el campo de las anotaciones de Realidad Aumentada.

2.4.2. Sistemas ad hoc

Existen infinidad de artículos científicos que implican, de una u otra forma, el uso de anotaciones de Realidad Aumentada. En este apartado, se reseñan 33 trabajos con los que se pretende cubrir diferentes épocas, temáticas, dispositivos y retos tecnológicos. La metodología de investigación seguida para su selección ha sido la propuesta en (Kitchenham, 2004) para la realización de una revisión sistemática de la literatura o SLR (del inglés *systematic literature review*). Según sus directrices, un proceso SLR se compone de tres fases principales:

- **Planificación de la revisión:** identificar la necesidad de la revisión y desarrollar un protocolo de revisión.
- **Realización de la revisión:** identificar las investigaciones realizadas previamente, seleccionar los estudios primarios, evaluar su calidad, extraer los datos y sintetizarlos.
- **Presentación de la revisión:** definir la estrategia de comunicación y publicar la revisión en un informe técnico, en una sección de una tesis doctoral, en una revista, en un artículo de conferencia o en otros canales de comunicación adecuados.

El objetivo de esta SLR es analizar los ámbitos de aplicación de las anotaciones de Realidad Aumentada y los diferentes retos tecnológicos que se pretenden superar con cada uno de los sistemas desarrollados. Para ello, se realizaron diversas búsquedas en Google Académico (*Google Académico*, s. f.), Web of Science (*Web of Science*, s. f.) y Scopus (*Scopus*, s. f.). La principal de ellas fue “Augmented Reality annotation(s)”. A ésta, se le fueron aplicando diferentes filtros, especialmente el de año de publicación. Posteriormente, se fueron realizando nuevas búsquedas sobre las áreas o temáticas relacionadas que iban surgiendo, combinando el nombre de la tecnología investigada (“Augmented Reality”) con diversas palabras claves, tales como “collaborative”, “anchoring”, “cross-device”, etc. Los criterios de inclusión y exclusión fueron los siguientes: publicaciones académicas en inglés donde las anotaciones de Realidad Aumentada son un elemento primordial de la investigación, dando preferencia a los trabajos de la última década, aunque también se incluyen algunos anteriores dada su relevancia en la investigación futura o su singularidad. Se ha dado prioridad a los trabajos que utilizan únicamente Realidad Aumentada, excluyendo aquellos que incluyen también Realidad Virtual.

La búsqueda exploratoria, realizada tal y como se ha descrito, supone que los trabajos seleccionados se encuentran dispersos entre varios lugares y que otros tantos han podido quedarse fuera por no responder a los criterios de búsqueda aplicados. Por lo tanto, la clasificación llevada a cabo podría no reflejar completamente la amplitud y profundidad reales de la literatura y ser incompleta. A pesar de ello, se ha examinado una gran parte de la literatura para que la muestra seleccionada sea relevante y representativa de los diferentes ámbitos de aplicación y retos tecnológicos de las anotaciones de Realidad Aumentada. Igualmente, los criterios seguidos para realizar la clasificación, que se detallan a continuación, son unos de tantos posibles y, sin ser necesariamente los mejores, sí responden a los objetivos de este apartado.

A pesar de que no existen criterios únicos para decidir cuántos estudios son suficientes para alcanzar una SLR con éxito, se pueden observar trabajos previos para corroborar que los 33 trabajos seleccionados son suficientes. Diversas SLR en el campo de la Realidad Aumentada muestran un amplio abanico, desde los 19 estudios analizados en (Ahmad & Junaini, 2020), hasta los 96 de (Egger & Masood, 2020), pasando por los 25 de (Diegmann et al., 2015) o los 55 de (Boboc et al., 2020). Este número depende, en gran medida, del área concreta de estudio dentro del campo de la Realidad Aumentada. Otra referencia puede encontrarse en (Kitchenham et al., 2009), donde se analizan 20 SLR en el campo de la ingeniería del software. De ellas, 11 están compuestas por menos de 33 estudios.

Así pues, una vez seleccionados los artículos, el siguiente paso fue leer los trabajos completos para extraer la información más relevante, sintetizarla y clasificarla. Como se vio en la Sección 2.2. “Definición y características de la Realidad Aumentada”, a la hora de desarrollar un sistema de Realidad Aumentada, hay que tomar tres decisiones básicas: selección del dispositivo, tipo de interacción permitida y elección del método de registro y seguimiento. Para realizar la clasificación de esta SLR, se ha descartado basarse en el método de registro y seguimiento, ya que éste es, en muchos casos, una parte secundaria de los trabajos estudiados. Tampoco se ha querido realizar en base a los dispositivos utilizados porque es habitual que su selección dependa de los recursos disponibles. Por tanto, se ha considerado pertinente clasificar los artículos en base a la interacción que permiten y, concretamente, a la **colaboración**, ya que la manipulación y navegación es, en gran parte de los artículos, irrelevante.

Para afianzar esta decisión, se han revisado las tendencias de investigación en los últimos años en el campo de la Realidad Aumentada. Uno de los foros más prestigiosos en esta materia es el ISMAR (*International Symposium on Mixed and Augmented Reality*). En (K. Kim et al., 2018; Zhou et al., 2008), analizan los trabajos presentados en dicha conferencia durante 20 años. El segundo tema más investigado, después del seguimiento, fue la interacción y, dentro de éste, la colaboración cobró especial relevancia durante la segunda década (2008-2018). Se trata, por tanto, de una trascendente área de estudio en el paradigma de la Realidad Aumentada.

Así pues, los artículos seleccionados se han clasificado en las siguientes cinco categorías de Realidad Aumentada:

- Monousuario
- Colaborativa in situ síncrona
- Colaborativa in situ asíncrona
- Colaborativa remota síncrona
- Colaborativa remota asíncrona

Cuando un sistema puede ser utilizado en diversas modalidades, se ha clasificado dentro de la que más relevancia se le da en el artículo o, si se tratan todas por igual, la que supone una mayor innovación. Una vez clasificados todos los artículos en una de estas cinco categorías, sí se han analizado el resto de características mencionadas y, en caso de que fueran relevantes para el estudio, se han reseñado. En concreto, se ha extraído la información referente a los **dispositivos** utilizados y a los **métodos de registro y seguimiento** empleados. Otro factor importante a analizar en cada uno de los artículos seleccionados es el **tipo de anotación** que se realiza y la **interacción que permiten** (ver, manipular, editar y/o crear anotaciones). Del mismo modo, se ha visto relevante remarcar el **campo de aplicación o funcionalidad** de cada trabajo.

En la Tabla 2.2 se listan, por orden alfabético de autor, los artículos seleccionados en base a los criterios mencionados y se sintetizan sus principales características. A continuación, se reseñan brevemente cada uno de estos trabajos.

Artículo	Colaboración	Dispositivo	Registro y Seguimiento	Tipo de anotación	Interacción con anotación	Campo de aplicación / Funcionalidad
(Alahmadi & Yang, 2018)	Monousuario	Móvil	Wifi / Sensores / Características	Texto	Ver	Identificación de objetos
(Andersen et al., 2016)	Remota síncrona	Tableta	Basado en visión	Texto, figura prediseñada	Crear / Ver	Asistencia remota (medicina)
(Aschenbrenner et al., 2018)	Remota síncrona	Escritorio / HMD / Proyector / Tableta	Marcador / Características	Trazo	Crear / Ver	Asistencia remota
(Bane & Hollerer, 2004)	Monousuario	HMD	---	Rayos X	Ver	Rayos X para edificios
(Bhattacharyya et al., 2019)	In situ síncrona	Móvil	SDK ARCore	Modelo 3D	Manipular	Juego
(Bork et al., 2019, 2021)	In situ síncrona	HMD	SDK HoloLens	Modelo 3D	Manipular	Enseñanza (medicina)
(Bruno et al., 2019)	In situ asíncrona	Móvil	Marcador / Características / Sensores / SDK Tango	Esferas con texto	Ver / Manipular / Editar / Crear	Superposición de diseño sobre realidad
(Cao & Kim, 2020)	In situ síncrona / Remota síncrona	Móvil	Características / SDK ARCore	Trazo	Crear / Ver	Anotaciones sobre vídeo en tiempo real
(K. Chen et al., 2018)	Monousuario	Móvil	Sensores / Flujo óptico	Texto	Ver	Identificación de objetos
(Du & Bulusu, 2021)	Monousuario	Móvil	SDK ARKit	Texto	Ver	Ayuda a personas con baja visión
(Fuvattanasilp et al., 2021)	Monousuario	Tableta	SLAM / Marcadores	Flechas	Crear	Creación de contenido
(Gauglitz et al., 2014a)	Remota síncrona	Escritorio (táctil) / Tableta	SLAM	Trazo	Crear / Ver	Asistencia remota
(Gauglitz et al., 2014b)	Remota síncrona	Escritorio / Tableta	SLAM	Esferas y flechas	Crear / Ver	Asistencia remota
(Hattab & Taubin, 2019)	Monousuario	Proyector	Marcador	Resaltado	Ver	Tallado de esculturas
(Huynh et al., 2019)	Monousuario	HMD	Basado en visión / SDK HoloLens	Texto	Manipular	Aprendizaje de idiomas
(Ioannidi et al., 2017)	In situ asíncrona	Móvil	GPS / Sensores / Características	Texto, imagen, modelo 3D	Crear / Ver	PDI (patrimonio arquitectónico)

(Kalkofen et al., 2009)	Monousuario	---	Marcador / SDK Studierstube	Diagramas de despiece	Crear / Ver	Diagramas de despiece
(Langlotz et al., 2012)	In situ asíncrona	Móvil	GPS / Características	Texto, voz	Crear / Ver	PDI
(Langlotz et al., 2013)	In situ asíncrona	Móvil	GPS / Sensores / Características	Voz	Crear / Ver	PDI
(Lanir et al., 2013)	Remota síncrona	Escritorio / Proyector	---	Trazo, texto, figura prediseñada	Crear / Ver	Asistencia remota
(Makita et al., 2009)	Monousuario	PC Portátil	Marcador / Sensor óptico (infrarrojos)	Imagen, modelo 3D	Ver	Anotación de objetos móviles
(Marino et al., 2021)	In-situ asíncrono	Tableta	Marcador / SDK ARCore	Figura prediseñada	Ver / Manipular / Editar / Crear	Superposición de diseño sobre realidad
(Mourtzis et al., 2017)	Remota asíncrona	HMD	Marcador	Modelo 3D	Ver	Asistencia remota
(Polvi et al., 2016)	Monousuario	Tableta	SLAM	Texto	Crear	Creación de contenido
(Poretski et al., 2021)	In situ síncrona	Tableta	---	Modelo 3D	Crear	Evaluación
(Porzi et al., 2014)	Monousuario	Móvil	GPS / Sensores / Características	Texto	Ver	Anotaciones de montañas
(Rijnsburger & Kratz, 2017)	In situ síncrona	HMD	Marcador / Características / SDK Google Glass	Texto, imagen	Ver	Presentaciones grupales
(Schoenfelder & Schmalstieg, 2008)	Monousuario	Tableta	SDK ART Qualisys 1	Modelo 3D, trazo	Crear / Ver	Superposición de diseño sobre realidad
(Speicher, Cao, et al., 2018)	Remota síncrona	Escritorio / Móvil / Proyector / Pantalla	Manual (4 puntos de anclaje)	Trazo, texto, imagen	Crear / Ver	Colaboración remota
(Tatzgern et al., 2013)	Monousuario	Móvil	---	Diagramas de despiece	Ver	Posicionamiento de información virtual
(Tomlein & Grønbaek, 2018)	Monousuario	Móvil	SDK ARKit	Figura prediseñada	Crear	Creación de contenido
(Wang et al., 2021)	Remota asíncrona	Tableta	SDK ARKit	Modelo 3D	Crear / Ver	Creación de contenido
(Zillner et al., 2018)	Remota síncrona	Escritorio / HMD	SLAM	Trazo, texto, imagen, modelo	Crear / Ver	Asistencia remota

Tabla 2.2. Principales características de los artículos seleccionados para esta SLR

Monousuario

Los sistemas de Realidad Aumentada desarrollados para ser utilizados por un único usuario son numerosos y las líneas de investigación muy variadas. En concreto, se pueden encontrar diversas publicaciones centradas en el tema del posicionamiento y el diseño de la información virtual de las anotaciones de Realidad Aumentada. Si no se presta atención a la cantidad de información que se muestra y a su posición con respecto al elemento anotado, se puede producir fácilmente un desbordamiento de información, especialmente en dispositivos de pantalla pequeña. En (Tatzgern et al., 2013), por ejemplo, investigan la visualización compacta de la información, esto es: filtrar los datos para evitar redundancias y crear un diseño adecuado para posicionar la información restante. El trabajo se centra en los diagramas de despiece y tiene en cuenta los cambios de punto de vista que se producen en las visualizaciones en tiempo real. En (Makita et al., 2009), el foco se centra en solucionar los problemas que surgen a la hora de colocar la información virtual de las anotaciones de Realidad Aumentada cuando los objetos anotados se mueven. El método propuesto obtiene las posiciones y formas de los objetos que se quieren anotar y estima sus porciones visibles desde el punto de vista del usuario. La información virtual se ubica minimizando las penalizaciones relacionadas con: la superposición de las anotaciones, la oclusión de los objetos anotados, la longitud de la línea entre la información virtual y el objeto destino y la distancia de la anotación en fotogramas secuenciales. La Figura 2.32 muestra las notables diferencias que existen a la hora de colocar las anotaciones si se utiliza (izquierda) o no (derecha) el método dinámico desarrollado.



Figura 2.32. Las anotaciones de la imagen de la izquierda se colocan dinámicamente aplicando el método propuesto por Makita et al. mientras que las anotaciones de la imagen de la derecha se colocan fijando previamente una posición relativa entre la anotación y el usuario. Fuente: (Makita et al., 2009)

Otros trabajos se centran en anotaciones menos típicas, como son las de tipo rayos X exploradas en (Bane & Hollerer, 2004). Los autores presentan un conjunto de herramientas interactivas de Realidad Aumentada destinadas a dar a los usuarios la capacidad de ver a través de paredes u otros objetos sólidos mediante una visión virtual de rayos X. El sistema utiliza un HMD, pero no hace un seguimiento automático de la posición del usuario, sino que éste debe colocarse en posiciones específicas previamente establecidas. Además, dispone de herramientas adicionales como el selector de salas o la visualización de una determinada sala en miniatura y en tercera persona para poder interactuar con ella. En (Kalkofen et al., 2009), los autores quieren demostrar que los diagramas de explosión o de despiece pueden ser una técnica de visualización esencial para aplicaciones de Realidad Aumentada siempre y cuando se realice una correcta integración. Para ello, presentan diferentes algoritmos cuyo objetivo es componer una imagen a partir de objetos virtuales y de información del mundo físico (tanto si forma parte del diagrama de despiece como si no). Para mejorar la comprensión de los diagramas de explosión de Realidad Aumentada, discuten diferentes tipos de técnicas de visualización. Finalmente, combinan los algoritmos con las técnicas de visualización para conseguir un cálculo automático del diseño y la animación de las tareas que se pretenden mostrar haciendo uso de los diagramas de despiece. Los resaltados o *highlights* son otro tipo de anotaciones poco explotadas. En (Hattab & Taubin, 2019), utilizan estos elementos virtuales para ayudar a los usuarios no cualificados a tallar una réplica física aproximada de un modelo 3D utilizando el mínimo número de cortes. El sistema emplea un proyector para iluminar secuencialmente las partes del bloque de material que el usuario ha de ir tallando.

Otro uso habitual de la Realidad Aumentada monousuario es el de la identificación de objetos, es decir: superponer información virtual sobre un objeto cuando éste se enfoca con el dispositivo utilizado. En (Porzi et al., 2014), se utiliza un sistema de Realidad Aumentada para la anotación automática de imágenes de paisajes montañosos mediante datos georreferenciados. Se ejecuta en teléfonos móviles y permite obtener información sobre picos de montañas, como muestra la Figura 2.33 (izquierda), senderos, posiciones de otros usuarios, etc. Primero, se utiliza el GPS y los sensores inerciales para estimar la posición y orientación del dispositivo; luego, se refina la ubicación utilizando un nuevo método de detección de los contornos de las montañas visibles basado en el aprendizaje. En (K. Chen

et al., 2018), se presenta MARVEL, un sistema MAR basado en anotaciones cuyo objetivo es identificar los objetos a los que el dispositivo apunta y superponer, en tiempo real, las anotaciones correspondientes en la ubicación relevante de la pantalla, como se aprecia en la Figura 2.33 (derecha). Está diseñado para ser utilizado en interiores en un área amplia (un edificio, por ejemplo) y necesita hacer previamente la captura de nube de puntos y el etiquetado de objetos (anotaciones), que guardará en una base de datos en el servidor. Utiliza principalmente los sensores inerciales locales del dispositivo móvil para reconocer y rastrear múltiples objetos y calcula el flujo óptico local y descarga las imágenes sólo cuando es necesario. Una funcionalidad similar puede encontrarse en (Alahmadi & Yang, 2018), donde los autores presentan también un MAR para identificar objetos en interiores. Sin embargo, las técnicas de registro y seguimiento son diferentes. Cuando se realiza una anotación, se guarda una imagen de lo que se quiere anotar, una anotación de tipo texto, la información de los sensores del móvil y la posición obtenida mediante las señales wifi. De esta forma, cuando un usuario enfoca con su dispositivo un objeto anotado, se utiliza el wifi y los sensores del móvil para hacer un primer filtrado de posibles anotaciones y reducir la carga computacional. Posteriormente, se hace la extracción de características para comparar la imagen de la cámara con las imágenes filtradas de la base de datos. A continuación, se le muestra la anotación de texto sobre el objeto correspondiente. En (Du & Bulusu, 2021), utilizan esta idea de identificar objetos mediante Realidad Aumentada para ayudar a personas con baja visión. Para ello, desarrollan una herramienta basada en la detección automatizada de objetos, el etiquetado mediante anotaciones de Realidad Aumentada y el posicionamiento preciso en interiores. Con ello, se ofrece a las personas con baja visión una forma rápida de detectar obstáculos circundantes utilizando sus teléfonos inteligentes en interiores.

La creación del contenido virtual in situ, también conocido como *authoring*, es un campo ampliamente estudiado en el ámbito de la Realidad Aumentada. Uno de los grandes desafíos que esto presenta es conseguir un posicionamiento correcto y preciso de los objetos virtuales en el mundo real y son varios los estudios que abordan dicho problema. En (Polvi et al., 2016), por ejemplo, se presenta SlidAR, un método de posicionamiento 3D para Realidad Aumentada portátil basado en SLAM. El objetivo del estudio es conseguir un posicionamiento correcto de las anotaciones de Realidad Aumentada en herramientas de creación in situ con

dispositivos de mano. Para ello, utilizan proyección de rayos 3D y geometría epipolar. Años más tarde, se presentó SlidAR+ (Fuvattanasilp et al., 2021), una extensión del estudio anterior que permite controlar la posición y orientación de las anotaciones manipulando 6DoF de una forma intuitiva. Otro ejemplo de creación de contenido puede encontrarse en (Tomlein & Grønbæk, 2018), donde se propone un enfoque ligero y flexible para modelar sistemas industriales complejos utilizando Realidad Aumentada en teléfonos móviles. La aplicación desarrollada proporciona una librería de anotaciones para dispositivos y contenedores que se pueden agregar a la escena y que proporcionan opciones como la creación de flujos y la descripción de las conexiones de red entre los dispositivos mediante Realidad Aumentada. En la Figura 2.34, un instalador crea modelos 3D de un sistema industrial con su teléfono móvil (izquierda y centro). Los modelos y flujos creados se pueden procesar posteriormente (derecha).

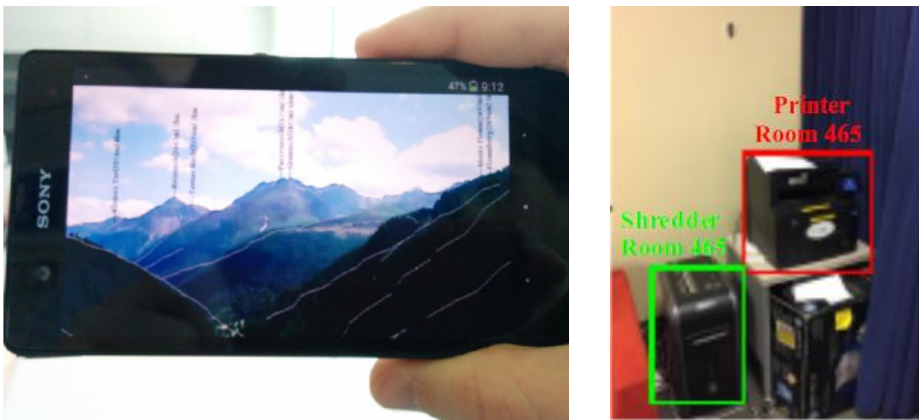


Figura 2.33. Picos de montaña anotados con el sistema propuesto por Porzi et al. (izquierda, fuente: (Porzi et al., 2014)) y anotación de objetos múltiples en tiempo real con el sistema MARVEL (derecha, fuente: (K. Chen et al., 2018))

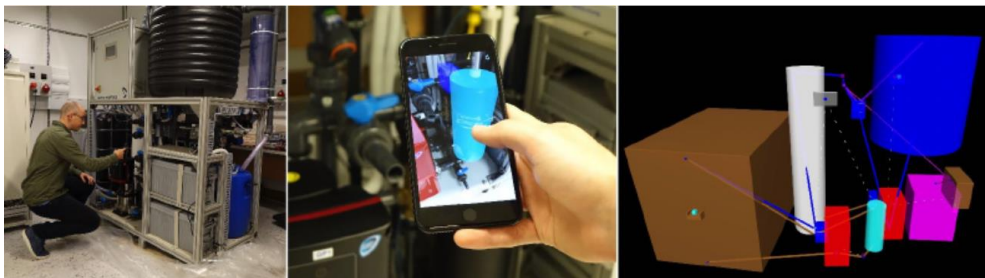


Figura 2.34. Modelado de sistemas industriales mediante Realidad Aumentada. Fuente: (Tomlein & Grønbæk, 2018)

También pueden encontrarse diversas investigaciones en las que se utiliza la Realidad Aumentada para verificar la corrección de instalaciones o construcciones. Para ello, se superponen sobre el mundo físico modelos 3D de los diseños realizados previamente. Ajustando el nivel de transparencia de la información virtual, se puede comprobar si las construcciones llevadas a cabo se ajustan a los diseños previstos. Un ejemplo de ello es AR-Planar (Schoenfelder & Schmalstieg, 2008), una aplicación de Realidad Aumentada que ayuda en el proceso de aceptación de edificios industriales. Permite ajustar el nivel de transparencia de los diseños superpuestos sobre el entorno físico y realizar anotaciones mediante un lápiz óptico. Aunque los autores apuntan algunas funcionalidades que mejorarían la colaboración, el sistema se presenta como monousuario. Una de las peculiaridades de este sistema es que la tableta está instalada sobre un soporte móvil que permite tener las manos libres por lo que se presenta como adecuado para un uso prolongado en entornos industriales.

Como último ejemplo de sistema de anotaciones monousuario, cabe mencionar el estudio presentado en (Huynh et al., 2019), que tiene como objetivo facilitar el aprendizaje de un idioma mediante el uso de la Realidad Aumentada. Para ello, los autores presentan un marco de trabajo para el reconocimiento, etiquetado y selección de objetos en tiempo real en un entorno desconocido. El sistema, que los usuarios utilizan mediante unas HoloLens, incluye un modelo de reconocimiento de objetos del mundo físico en tiempo real, integra el seguimiento ocular para facilitar la selección y la interacción e incorpora un modelo de aprendizaje personalizado que se adapta al progreso de cada estudiante. La Figura 2.35 muestra un conjunto de objetos candidatos (en rojo), las etiquetas resultantes tras aplicar el algoritmo (en verde) y un usuario utilizando el sistema.

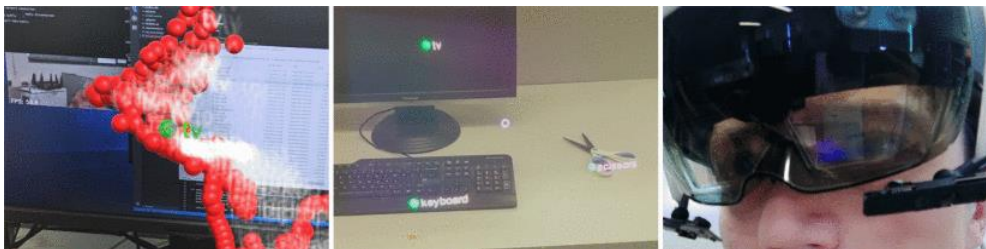


Figura 2.35. Sistema para el aprendizaje de un idioma mediante el uso de un HMD de Realidad Aumentada. Fuente: (Huynh et al., 2019)

Colaborativa in situ síncrona

Uno de los campos que más se presta a la colaboración cara a cara es el de los juegos multiusuario de Realidad Aumentada. Un ejemplo es Brick (Bhattacharyya et al., 2019), un juego para dispositivos móviles colaborativo en el que dos jugadores trabajan juntos para rellenar una cuadrícula con los ladrillos virtuales que hay dispersos en una habitación real. En este trabajo, además, se propone un modelo cuyo objetivo es apoyar el desarrollo de juegos de Realidad Aumentada colaborativos y nuevas formas de juego social.

Otros trabajos se centran en los retos a superar cuando se desea que el número de usuarios sea elevado. En (Bork et al., 2019, 2021), por ejemplo, se presenta VesARlius, un sistema de Realidad Aumentada para el HMD HoloLens que admite un gran número de usuarios ubicados conjuntamente para colaborar en un entorno de aprendizaje dinámico e interactivo sobre anatomía. La Figura 2.36 muestra una descripción general del sistema. En (Rijnsburger & Kratz, 2017), se presenta un prototipo que pretende evitar el contenido de las presentaciones grupales de diapositivas que puede resultar irrelevante para parte de la audiencia. Para conseguirlo, presentan anotaciones de forma individualizada a los asistentes mediante gafas de Realidad Aumentada (en concreto, Google Glass).

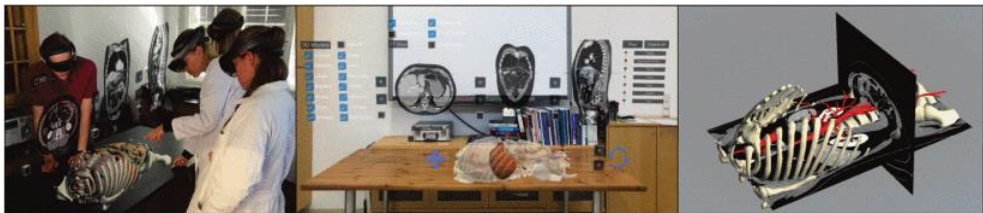


Figura 2.36. Estudiantes de medicina utilizando de forma síncrona el sistema VesARlius (izquierda), componentes de la interfaz de usuario de dicho sistema (centro) y forma alternativa de mostrar las tomografías computarizadas (derecha). Fuente: (Bork et al., 2019)

Por su parte, los autores de (Cao & Kim, 2020) se centran en la necesidad de realizar anotaciones directamente sobre los vídeos de forma análoga a como se hacen en documentos o imágenes. Con ello pretenden facilitar la comunicación en los sistemas colaborativos, ya sean remotos o presenciales. Se propone un sistema de anotación de vídeo en tiempo real basado en Realidad Aumentada que permite a los usuarios hacer anotaciones manuscritas directamente en el vídeo mediante sus teléfonos móviles, como se ejemplifica en la Figura 2.37.

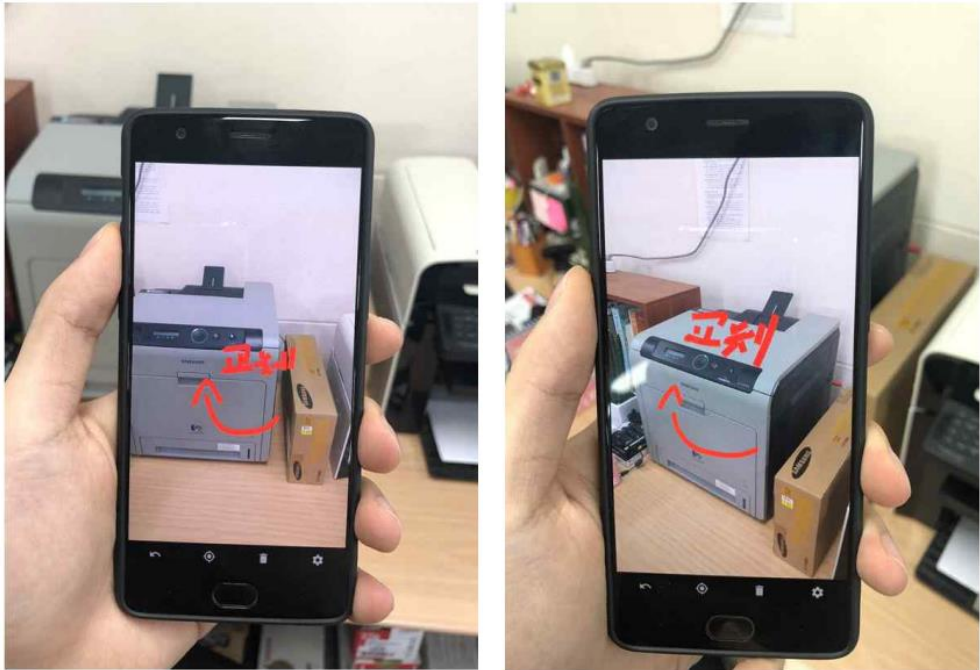


Figura 2.37. Anotación de video en tiempo real con el método propuesto por Cao y Kim desde dos puntos de vista diferentes: vista frontal (izquierda) y vista lateral (derecha).

Fuente: (Cao & Kim, 2020)

En (Poretski et al., 2021), no desarrollan ningún sistema novedoso sino que utilizan una aplicación de Realidad Aumentada para dispositivos móviles ya existente con el objetivo de comparar el comportamiento de los usuarios que colaboran en actividades de diseño de modelos 3D usando Realidad Aumentada cara a cara frente a los que lo hacen con elementos puramente físicos. En la investigación se observa que, en la condición física, los participantes dedican la mayor parte del tiempo a construir las partes de las estructuras en conjunto, mientras que, en la condición de Realidad Aumentada, suelen dividir las tareas y trabajar sobre diferentes elementos situados en las zonas correspondientes. En consecuencia, los participantes se desplazaron mucho más por el espacio de trabajo en la condición de Realidad Aumentada. En contraposición, en la condición física se utilizaron muchos más gestos deícticos.

Colaborativa in situ asíncrona

Un uso típico de este tipo de colaboración es el de marcar Puntos de Interés (PDI) en un entorno para que los usuarios puedan consultarlos en cualquier momento. En (Langlotz et al., 2012), el usuario que realiza las anotaciones de Realidad Aumentada crea, a partir del vídeo registrado con su dispositivo móvil en tiempo real, un mapa panorámico del entorno donde desea situar la información virtual. El sistema permite a los usuarios crear anotaciones de texto y voz en ese momento y almacenarlas de forma autodescriptiva, junto a su posición GPS, en un servidor. Posteriormente, otro usuario puede visualizar dichas anotaciones aproximándose a la zona mediante los datos GPS y creando un nuevo panorama mediante un mapeo y seguimiento de características. Gracias a ello, puede ver las anotaciones del entorno incluso si su posición actual difiere ligeramente de la posición del usuario que las creó, como muestra la Figura 2.38.



Figura 2.38. Anotaciones tomadas con el sistema propuesto por Langlotz et al. Fuente: (Langlotz et al., 2012)

Siguiendo con la idea básica del trabajo anterior, en (Langlotz et al., 2013), los autores se centran en las anotaciones de audio. En este nuevo trabajo se presenta un escenario de rediseño urbano en su etapa de planificación. En él, los usuarios pueden crear y compartir anotaciones de audio espaciales ubicadas con precisión. De esta forma, los ciudadanos interesados pueden grabar sus comentarios sobre diversos edificios en su etapa de planificación. Éstos se colocan en el entorno y están vinculados a objetos reales u objetos aumentados, como edificios o partes planificadas.

En un campo de aplicación similar, se sitúa (Ioannidi et al., 2017). En él, se presenta Flaneur, una aplicación de Realidad Aumentada para dispositivos móviles que permite hacer anotaciones sobre edificios y ver las que ya han realizado otros

usuarios. Los autores investigan el potencial de la Realidad Aumentada como herramienta para la creación e intercambio participativo de contenido sobre el patrimonio arquitectónico en exteriores. Una parte del contenido es creado fuera de línea por los administradores, pero los usuarios también pueden crear anotaciones textuales y gráficas sobre ubicaciones precisas. Como en otros trabajos, el sistema también guarda las coordenadas GPS y la medición del magnetómetro del dispositivo. De esta forma, al seleccionar un PDI, se coloca un indicativo en un mapa que representa la ubicación y orientación del creador de la anotación de Realidad Aumentada en el momento en que la realizó. Esto ayuda a otros usuarios a apuntar correctamente con sus dispositivos móviles y poder ver las anotaciones.

Como se apuntaba en el subapartado de sistemas monousuario, un uso recurrente de la Realidad Aumentada es verificar si el estado actual del mundo físico coincide con los diseños que se realizaron previamente. Esto permite desarrollar sistemas colaborativos asíncronos en los que los diferentes inspectores trabajan in situ verificando el estado de una construcción o instalación en diferentes momentos. En (Marino et al., 2021), se presenta una herramienta de Realidad Aumentada para dispositivos móviles de mano cuya finalidad es ayudar a los operadores durante las actividades de inspección. Gracias a la superposición de los modelos 3D diseñados en oficina, un trabajador puede detectar discrepancias de diseño en el producto físico final ensamblado y reportarlas agregando anotaciones sobre los modelos virtuales. Este estudio parte de una publicación anterior (Bruno et al., 2019) cuyo objetivo es mejorar la eficiencia de la recopilación de datos y el intercambio de información entre los diferentes profesionales involucrados en el proceso de diseño y producción en el sector del petróleo y el gas. La Figura 2.39 muestra el modelo 3D (en verde y azul) superpuesto en el mundo físico y anotaciones (esferas) que indican discrepancias de diseño.

Colaborativa remota síncrona

Son muchos los artículos encontrados en este campo ya que la asistencia remota (expertos remotos asistiendo a usuarios locales) es uno de los escenarios más estudiado en los últimos años (Ens et al., 2019). En (Lanir et al., 2013), se realiza un estudio para determinar quién es más conveniente que controle la cámara y el punto de vista del dispositivo de gestos durante la asistencia remota. El experto

remoto utiliza una interfaz de escritorio para anotar la imagen capturada por la cámara del entorno físico mediante dibujos a mano alzada, textos o imágenes prediseñadas. El usuario local ve dichas anotaciones proyectadas sobre el entorno físico en tiempo real, como se aprecia en la Figura 2.40.

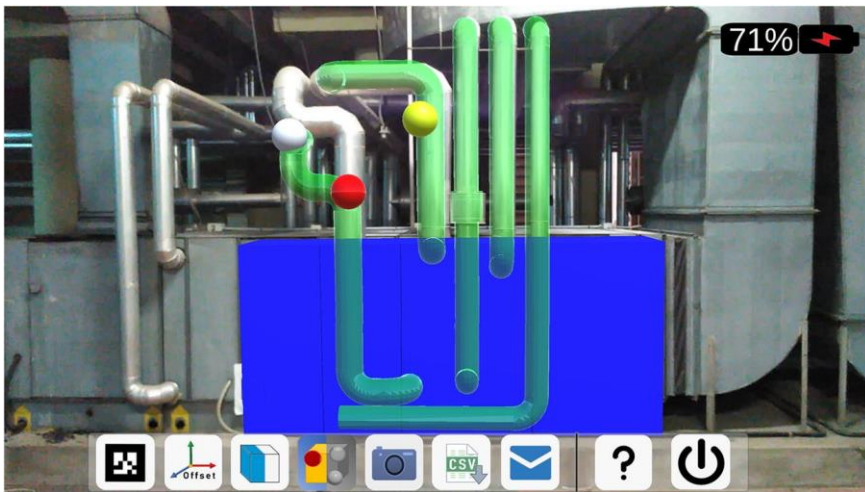


Figura 2.39. Anotaciones de Realidad Aumentada superpuestas sobre un modelo virtual y su entorno real para marcar discrepancias de diseño. Fuente: (Bruno et al., 2019)

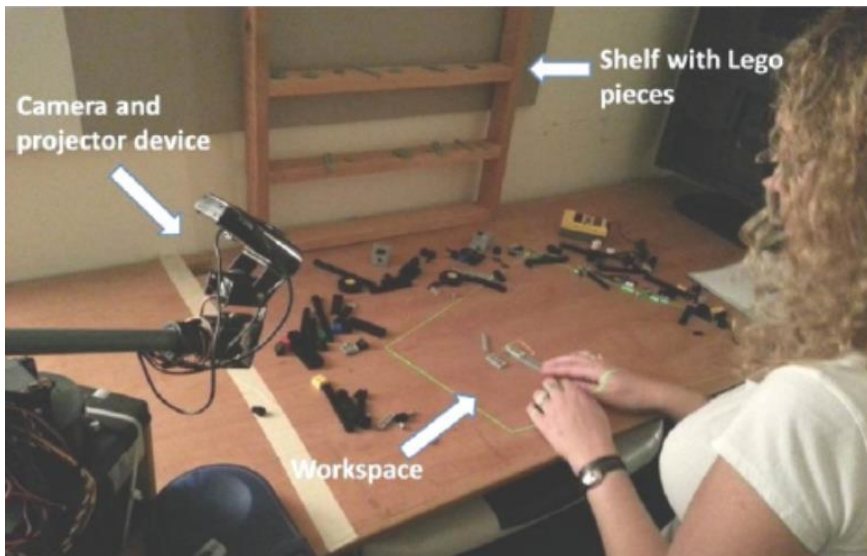


Figura 2.40. Sistema para asistencia remota mediante Realidad Aumentada espacial. Fuente: (Lanir et al., 2013)

En (Gauglitz et al., 2014a, 2014b), también se presenta un sistema diseñado para asistir a los usuarios de forma remota. En este caso, el usuario local utiliza una tableta mientras que el experto remoto utiliza una interfaz de escritorio con teclado y ratón en el primer caso y con pantalla táctil en el segundo. Lo que caracteriza a estos estudios es que el usuario remoto puede explorar la escena independientemente de la posición actual de la cámara del usuario local. De esta forma, puede comunicarse mediante anotaciones de Realidad Aumentada que son inmediatamente visibles para el usuario local. En el caso de (Gauglitz et al., 2014b), lo que se presenta es un prototipo, por lo que sólo se pueden realizar anotaciones con forma de esfera; además, se utilizan flechas para indicar a los usuarios que hay anotaciones fuera de plano. En (Gauglitz et al., 2014a), los autores se centran más en cómo inferir automáticamente la profundidad de los dibujos 2D en el espacio 3D, por lo que se utilizan anotaciones de tipo trazo (dibujadas con un dedo sobre la pantalla, como muestra la Figura 2.41). Los autores de estos estudios profundizan en este tema en trabajos posteriores, también orientados a la colaboración remota (Lien et al., 2015, 2016).



Figura 2.41. Un usuario remoto (derecha) dibuja un trazo sobre un elemento del entorno. El usuario local (izquierda) ve la anotación en tiempo real mediante Realidad Aumentada.

Fuente: (Gauglitz et al., 2014a)

El estudio realizado en (Aschenbrenner et al., 2018) compara diferentes dispositivos de Realidad Aumentada en asistencia remota (HMD, proyector y tableta) entre sí y en comparación con otros métodos de comunicación más tradicionales (teléfono, vídeo y captura de pantalla). Los resultados muestran claras ventajas de utilizar Realidad Aumentada frente a métodos tradicionales, en especial

cuando el dispositivo utilizado es el proyector. El experto realiza anotaciones de tipo trazo utilizando Realidad Aumentada de escritorio.

Otra interesante aportación al campo de la colaboración remota es (Zillner et al., 2018). En él, se presenta un sistema de Realidad Aumentada que realiza una reconstrucción virtual de la escena de alta fidelidad. El trabajador local, provisto de unas gafas de Realidad Aumentada, genera automáticamente una malla 3D del entorno y se la transmite a un experto remoto. Éste, desde un ordenador, puede navegar y explorar el entorno reconstruido con 6DoF independientemente del trabajador local. Además de anotaciones de tipo texto, imagen y trazos, el experto puede segmentar objetos de la malla y utilizar el modelo 3D resultante para crear animaciones simples que transmitan instrucciones más precisas al usuario local. La Figura 2.42 muestra este proceso.



Figura 2.42. Un trabajador local con un HMD (izquierda) genera un modelo 3D del entorno de trabajo (centro). Un experto remoto usa la malla resultante para crear instrucciones (derecha). Fuente: (Zillner et al., 2018)

También en el campo de la medicina se han realizado estudios de teleasistencia mediante Realidad Aumentada. En (Andersen et al., 2016), se diseña un sistema que permite transmitir ubicaciones precisas sobre el paciente a un cirujano en formación. Éste recibe, en su tableta, las indicaciones del experto: representaciones semitransparentes de instrumentos quirúrgicos, gestos, líneas, textos, etc.

La colaboración remota puede darse en otras circunstancias diferentes a la de la asistencia, que siempre implica un experto remoto y un usuario local que está siendo asistido. Un ejemplo de ello es (Speicher, Cao, et al., 2018), donde se presenta 360Anywhere, un marco para la colaboración multiusuario basada en vídeos 360. El sistema permite a los colaboradores ver y anotar una transmisión en vivo en 360 grados y proyectar dichas anotaciones en el entorno físico en tiempo real. Permite a los usuarios dibujar, colocar imágenes y colocar texto directamente en la secuencia de 360 grados en la interfaz de usuario y éstas serán vistas mediante proyección.

Colaborativa remota asíncrona

Como se justificó en el Apartado “2.2.2. Interacción en tiempo real”, esta modalidad de colaboración, en la que los usuarios no comparten ni tiempo ni espacio, es la menos explorada, por lo que los trabajos encontrados son escasos. En (Wang et al., 2021), se presenta una herramienta para la creación remota de contenido virtual mediante Realidad Aumentada. Para ello, un usuario provisto de una tableta genera un modelo virtual del entorno físico que se desea anotar. A continuación, otro usuario crea el contenido virtual sobre dicho modelo del entorno de forma remota. Finalmente, otro usuario puede visualizar dicho contenido virtual sobre el entorno físico in situ. La Figura 2.43 muestra un ejemplo de este proceso.

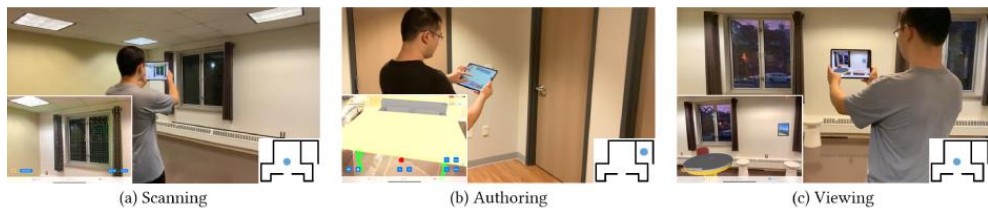


Figura 2.43. Sistema colaborativo asíncrono remoto para la creación de contenido virtual sobre un entorno real. Fuente: (Wang et al., 2021)

Un enfoque diferente puede encontrarse en (Mourtzis et al., 2017), donde se utiliza la Realidad Aumentada para mejorar la asistencia remota, pero, a diferencia de los estudios mencionados anteriormente, se hace de forma asíncrona. Como los propios autores afirman, la contribución de este desarrollo en comparación con los enfoques existentes es la creación de un sistema de soporte de mantenimiento remoto asíncrono mediante Realidad Aumentada que implementa una comunicación basada en la nube entre el usuario final y el fabricante con el fin de facilitar la reutilización del conocimiento existente.

2.4.3. Teorización

Como se ha visto, la mayoría de publicaciones en el campo de las anotaciones de Realidad Aumentada muestran aplicaciones desarrolladas para un objetivo concreto y que buscan mejorar algún aspecto técnico relevante, como puede ser la correcta visualización y alineación de las anotaciones con el mundo físico o proporcionar a los usuarios una herramienta que les ayude a desarrollar su trabajo

de una forma más eficiente. Sin embargo, pocos trabajos se centran en la teorización de los conceptos relacionados con las anotaciones de Realidad Aumentada. En consecuencia, la definición, caracterización y categorización de este tipo de elementos virtuales está dispersa en la literatura y no siempre es coincidente.

Uno de los primeros autores en teorizar sobre las anotaciones de Realidad Aumentada fue Hansen en (Hansen, 2006). En su trabajo, analiza las técnicas de anotación de diferentes sistemas, tales como: hipermedia abierto, basado en la web, móvil y Realidad Aumentada. Su objetivo es ilustrar diferentes enfoques de los desafíos centrales que los sistemas de anotación ubicuos tienen que enfrentar. Sin embargo, será tres años después cuando, en (Wither et al., 2009), se establezca una definición precisa del concepto de anotación en el contexto de la Realidad Aumentada, que se analizará detalladamente en el siguiente capítulo. En su artículo, los autores proponen una taxonomía para este tipo de elementos virtuales y describen diferentes dimensiones a lo largo de las cuales la anotación puede variar. Si bien el título del trabajo es *“Annotation in outdoor augmented reality”*, los conceptos teóricos presentados son aplicables tanto a anotaciones en exteriores como en interiores.

Aunque el estudio presentado por Wither et al. es uno de los más completos hasta la fecha, en la última década se han realizado nuevos estudios que analizan algunos aspectos que no fueron contemplados en él. Uno de ellos es (Tönnis et al., 2013), donde los autores presentan las dimensiones principales que cubren los principios de representación de la información virtual en relación con un entorno físico a través de Realidad Aumentada. Estas dimensiones no hablan específica ni exclusivamente de anotaciones, pero son perfectamente extrapolables a éstas. Lo mismo ocurre con los conceptos presentados en (Keil et al., 2018), donde los autores describen y categorizan los elementos visuales de la Realidad Aumentada según su nivel de mediación entre el mundo físico y el virtual. Por último, es importante destacar el estudio presentado en (Müller, 2019), donde se profundiza en los desafíos de la representación de la información mediante Realidad Aumentada. De nuevo, sus conceptos son aplicables a las anotaciones.

Como puede apreciarse, resulta difícil encontrar contribuciones que teoricen expresamente sobre las anotaciones de Realidad Aumentada. Esto puede deberse,

precisamente, a la falta de conocimiento sobre la existencia de una definición de este elemento virtual. Muchos autores no emplean el nombre de “anotación” pero sí utilizan dichos elementos en sus sistemas. De hecho, muchas veces se relaciona una anotación sólo con textos o líneas manuscritas, pero su concepto es mucho más amplio. Es por ello que Whiter et al. trataron de dar una definición general que abarca una variada tipología de elementos virtuales. Por tanto, los conceptos presentados en los trabajos citados en este apartado, aunque sean generales, son de utilidad para poder llevar a cabo una caracterización completa de las anotaciones de Realidad Aumentada, como se analiza en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

Caracterización y modelo de datos de las anotaciones de Realidad Aumentada

El objetivo de este capítulo es obtener una caracterización y un modelo de datos que permitan definir e implementar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada. Para ello, en primer lugar, se define de forma precisa lo que se considera una anotación en el paradigma de Realidad Aumentada. A continuación, se analizan en profundidad las contribuciones científicas más relevantes sobre conceptos teóricos que ayudan a caracterizar estos elementos virtuales. A partir de todas las características extraídas, se realiza una síntesis y clasificación que da lugar a la caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada propuesta en esta tesis. Con esta base, se desarrolla un modelo de datos que permite definir e implementar cualquier tipo de anotación independientemente del dispositivo que se vaya a utilizar para su visualización. Por último, se realiza una primera validación de las aportaciones de este capítulo aplicándolas a algunos de los trabajos estudiados en el capítulo anterior.

3.1. Definición

Aunque las anotaciones de Realidad Aumentada existen desde los inicios de este paradigma, hasta 2009 no se le dio una definición suficientemente general y bien fundamentada que pudiera ser utilizada en la bibliografía futura. Así pues, Wither et al. definieron en (Wither et al., 2009) el concepto de anotación en el contexto de la Realidad Aumentada. Su objetivo era abarcar una amplia gama de usos por lo que se trata de una definición bastante general:

“An augmented reality annotation is virtual information that describes in some way, and is registered to, an existing object.”
(Wither et al., 2009)

Una anotación de realidad aumentada es información virtual que describe de alguna forma un objeto existente y que está vinculada a él.

De esta definición pueden extraerse los cuatro componentes clave de una anotación de Realidad Aumentada:

- 1) Información virtual
- 2) Objeto existente
- 3) Vínculo espacial entre 1) y 2)
- 4) Qué tipo de descripción hace 1) de 2)

Como los propios autores explican, esta definición permite que la **información virtual** pueda adoptar diferentes formatos (textos, imágenes, sonidos, modelos 3D...). Uno de los trabajos que mejor describen, categorizan y organizan los elementos visuales de la Realidad Aumentada es (Keil et al., 2018). En él, los autores identifican los siguientes tipos de información virtual: etiquetas, iconos, resaltados, rayos X, diagramas de despiece, material transmedia y ayudas, indicadores o guías. También en (Müller, 2019) se diferencia entre diferentes tipos de información virtual o, como el autor lo llama, “objetos de información”, en base a su conexión espacial con el entorno: físicos directos, físicos indirectos, virtuales espaciales, virtuales referenciados espacialmente y virtuales separados. En la siguiente sección, se analizarán en detalle las clasificaciones mostradas en ambos trabajos.

Conviene puntualizar también lo que es un **objeto existente**. En su afán por abarcar todos los usos posibles de una anotación de Realidad Aumentada, Wither et al. consideran que los objetos existentes a los que se vincula la información virtual pueden ser tanto una parte de algún elemento del mundo físico (el tapón de una botella) como el elemento entero (una botella) o incluso el entorno en el que está situado (una estantería llena de botellas o una tienda). Del mismo modo, puede tratarse de más de un objeto físico (los cajones de un escritorio), de un área que englobe diferentes elementos (los campos de olivos de una determinada área geográfica) o de un único punto del mundo físico (una coordenada cartesiana).

El concepto de “objeto existente” se relaciona directamente con lo que otros autores denominan “**anclaje**”, es decir: el objeto físico, el punto o la zona del mundo físico con el que se vincula la información virtual. Éste será el término que se utilizará mayoritariamente en este documento pues está mucho más generalizado en la bibliografía. Además, representa mejor la idea de que cualquier parte del mundo físico puede ser anotada, sea o no un objeto concreto. De una forma más genérica, también se utiliza la expresión “elemento anotado” o, en su caso, “objeto anotado”, “punto anotado”, “zona anotada”, etc. para hablar de los anclajes.

Hay que tener en cuenta, además, que los anclajes definen dónde se conecta la información virtual con el mundo físico, pero esto no implica que esa sea, necesariamente, la posición en la que se va a colocar la información virtual (Müller, 2019). Cuando la posición de la información virtual es distinta a la de su anclaje, se puede utilizar una línea que una ambos elementos para evitar ambigüedades, pero esto no siempre es necesario. La Figura 3.1 muestra una maqueta en la que los edificios han sido anotados con etiquetas de texto. En algunos de ellos, la posición del anclaje (el edificio) coincide con la de la información virtual (su nombre) mientras que en otros la información virtual está alejada del anclaje y se utiliza una línea para que quede claro qué objeto está siendo anotado.



Figura 3.1. Edificios anotados con etiquetas de texto. Cuando la posición del anclaje y la de la información virtual no coincide, se unen con una línea. Fuente: (Bell et al., 2001)

La definición proporcionada por Wither et al. también posibilita que el **vínculo espacial** que ha de existir entre la información virtual y el anclaje no tenga por qué estar claramente definido. Este punto presenta discrepancia en la bibliografía, ya que algunos autores consideran que una anotación de Realidad Aumentada tiene que encontrarse necesariamente en o junto al objeto anotado y estar claramente relacionada con él (Hansen, 2006). Sin embargo, para Wither et al. este requisito es demasiado restrictivo y depende de la intención del desarrollador y de la interpretación del usuario. Por ejemplo: una flecha que dirige a un usuario hacia un destino está vinculada con el destino final, que sería el objeto anotado, pero no se presenta junto a él ni con una relación visual clara por lo que Hansen no lo consideraría una anotación, pero Wither et al. sí. En este documento, se adoptará la definición de Wither et al. ya que engloba muchos usos de las anotaciones de Realidad Aumentada que, de otra forma, no serían analizados.

Para diferenciar claramente lo que se considera una anotación de lo que no, Wither et al. definen dos componentes esenciales que toda anotación de Realidad Aumentada debe tener obligatoriamente:

- Algún **componente espacialmente dependiente** que vincule la información virtual con el objeto existente que se está anotando. Se trata, pues, de un vínculo entre el mundo virtual y el mundo físico. Esto supone que toda anotación debe vincularse a un objeto existente en particular y no sólo a un punto del sistema de coordenadas.
- Algún **componente espacialmente independiente** que incluya la información virtual. Esto implica que ha de existir alguna diferencia entre el contenido virtual y lo que el usuario ve del mundo físico. Por tanto, un modelo 3D perfecto de un objeto que se usa, por ejemplo, para realizar oclusiones no es una anotación, por mucho que sea espacialmente dependiente. En cambio, si ese mismo modelo 3D tiene alguna modificación con respecto a su homónimo físico (cambia los materiales, por ejemplo), ya sí se considera una anotación puesto que agrega información y modifica la percepción que el usuario tiene del mundo físico.

Este último punto tiene que ver con el **tipo de descripción** que hace la información virtual del objeto existente (cuarto componente clave de una

anotación de Realidad Aumentada) y será analizado en detalle a lo largo de la siguiente sección.

La Figura 3.2 muestra una representación gráfica de la definición dada por Wither et al. para una anotación de Realidad Aumentada y todos los conceptos asociados a ella. En la bibliografía, se utiliza con mucha frecuencia la palabra “anotación” para hacer referencia exclusivamente a la información virtual.

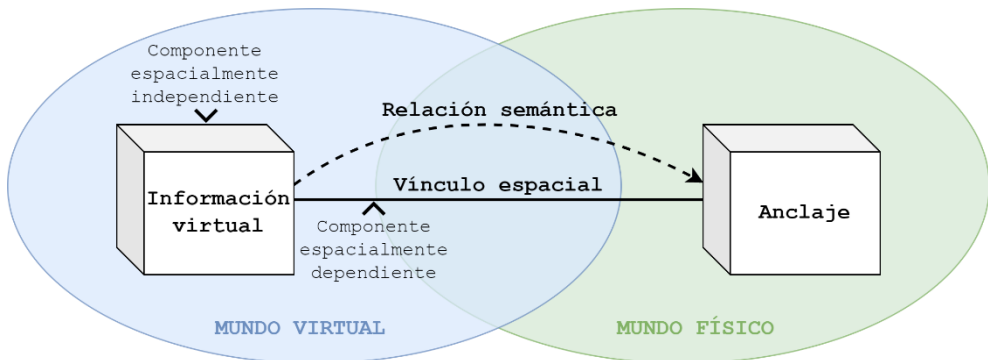


Figura 3.2. Componentes de una anotación de Realidad Aumentada representados sobre el mundo físico y el mundo virtual

3.2. Características

Una vez establecida una definición clara de las anotaciones de Realidad Aumentada, es necesario analizar cada una de las características, dimensiones o retos que, en el último siglo, han ido aportando diferentes autores. Para ello, se estudian en los siguientes apartados las contribuciones que se han considerado más relevantes, que son: (Hansen, 2006; Keil et al., 2018; Müller, 2019; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009). Además de extraer todas las características aportadas en dichos trabajos, se analizan también las interrelaciones existentes entre ellas.

3.2.1. Las seis dimensiones de Wither et al.

Además de la definición revisada en la sección anterior, en (Wither et al., 2009), los autores presentan seis dimensiones ortogonales que sirven para describir las anotaciones y clasificarlas de una forma más concreta:

- **Complejidad de la ubicación** de la información virtual en el mundo físico. La obligatoriedad de tener algún componente espacialmente dependiente hace que toda anotación tenga una ubicación asociada. Sin embargo, la complejidad de esta ubicación puede variar mucho de una anotación a otra. En el extremo más sencillo, está la ubicación que consiste en un único punto 3D, lo que implica que tiene información de la posición, pero no de la orientación. El siguiente paso en la complejidad de la ubicación de una anotación es, por tanto, añadir la orientación a la posición. En el extremo de mayor complejidad, se encuentran las anotaciones que son ubicadas en una región 2D o 3D o, incluso, utilizando un modelo 3D.
- **Movimiento de la ubicación** de la parte virtual de la anotación (no del elemento físico anotado ni de las animaciones que contenga la información virtual). La libertad de movimiento de la información virtual y la distancia a la que puede estar de su anclaje dependen de la aplicación y, en su caso, de las preferencias del usuario.
- **Relevancia semántica.** Indica cuán relacionada está la información virtual de una anotación con su anclaje. Los descriptores que proporcionan una información más directa sobre el elemento anotado y, por tanto, tienen una mayor relevancia semántica son los que lo nombran o describen. Por el contrario, aquellos descriptores que agregan información, modifican el elemento físico anotado o dirigen al usuario suelen proporcionar una información que no está directamente relacionada con el anclaje y, por tanto, su relevancia semántica es menor. A continuación, se describen y ejemplifican estos descriptores:
 - Nombran: la información virtual simplemente proporciona un nombre para el elemento anotado.
 - Describen: la información virtual proporciona más información que únicamente el nombre del elemento anotado. Suele ser una descripción textual.
 - Agregan: el contenido virtual proporcionado por la anotación cambia el mundo físico de algún modo, en lugar de simplemente añadir información (por ejemplo: un sofá añadido a una habitación

- o un edificio completo superpuesto a uno en construcción o en ruinas).
- **Modifican:** anotaciones que cambian visualmente los objetos existentes. Un ejemplo claro son las técnicas de visión de rayos X (para ver, por ejemplo, lo que hay detrás de una pared gracias a la Realidad Aumentada) y las guías históricas que modifican edificios u obras de arte para que aparezca lo que había en el pasado. No hay que confundir entre agregar información a un edificio en ruinas o en construcción, que sería el caso del descriptor anterior, y modificar la apariencia de un edificio ya terminado.
 - **Dirigen:** anotaciones que dirigen al usuario a un destino determinado, ya sea trazando una ruta hacia ese destino o señalando mediante flechas u otros elementos indicativos el objeto anotado al que el usuario debe dirigir su atención.
- **Complejidad del contenido.** Esta dimensión puede variar mucho de unas anotaciones a otras: desde la que es sólo un punto que marca algún objeto de interés hasta aquella cuyo contenido es un modelo 3D animado y con sonido. La complejidad del contenido se puede determinar tanto por la cantidad de información que transmite la anotación al usuario como por la propia complejidad visual de la anotación.
 - **Interactividad.** Wither et al. diferencian entre cuatro niveles de interactividad:
 - Anotaciones que se crean fuera de línea y son estáticas durante todo el uso de la aplicación: el usuario sólo las puede ver, pero sin manipularlas.
 - Anotaciones interactivas, pero no editables: el usuario puede manipularlas, pero no puede modificarlas ni añadirles información.
 - Anotaciones que se pueden editar en línea: existe una interacción directa ya que el usuario puede modificar el contenido existente o agregar contenido nuevo a las anotaciones creadas anteriormente.
 - Anotaciones que los usuarios pueden crear al usar el sistema, eligiendo no sólo el contenido sino también su ubicación.

- **Permanencia de la anotación.** Una anotación no siempre tiene porqué estar visible para el usuario, como en los casos en los que se desea evitar la sobrecarga de información. Los autores enumeran cinco estrategias básicas para controlar la permanencia de una anotación, que son:
 - Anotaciones permanentes: las anotaciones son siempre visibles.
 - Permanencia controlada temporalmente: las anotaciones sólo son visibles durante cierto tiempo y, a menudo, se ordenan temporalmente. Esta estrategia suele utilizarse en anotaciones que son instrucciones o guías de una secuencia de pasos.
 - Permanencia controlada espacialmente: las anotaciones sólo son visibles cuando el usuario se encuentra en una determinada ubicación.
 - Permanencia controlada por el usuario: es el usuario el que controla directamente qué anotaciones son visibles en cada momento.
 - Permanencia filtrada de la información: las anotaciones se filtran en función de un sistema único definido específicamente para cada aplicación. Este filtrado implica priorizar unas anotaciones sobre otras dependiendo del estado actual de la aplicación y del usuario.

Resumen de las seis dimensiones descritas en (Wither et al., 2009)

La información virtual de una anotación tiene que tener una ubicación, ya sea una coordenada o una región en el espacio (**complejidad de la ubicación**). Además, puede tener cierto grado de libertad de movimiento en relación a esa ubicación (**movimiento de la ubicación**). La parte virtual de la anotación proporciona una determinada cantidad de información sobre el anclaje, es decir, sobre el mundo físico, ya sea de forma directa o indirecta (**relevancia semántica**). La **complejidad del contenido** de dicha información virtual puede variar mucho de unas anotaciones a otras, desde una simple marca hasta un detallado modelo 3D. Además, las anotaciones pueden ser visibles sólo en determinados momentos durante el uso de la Realidad Aumentada (**permanencia de la anotación**). Por último, el grado de interacción permitido al usuario con respecto a la anotación será determinante en el resultado final del sistema desarrollado (**interactividad**).

3.2.2. Los cuatro desafíos de Hansen

En su trabajo, Wither et al. compararon sus seis dimensiones de las anotaciones de Realidad Aumentada con los cuatro desafíos para las anotaciones ubicuas descritas tres años antes en (Hansen, 2006), que son:

- **Anclaje.** Un requisito básico para poder vincular información virtual a un elemento del mundo físico es que éste pueda identificarse. Las tecnologías que se pueden emplear para ello son variadas y su precisión es determinante a la hora de colocar con exactitud la información virtual de las anotaciones en relación con los objetos que anotan. Cuando la identificación y el anclaje son precisos, no es necesario describir el objeto anotado, por lo que se reduce el esfuerzo de creación de la anotación y su contenido. Aquí juega un papel fundamental la localización y el seguimiento tanto de los objetos y las anotaciones como de los usuarios, tal y como se explicó en el Apartado “2.2.3. Registro e integración de lo virtual en el espacio físico en tres dimensiones”.
- **Estructura.** El modelo de datos que utilizan las tecnologías de identificación para vincular la información virtual con los anclajes debe ser lo suficientemente general como para: 1) permitir que cualquier objeto que se haya identificado quede anotado y vinculado y 2) poder emplear diferentes técnicas de seguimiento (y combinaciones de ellas).
- **Presentación.** Hansen diferencia entre tres tipos de presentación de la información: anotaciones presentadas en el propio objeto anotado, anotaciones separadas del objeto anotado pero en su entorno y anotaciones separadas completamente del objeto anotado. Si combinamos esta clasificación con la de (Mackay, 1998) vista en el Apartado “2.2.1. Combinar lo real y lo virtual: dispositivos”, podemos dar los siguientes ejemplos genéricos:
 - Unidas. Se puede conseguir aumentando al usuario con gafas de Realidad Aumentada, aumentando el objeto con dispositivos de localización o identificación y aumentando el entorno con proyectores que presenten las anotaciones directamente en los objetos físicos.

- **Separadas.** Se puede hacer aumentando al usuario con un teléfono inteligente o una tableta o aumentando el entorno del usuario a través de cámaras y grandes pantallas.
- **Edición y creación.** Una gran parte de los sistemas de anotaciones de Realidad Aumentada únicamente permiten a los usuarios consultar la información que previamente ha sido cargada en el sistema. Sin embargo, en muchas ocasiones, sería deseable que el usuario pudiera también editar las anotaciones visualizadas o generar nuevas.

Resumen de los cuatro desafíos descritos en (Hansen, 2006)

A la hora de diseñar un sistema de anotaciones, hay que tener en cuenta las siguientes necesidades: identificación precisa de los **anclajes**, modelo de datos general (**estructura**), elección de los dispositivos en base a la **presentación** de la información virtual (unida o separada del anclaje) y posibilidad de **editar y crear** anotaciones en el sistema.

Como los propios Wither et al. señalan, los desafíos de Anclaje, Estructura y Presentación definidos por Hansen describen cómo y dónde se coloca una anotación con respecto al objeto que anota, por lo que se relacionan directamente con lo que ellos llaman Complejidad de la ubicación y Movimiento de la ubicación. Por su parte, el desafío de Hansen de Edición y creación se vincularía directamente con la dimensión de Interactividad de Wither et al. Por tanto, el trabajo de Hansen no tiene en consideración la información contenida en las propias anotaciones sino sólo su relación con los objetos anotados y con los usuarios. Wither et al., en cambio, añaden las dimensiones de Relevancia semántica, Complejidad del contenido y Permanencia de la anotación para poder evaluar el contenido de la anotación y su dimensión temporal. El diagrama de la Figura 3.3 muestra gráficamente estas relaciones, que ayudarán en la comprensión del análisis global de todas las características de las anotaciones de Realidad Aumentada que se realizará en la siguiente sección.

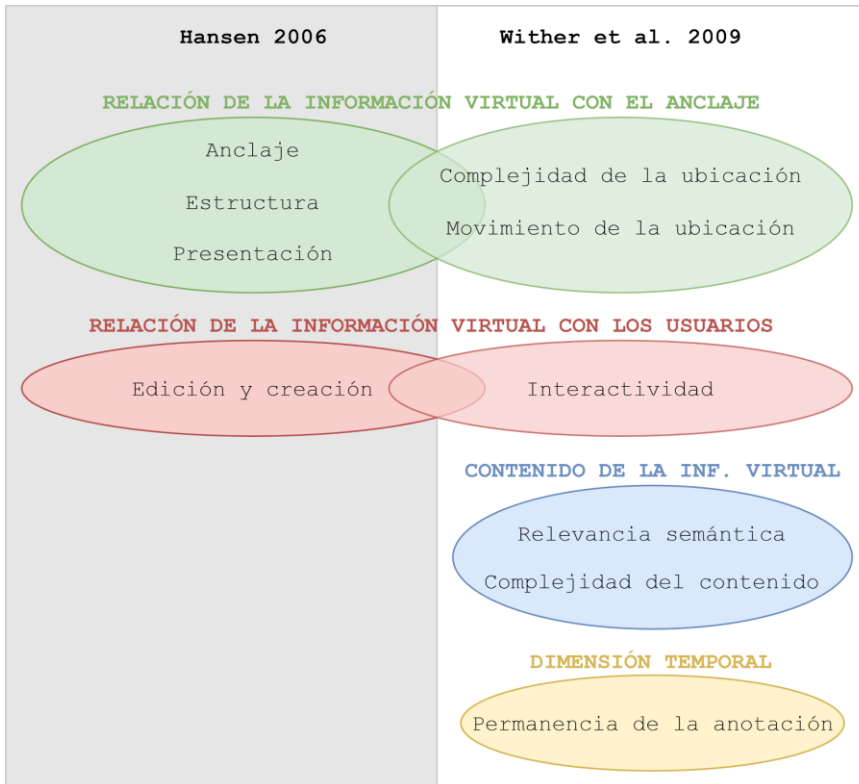


Figura 3.3. Interrelaciones entre los desafíos señalados por Hansen y las dimensiones descritas por Wither et al.

3.2.3. Las cinco dimensiones de Tönnis et al.

Analizados los trabajos (Hansen, 2006; Wither et al., 2009), se introducen a continuación las aportaciones de (Tönnis et al., 2013). En su estudio, los autores presentan cinco dimensiones que cubren los principios de representación de la información virtual en relación con el entorno físico (objetos, ubicaciones o eventos) mediante Realidad Aumentada. Por tanto, no se habla específicamente de anotaciones, pero su clasificación de las dimensiones de la información virtual complementa a la de Wither et al. y es extrapolable al ámbito que nos ocupa. Estas dimensiones son:

- **Temporalidad.** Depende de la existencia de la información virtual, independientemente de si está dentro del campo de visión o no. Los

autores diferencian entre dos tipos de representación de la información en base a su temporalidad:

- Continua: información representada permanentemente (por ejemplo: anotaciones que identifican las partes de un objeto, tanto si están siempre visibles para el usuario como si se muestran sólo cuando éste interactúa con el objeto).
- Discreta: información que existe ocasionalmente en el mundo aumentado, pues depende de eventos específicos (por ejemplo: anotaciones que se crean al completar un paso de una secuencia o al llegar a un punto en una ruta).
- **Dimensionalidad**. Métodos utilizados para visualizar e integrar la información virtual en el entorno físico. Los autores proponen dos clases:
 - 2D: presentación de información plana o simbólica que incluye anotaciones de texto 2D.
 - 3D: objetos virtuales con una apariencia más realista o naturalista.
- **Punto de vista**. Forma de representar la información virtual con respecto al punto de vista tanto del usuario como de la cámara virtual del sistema:
 - Primera persona (egocentric): presentación de la información aumentada desde el mismo punto de vista desde el que el usuario percibe el escenario físico, lo que suele aumentar la conciencia situacional y la orientación del usuario. Aunque en la mayoría de casos ésta es la representación que se desea conseguir, no siempre es fácil alcanzar una alineación exacta entre elementos virtuales y mundo físico debido a limitaciones técnicas. Además, cuando se trata de dispositivos de mano, la posición del ojo del usuario es diferente de la de la cámara que incorpora el dispositivo, aunque se podría decir que el usuario compensa mentalmente este desplazamiento y, por tanto, estas representaciones también se clasifican dentro de las de primera persona.
 - Tercera persona (exocentric): el punto de vista del usuario es diferente e independiente del punto de vista de la cámara virtual (por ejemplo: un pequeño mapa, orientado siempre al norte, en el que se muestra la ubicación del usuario).

- **Desplazado (*egomotion*):** el punto de vista de la cámara virtual es diferente del punto de vista del usuario pero está relacionado con él y ambos se mueven a la vez en la misma dirección (por ejemplo: el usuario ve información virtual de lo que hay debajo del suelo inclinando hacia éste su dispositivo móvil, sin necesidad de ponerlo completamente paralelo al suelo; en este caso, la cámara virtual fuerza un desplazamiento más acentuado del punto de vista hacia abajo pero sigue rotando de acuerdo con la información proporcionada por el giroscopio del dispositivo).
- **Montaje y registro.** Relación espacial entre la información virtual y el mundo físico.
 - **Montaje:** con qué se vincula la información virtual. Existen diferentes clases de montaje:
 - Usuario: la información virtual se adhiere a cualquier parte del cuerpo (generalmente cabeza, manos o torso) o a una zona que envuelve al usuario y se mueve con él.
 - Entorno: la posición de la información virtual depende de otro objeto físico cercano.
 - Mundo: la información virtual depende de un sistema de coordenadas general, por lo que tienen una posición fija.
 - Múltiple: combinaciones híbridas de las clases de montajes anteriores.
 - **Registro:** es la parte técnica del montaje, es decir: cómo determinar de forma precisa una ubicación del mundo físico (el anclaje) para situar la información virtual. Para que la información virtual aparezca en el lugar correcto y de forma estable es necesario disponer de suficientes recursos para realizar un seguimiento (*tracking*) fidedigno.
- **Tipo de referencia.** En qué medida un objeto virtual hace referencia a un objeto físico o a una ubicación. Esta dimensión depende de la visibilidad de los objetos físicos. Los autores diferencian tres tipos de referencias:
 - **Directas.** Los objetos físicos y su información aumentada se muestran directamente, son visibles para el usuario.

- Indirectas. La información virtual revela la existencia de objetos físicos ocultos.
- Puras. Los objetos virtuales proporcionan referencias a objetos físicos fuera del campo de visión del usuario.

Resumen de las cinco dimensiones descritas en (Tönnis et al., 2013)

La información virtual de una anotación puede tener una **temporalidad** continua (existe siempre, independientemente de si es visible para el usuario o no) o discreta (existe únicamente cuando se producen determinados eventos). Dicha información puede ser representada mediante elementos 2D o 3D (**dimensionalidad**) y desde diferentes **puntos de vista** (primera persona, tercera persona o desplazado). Además, para definir la ubicación de la información virtual, se puede utilizar como sistema de referencia el usuario, el entorno, el mundo o una combinación de ellos, para lo que se requiere realizar un seguimiento preciso (**montaje y registro**). Según la visibilidad del elemento del mundo físico que se está anotando (visible, oculto o fuera de campo), la información virtual hace **referencia** a él de una forma u otra (directa, indirecta o pura, respectivamente).

En su artículo, Tönnis et al. comparan sus dimensiones con las de Wither et al. Así, relacionan su dimensión de Temporalidad con la de Permanencia de la anotación de Wither et al. A pesar de ello, creemos que, aunque se trate de conceptos relacionados, será interesante estudiarlas por separado pues la clasificación de Wither et al. se basa en que una anotación no siempre tiene por qué estar visible para el usuario mientras que la de Tönnis et al. depende de la existencia de la anotación, independientemente de si está dentro del campo de visión o no. Por otro lado, Tönnis et al. relacionan su dimensión de Dimensionalidad con las de Relevancia semántica y Complejidad del contenido de Wither et al. Sin embargo, Tönnis et al. se limitan a diferenciar entre objetos de información 2D y 3D mientras que Wither et al. hacen una clasificación mucho más detallada, por lo que la Dimensionalidad de Tönnis et al. no será tenida en cuenta en el análisis que se realizará más adelante. La dimensión de Punto de vista es exclusiva de Tönnis et al. ya que es un concepto genérico de la Realidad Aumentada y no exclusivo de las anotaciones.

Por su parte, la dimensión de Montaje y registro tiene que ver con las dimensiones de Complejidad de la ubicación y Movimiento de la ubicación. No obstante, el Registro tiene que ver más con la parte técnica, por lo que no se tendrán en cuenta. El Montaje, en cambio, sí aporta conceptos sobre el sistema de referencia de la información virtual que complementan a los descritos por Wither et al. Por último, Tönnis et al. describen la dimensión de Tipo de referencia como un subconcepto dentro de la dimensión de Relevancia semántica de Wither et al., por lo que cabría estudiar si es preferible estudiar estas dos dimensiones juntas o por separado (Wither et al. se centra más en el tipo de descripción que la información virtual hace sobre el objeto anotado mientras que Tönnis et al. lo focaliza más en el tipo de referencia). El diagrama de la Figura 3.4 muestra todas estas relaciones de una forma más gráfica.

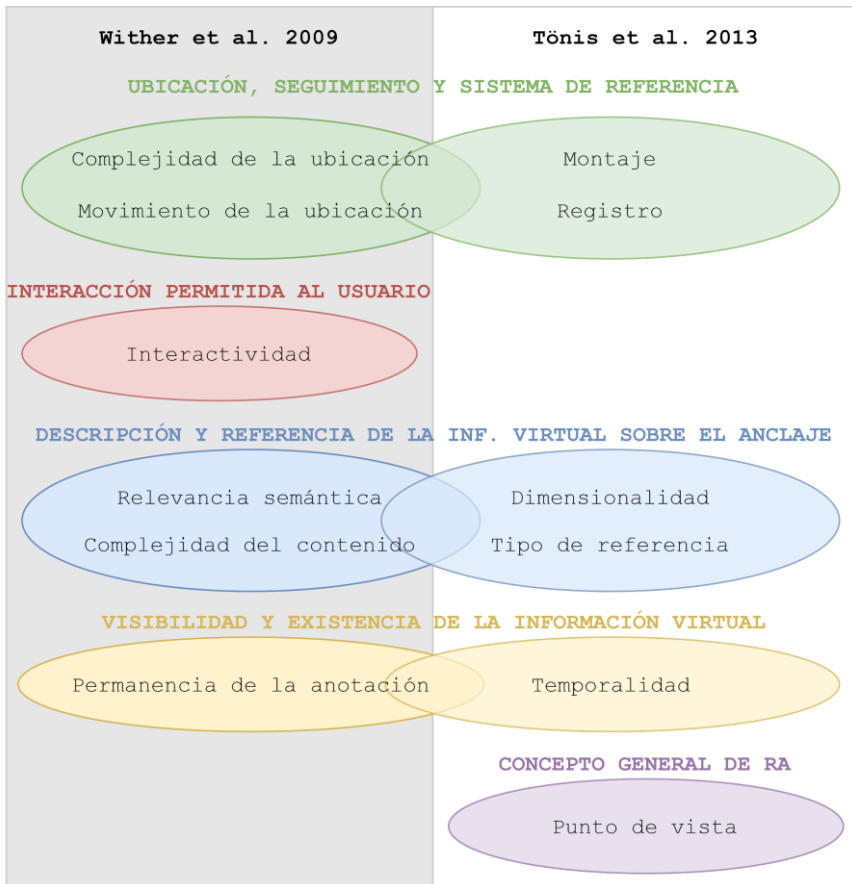


Figura 3.4. Interrelaciones entre las dimensiones de Wither et al. y Tönnis et al.

3.2.4. Las siete características de Müller

Para completar las dimensiones y los desafíos presentados por (Hansen, 2006; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009), es importante analizar también el reciente trabajo de (Müller, 2019). Su estudio se centra en cómo representar información mediante Realidad Aumentada para dar soporte en tareas de procedimiento manual. Aunque su trabajo habla, en general, de información y se centra en un uso muy concreto de la Realidad Aumentada, sus definiciones y clasificaciones pueden ser aplicadas al caso específico de las anotaciones. El autor parte de la necesidad de interacción del ser humano con los objetos para llevar a cabo tareas de procedimiento (mantenimiento, montaje, reparación...). Algunos de estos objetos tienen que ser manipulados (una pinza, por ejemplo), otros proporcionan información (manual de instrucciones) y otros tienen que ser manipulados a la vez que proporcionan información sobre ellos mismos (un tornillo con la cabeza visible indica qué tipo de destornillador necesita).

Así pues, Müller utiliza el concepto de “**objetos de información**” para referirse a todos aquellos objetos de una escena que transmiten información relevante para completar una tarea. Si al lado de la mesa donde se está trabajando hay un vaso de agua que no es necesario para el procedimiento a realizar, no será considerado como objeto de información sino como el “entorno”. También se consideraría parte del entorno a las piezas de una máquina que se está reparando que no se van a utilizar en ningún momento de la tarea actual. Los objetos de información se vinculan a una posición espacial de la escena y pueden conectarse a otros objetos de información, por ejemplo: una anotación de Realidad Aumentada que contiene información sobre un objeto físico. Esto significa que Müller, en su definición de objetos de información, no sólo contempla los objetos virtuales (como Wither et al. al definir la información virtual) sino también los objetos físicos. Teniendo esto en cuenta, clasifica los objetos de información en cinco categorías según su conexión espacial con el entorno:

- **Objetos de información físicos directos:** objetos de información del mundo físico que los usuarios ven directamente sin mediación de ningún dispositivo (herramientas, cables...).
- **Objetos de información físicos indirectos:** objetos de información del mundo físico que los usuarios visualizan de forma indirecta, por ejemplo: a

través de la pantalla de un dispositivo móvil (imágenes infrarrojas de un objeto físico, reproducciones de vídeo simples de objetos de información físicos directos...).

- **Objetos de información virtuales espaciales:** objetos de información que son virtuales y se posicionan en la escena de manera que crean un contexto espacial significativo. Esto significa que su posición y tamaño deben proporcionar información adicional a un usuario más allá del contenido del objeto de información (modelos 3D de piezas de construcción, cables virtuales superpuestos en paredes, animaciones de herramientas para mostrar su uso...).
- **Objetos de información virtuales referenciados espacialmente:** objetos de información que son virtuales y están anclados a un punto, un área u otro objeto de información del mundo físico. Su relación con el mundo físico no permite crear un contexto espacial significativo (etiquetas, marcadores de puntos de interés...).
- **Objetos de información virtuales separados:** objetos de información que son virtuales y que no tienen una conexión espacial (instrucciones generales de un paso de trabajo, indicadores de progreso...). Estos elementos no son parte de la Realidad Aumentada estrictamente hablando puesto que no cumplen con el requisito de que la información virtual ha de integrarse en el espacio 3D del mundo físico. A pesar de ello, los autores los consideran en su clasificación porque también transmiten parte de la información que un usuario necesita para completar una tarea de procedimiento.

Al analizar esta clasificación de Müller conjuntamente con la definición de Wither et al. de las anotaciones de Realidad Aumentada, se observa que no habría que tener en cuenta ni los objetos de información físicos directos (pues no tienen ningún componente espacialmente independiente) ni los objetos de información virtuales separados (pues no tienen ningún componente espacialmente dependiente). De este modo, en base al análisis de Müller, la información virtual de una anotación de Realidad Aumentada puede consistir en información física indirecta, virtual espacial o virtual referenciada espacialmente. Más adelante, se combinará esta clasificación con la llevada a cabo en (Keil et al., 2018) para tener

una visión final global de los diferentes tipos de anotaciones en base al contenido de su información virtual.

Aclarado el concepto de objeto de información, Müller describe sus cuatro características más relevantes, que son:

- **Relación espacial.** Los objetos de información están espacialmente relacionados y ubicados en el mundo físico, lo que implica un vínculo entre objetos físicos y virtuales y el registro de los objetos de información en unas coordenadas del espacio.
- **Conectividad.** Describe una conexión semántica que puede expresarse mediante una conexión espacial. Los diferentes tipos de objetos de información (excepto los virtuales separados) están conectados entre sí no sólo espacialmente sino también semánticamente.
- **Cambio discreto.** Los objetos de información (excepto los físicos directos) pueden estar sujetos a cambios a lo largo del tiempo.
- **Manipulabilidad.** Interactividad y edición de los objetos de información (excepto los físicos directos) mediante software.

Además, Müller añade otras tres características que hacen referencia a la integración de los objetos de información con el mundo físico:

- **Combinación.** La vista combinada que el usuario tiene de los objetos de información y del entorno varía en función de su propio punto de vista y, por tanto, no siempre es controlable (por ejemplo: la percepción del color de un objeto virtual variará en función del fondo que tenga en ese momento según la posición del usuario). Del mismo modo, el entorno puede cambiar haciendo que la apreciación de los objetos de información no sea todo lo clara y precisa que se pretendía.
- **Fluctuación.** Las dificultades para conseguir una alineación precisa y estable del mundo físico con el mundo virtual hacen que la combinación de los objetos de información, el entorno y el punto de vista se vea afectada por fluctuaciones no controlables.
- **Sistema de referencia.** Los objetos de información se pueden colocar y orientar utilizando sistemas de referencia diferentes a los utilizados para

ubicar sus anclajes. Incluso la posición y la orientación pueden usar sistemas diferentes (por ejemplo: un cartel se ubica en un punto fijo del mundo físico, pero se orienta siempre hacia la posición del usuario). Los autores diferencian dos tipos básicos de sistemas de referencia: los sistemas de coordenadas del mundo (todos los sistemas de referencia que son independientes del usuario) y los sistemas de coordenadas del espectador (aquellos que están vinculados al usuario).

Resumen de las siete características descritas en (Müller, 2019)

Los objetos virtuales y los objetos físicos han de tener una **relación espacial** entre sí y estar registrados en unas coordenadas. Para ello, pueden utilizar un **sistema de referencia** distinto cada uno de ellos. Los objetos de información han de estar conectados semánticamente entre sí (**conectividad**). Además, pueden sufrir **cambios discretos** a lo largo del tiempo y, gracias al software, se les proporciona la capacidad de la **manipulabilidad**. La **combinación** de los objetos de información con el mundo físico varía por los cambios que puede sufrir tanto el entorno como el punto de vista del usuario. Además, esta combinación se ve afectada por las **fluctuaciones** que se derivan de la dificultad de conseguir un seguimiento preciso y estable.

Las características descritas por Müller son mucho más genéricas y menos detalladas que las dimensiones presentadas por Wither et al. y Tönnis et al., aunque están relacionadas y aportan nuevos matices en determinados puntos. Así, la característica de Relación espacial, como el propio autor señala, se puede vincular con las dimensiones de Montaje y registro y de Tipo de referencia de Tönnis et al. y la de Complejidad de la ubicación de Wither et al.; las características de Manipulabilidad y de Conectividad están relacionadas con las dimensiones de Interactividad y de Relevancia semántica de Wither et al. respectivamente; y las características de Sistema de referencia y de Fluctuación se relacionan con el Montaje y el Registro de Tönnis et al. respectivamente. La única característica realmente nueva de Müller es la de Combinación. Esto se debe a que hace referencia a cómo se integran los elementos virtuales con el mundo físico y, por tanto, es genérica de la Realidad Aumentada y no específica de las anotaciones, tal y como ocurriría con la dimensión de Punto de vista de Tönnis et al. Por su parte, la característica de Cambio discreto, aunque se relaciona con los conceptos de

temporalidad de los otros autores, aporta un nuevo concepto no contemplado por ellos en sus taxonomías: la información virtual puede cambiar a lo largo del tiempo. El diagrama de la Figura 3.5 muestra de forma gráfica las relaciones mencionadas entre los tres trabajos.

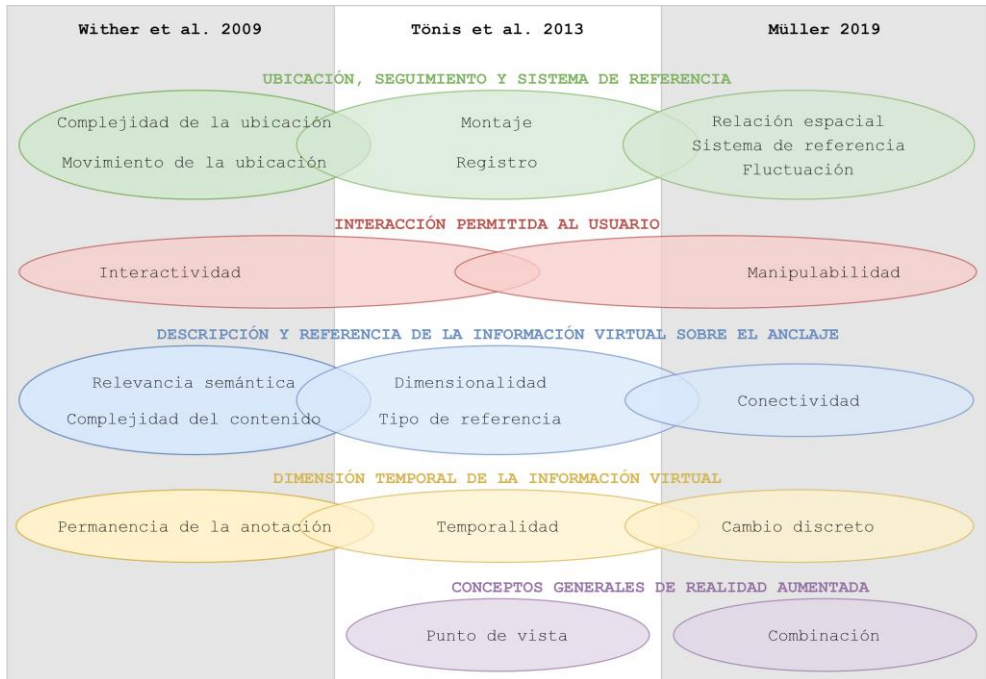


Figura 3.5. Interrelaciones entre las dimensiones de Wither et al. y Tönis et al. y las características señaladas por Müller

3.2.5. La clasificación de los elementos virtuales de Keil et al.

Las caracterizaciones genéricas vistas hasta ahora contrastan con otros trabajos que realizan clasificaciones a más bajo nivel, como es el caso de (Keil et al., 2018). El objetivo de este trabajo es describir, categorizar y organizar los elementos visuales de la Realidad Aumentada para posteriormente discutir el nivel de mediación que consiguen cada uno de ellos y su idoneidad según su contexto de utilización. Los elementos visuales identificados por Keil et al. son los siguientes:

- **Anotaciones y etiquetas.** Los autores parten de la definición de Wither et al. para describir estos elementos. Sin embargo, finalmente los reducen a dos únicas formas: (1) etiquetas unidas al anclaje mediante una línea y cuya

posición puede ser relativa al elemento anotado o fija en la pantalla y (2) elementos tipo iconos que se sitúan siempre en el anclaje, orientados hacia el usuario y que pueden comportarse como objetos que activan eventos o despliegan más información una vez se activan. Así pues, agrupan bajo esta categoría a los elementos que extienden el mundo físico agregándole información sin necesidad de que se ajusten visualmente al objeto aumentado (por ejemplo: un texto con el nombre de un edificio o un icono en Realidad Aumentada que sea un enlace a una web con información detallada del edificio). Por tanto, estos elementos sirven básicamente de marcadores, enlaces o contenedores de información textual dentro del espacio de Realidad Aumentada.

- **Highlights o resaltados.** Zonas, objetos o partes de objetos que son resaltados visualmente de manera muy convincente mediante el uso de su forma (por ejemplo: se ilumina un cajón de una mesa para atraer la atención del usuario sobre él). Existe, además, la posibilidad de animar los elementos destacados. Los resaltados también se pueden utilizar como indicadores de selección: los objetos físicos que son seleccionables digitalmente a través de la vista de Realidad Aumentada aparecen resaltados. Este tipo de elementos están cerca técnicamente de las anotaciones (de hecho, para Wither et al., son anotaciones) pero Keil et al. los diferencia de éstas porque su propósito no es extender el mundo físico sino enfatizarlo.
- **Ayudas, guías e indicadores visuales.** Elementos visuales complementarios, como flechas u otros señalizadores, o elementos de guía o indicadores metafóricos, como efectos de luz. Suelen ser *sprites* (mapa de bits) 2D o 3D o geometrías, animados o no, que se refieren o están anclados a puntos de interés particulares de un objeto. En términos técnicos están cerca de las anotaciones (de nuevo Wither et al. las consideran como tales) pero, en contraste con éstas y con los resaltados, comunican un significado más fuerte por sus propios medios. Su forma y, en su caso, su movimiento se ajustan a un objetivo de comunicación (por ejemplo: para esclarecer una dirección de atornillado) o enfatizan la precaución y la atención en determinados detalles que de otro modo pasarían desapercibidos para el usuario.

- **Rayos X.** Elementos aditivos que muestran estructuras ocultas, ocluidas o imperceptibles, como un objeto dentro de un cajón cerrado. La ilusión se crea eliminando artificialmente las partes oclusivas de los objetos del mundo físico. Estos elementos visuales revelan relaciones espaciales y semánticas entre objetos ocultos y visibles. Por tanto, son enriquecedores del mundo físico ya que no sólo lo extienden, sino que también crean significado inmediato.
- **Diagramas de despiece.** Elementos aditivos que muestran la relación o el orden de ensamblaje de varias partes de un objeto. Son bastante comunes en la Realidad Aumentada industrial ya que se utilizan para facilitar el proceso de ensamblar un objeto mentalmente y para mostrar las relaciones, los pasos de montaje y la estratificación de las partes de un objeto. El objetivo es, por tanto, estimular el proceso de cognición del usuario para crear un modelo mental de objetos complejos. Al igual que los anteriores, puede verse como una capa adicional que enriquece la escena actual. Para ello, hay que garantizar que el elemento virtual coexista de manera coherente con su homónimo físico, sin desorden, ambigüedad u oclusión. Además, los diagramas de despiece también pueden utilizarse para extender el mundo físico (por ejemplo: enlazando una pieza al sitio web donde puede comprarse su repuesto).
- **Material transmedia.** Material audiovisual que puede adoptar cualquier forma, desde *sprites* a secuencias de vídeo. Estos elementos se superponen en la vista del usuario y se alinean con el objeto físico y con el contexto de visualización (por ejemplo: material fotográfico histórico en 2D o el cambio de color virtual de piezas de arte históricas). Suelen utilizarse representaciones de tipo fantasma (semitransparentes) para evitar ocluir elementos del mundo físico. Estos elementos virtuales son, de nuevo, un enriquecimiento del mundo físico pero, en contraste con los anteriores, se combinan con éste con la pretensión de crear imágenes de alta inmersión, sin tener necesariamente muchos aspectos comunicativos.

La Figura 3.6 ilustra con ejemplos de diferentes trabajos cada uno de los tipos de elementos virtuales identificados por Keil et al. que pueden utilizarse para categorizar las anotaciones de Realidad Aumentada.

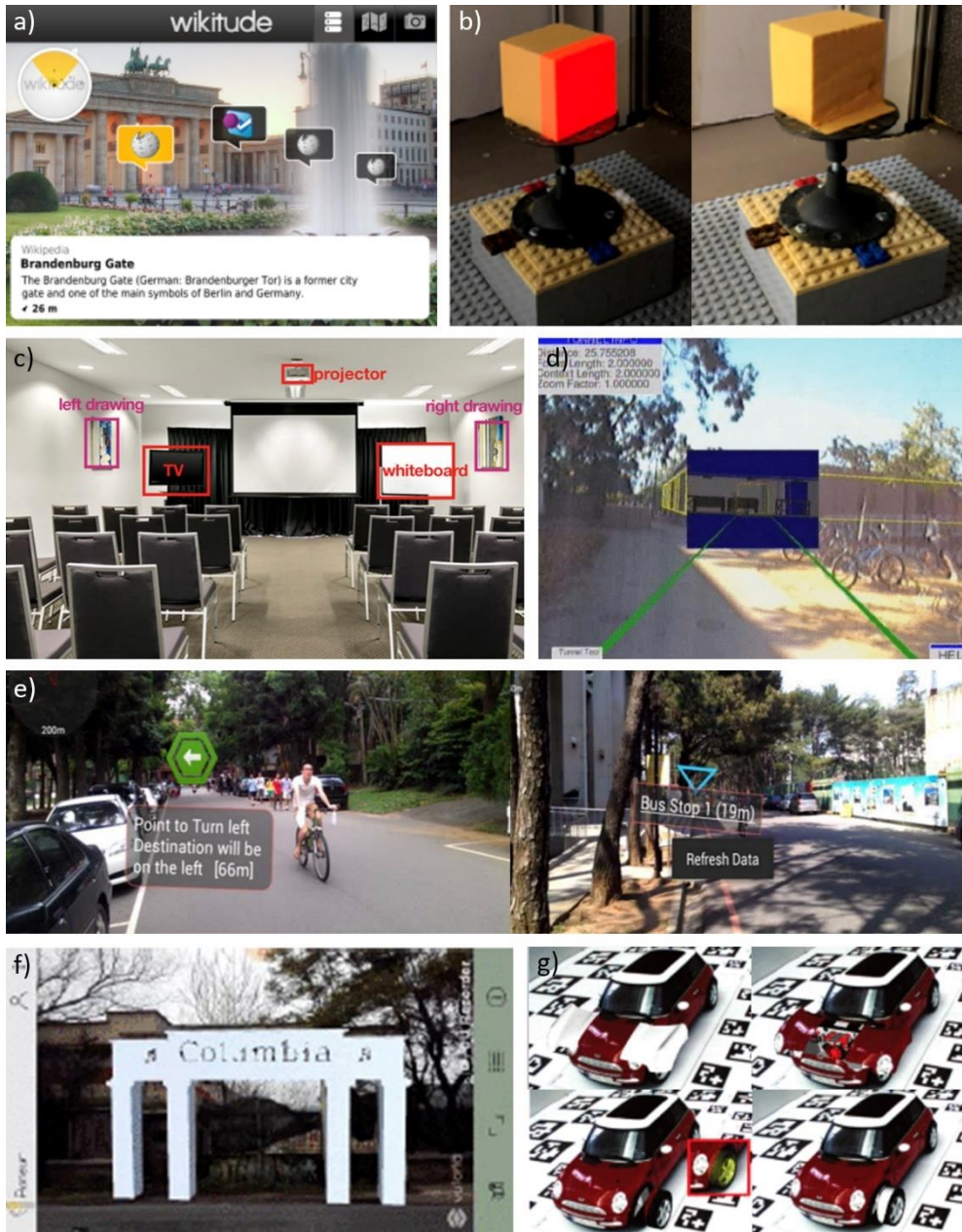


Figura 3.6. Ejemplos de los diferentes tipos de elementos virtuales identificados en (Keil et al., 2018): a) anotaciones (<https://www.wikitude.com/>), b) resaltados (Hattab & Taubin, 2019), c) etiquetas (Tong, 2018), d) rayos X (Bane & Hollerer, 2004), e) ayudas, guías e indicadores visuales (Brata & Liang, 2019), f) material transmedia (Ioannidi et al., 2017), g) diagrama de despiece (Kalkofen et al., 2009)

Como puede observarse, todos estos elementos virtuales descritos por Keil et al. entran dentro de la definición dada por Wither et al. para las anotaciones, siempre que tengan un componente espacialmente dependiente y otro independiente. Por tanto, si llamamos a la primera clasificación de Keil et al. “Iconos y etiquetas” (en lugar de “Anotaciones y etiquetas”), podemos usar esta taxonomía para categorizar de una forma más precisa las anotaciones descritas de forma genérica por Wither et al. Esta clasificación se haría, principalmente, en base al contenido de la anotación, por lo que se relaciona perfectamente con la dimensión de Complejidad del contenido descrita por Wither et al.

Además, estos elementos visuales identificados por Keil et al. pueden clasificarse dentro de las categorías de Müller vistas anteriormente que ordenan los objetos de información según su conexión espacial con el entorno. Así, tanto los Rayos X como los Resaltados y el Material transmedia se pueden clasificar como objetos de información físicos indirectos; los Diagramas de despiece son objetos de información virtuales espaciales; y tanto los Iconos y etiquetas como las Ayudas y guías visuales se engloban dentro de los objetos de información virtuales referenciados espacialmente. La clasificación de Keil et al. es más precisa que la de Müller, que resulta demasiado abstracta y subjetiva, por lo que será la que se usará en el modelo de datos de este trabajo.

En su trabajo, Keil et al. también puntualizan que no todos los elementos virtuales de la Realidad Aumentada tienen la misma importancia ni se encuentran con las mismas dificultades a la hora de ser implementados. Consideran que los Iconos y etiquetas son los más importantes en aplicaciones industriales debido, principalmente, a que son fáciles de generar técnicamente hablando. Además, son elementos bien elaborados y útiles. Es por ello que hay que tener especial cuidado en su utilización ya que un mal uso provocaría fácilmente desorden y ambigüedad, entorpeciendo la ayuda que en un principio estaban destinados a proporcionar. Aunque generalmente son menos atractivos estéticamente que otro tipo de anotaciones más elaboradas, son muy relevantes en términos de interacción y de mediación. Junto con los Iconos y las etiquetas, los autores clasifican también de elementos visuales elaborados a los Resaltados y a las Ayudas visuales. Los resaltes de contornos permiten enfatizar visualmente y, a su vez, suelen ser atractivos y discretos. Sin embargo, cuando el elemento a resaltar es demasiado pequeño, es más eficiente utilizar ayudas visuales.

En cambio, los Rayos X y los Diagramas de despiece suelen ser más difíciles de comprender ya que están compuestos por varios elementos y toda la escena se adapta a un propósito comunicativo. Además, este propósito sólo será bien comunicado si los elementos virtuales se alinean e integran con el mundo físico lo suficientemente bien (por ejemplo: se mantiene la percepción de profundidad en los rayos X o se usa una geometría de oclusión adecuada).

Con el Material transmedia, si se incorpora algún elemento de interacción en vez de utilizar la Realidad Aumentada únicamente como mera presentación de información, se puede mejorar la experiencia del usuario. Se trata de elementos de superposición más ricos y atractivos visualmente hablando siempre que estén bien hechos e integrados.

Teniendo claro los diferentes tipos de anotaciones que se pueden incorporar a un sistema de Realidad Aumentada, con sus correspondientes características, ventajas e inconvenientes, Keil et al. definen tres objetivos básicos que se pueden conseguir gracias a ellas. Así pues, los desarrolladores deberán optar por un tipo u otro de anotaciones en función de cuál sea la finalidad de la aplicación que se esté diseñando, es decir: en función de qué se quiere hacer en la vista de Realidad Aumentada y qué se quiere conseguir con ella. Estos tres posibles objetivos, según los autores, son:

- **Extender el mundo físico.** El dispositivo de Realidad Aumentada actúa como puente entre lo físico y lo virtual y los vincula de forma inmediata. El valor agregado se encuentra en la facilidad de conexión de la información virtual con los objetos físicos que, de otra forma, requeriría que los usuarios buscasen dicha información manualmente en fuentes externas. La interacción con el dispositivo ayuda a clasificar, filtrar o facilitar el acceso a la información a través de anotaciones de tipo Iconos y etiquetas. Esto crea una experiencia que reduce enormemente la brecha entre lo físico y lo virtual.
- **Enfatizar el mundo físico.** Resaltando o enfatizando las partes relevantes del mundo físico, se ayuda a identificar los aspectos importantes y a focalizarse en ellos. Tanto los Resaltados como las Ayudas, guías e indicadores visuales cumplen con este objetivo.

- **Enriquecer el mundo físico.** Las anotaciones más elaboradas permiten al usuario sumergirse en la vista de la Realidad Aumentada y percibirla, junto con el mundo físico, como un todo. En este sentido, los Rayos X, los Diagramas de despiece o el Material transmedia son más que una extensión o énfasis del mundo físico ya que permiten revelar lo invisible, restaurar, reconstruir o mezclar lo físico y lo virtual de una forma bastante convincente. Además, permiten representar diferentes estados temporales de un objeto o escenario físico.

Estos objetivos están íntimamente relacionados con la dimensión de Relevancia semántica de la que hablaban Wither et al. Así, según se quiera extender, enfatizar o enriquecer el mundo, se deberá elegir un tipo u otro de descriptor que nombre, describa, agregue, modifique o dirija. Por ejemplo: si se utilizan anotaciones de tipo Rayos X, se estará enriqueciendo el mundo físico mediante un descriptor que modifica visualmente el elemento anotado; o, si lo que se quiere es extender el mundo físico mediante la descripción del anclaje, se puede utilizar una anotación de tipo Etiqueta. El diagrama de la Figura 3.7 muestra de forma gráfica cómo se vinculan los elementos visuales de Keil et al. con los objetos de información de Müller y su relación con las dimensiones de Wither et al.

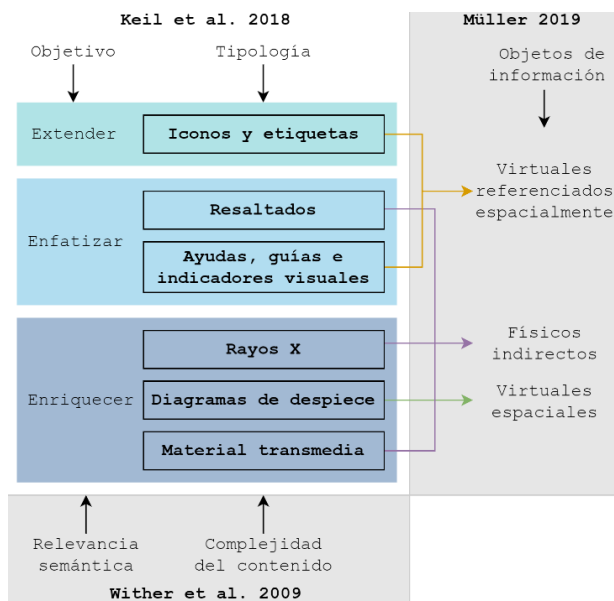


Figura 3.7. Interrelaciones entre los elementos visuales de Keil et al., los objetos de información de Müller y las dimensiones de Wither et al.

3.3. Clasificación y síntesis

Una vez revisadas las contribuciones más importantes sobre las características aplicables a las anotaciones de Realidad Aumentada, así como las interrelaciones que se pueden establecer entre ellas, hay que analizarlas en su conjunto para poder obtener un modelo único que reúna toda esta información. Tal y como se ha descrito a lo largo de la sección anterior, las propuestas analizadas se complementan entre sí, pero a menudo la información se superpone y se repite. El siguiente paso es decidir qué características se seleccionan, cuáles se combinan y cuáles se descartan. El objetivo de esta tarea de síntesis es obtener un modelo de datos capaz de caracterizar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada.

Todas las conexiones conceptuales obtenidas al cruzar las características, dimensiones o desafíos descritos en los trabajos analizados en la sección anterior quedan reflejadas en la Figura 3.8.

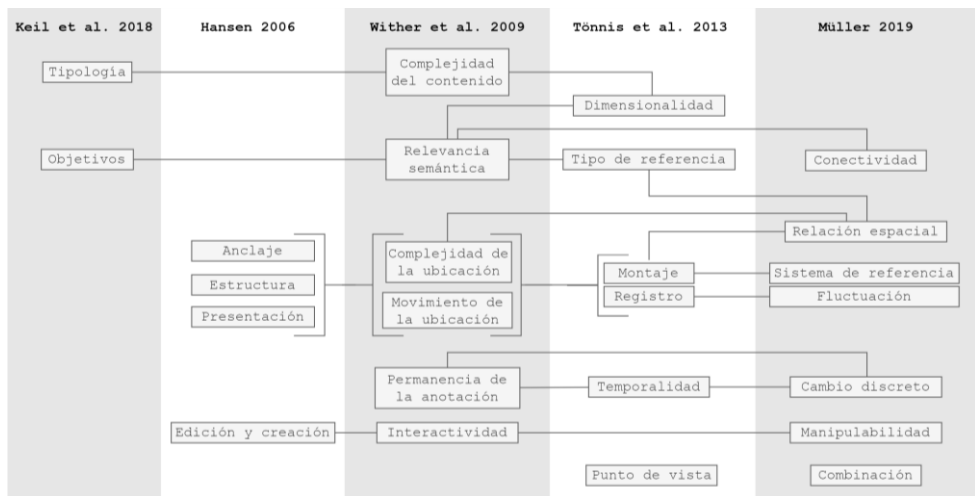


Figura 3.8. Relación conceptual existente entre las características extraídas de (Hansen, 2006; Keil et al., 2018; Müller, 2019; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009) sobre anotaciones de Realidad Aumentada

A partir del análisis de todas estas interrelaciones, se han clasificado las características y dimensiones descritas por cada autor en base al tipo de información que aportan sobre las anotaciones. En la Figura 3.9 se han marcado en diferentes colores las características según la categoría a la que pertenecen, dejando sin color aquellas que no aportan ningún concepto nuevo y que, por tanto,

quedan recogidas en lo que otros autores ya han explicado. Las características azules hacen referencia a conceptos relacionados con el contenido de las anotaciones, las verdes tienen que ver con la dimensión espacial, las amarillas con la dimensión temporal y la roja con la interactividad. Estos cuatro ejes se explican en profundidad en la siguiente sección. Las tres características marcadas en morado son conceptos genéricos de Realidad Aumentada, por lo que no se incluirán como específicas de las anotaciones. Las de color verde oscuro tienen que ver más con la parte técnica del registro y seguimiento, tanto hardware como software, que con la parte conceptual del mismo, por lo que no formarán parte del modelo de datos.

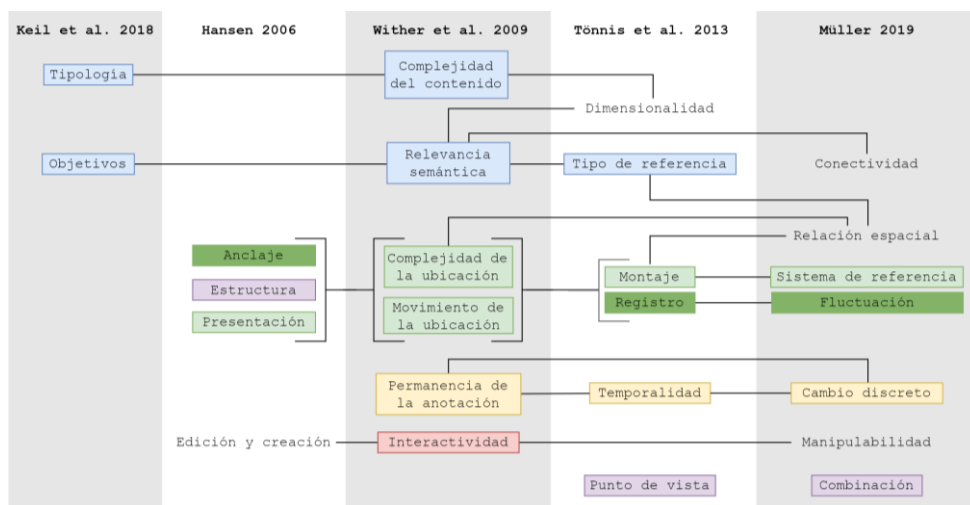


Figura 3.9. Clasificación de las características extraídas de (Hansen, 2006; Keil et al., 2018; Müller, 2019; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009) sobre anotaciones de Realidad Aumentada

Clasificadas y analizadas todas las características, se han eliminado aquellas que resultan redundantes o que pueden ser incluidas en otras más genéricas. Además, se han modificado algunas interrelaciones para identificar qué características se van a tratar unidas y cuáles por separado. La Figura 3.10 muestra el resultado de este análisis, siguiendo el mismo código de color que la Figura 3.9.

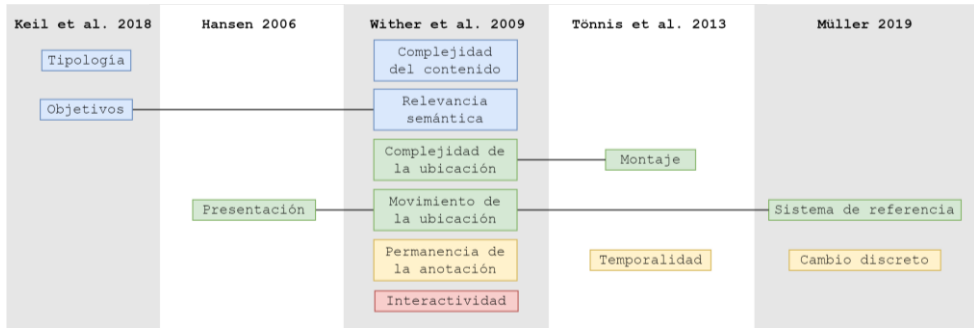


Figura 3.10. Síntesis de las características extraídas de (Hansen, 2006; Keil et al., 2018; Müller, 2019; Tönnis et al., 2013; Wither et al., 2009) sobre anotaciones de Realidad Aumentada

A continuación, se detalla cada una de las decisiones tomadas para pasar de la clasificación de la Figura 3.9 a la síntesis de la Figura 3.10. En el tercio superior de las figuras, se sitúan las características que hacen referencia a conceptos relacionados con el contenido de las anotaciones, la mayoría en azul. Como se vio en la sección anterior, la Dimensionalidad de Tönnis et al. se limita a diferenciar entre información virtual en 2D o en 3D. Esta clasificación queda explicada y ampliada de una forma más detallada tanto en la Complejidad del contenido de Wither et al. como en la Tipología de Keil et al. Es por ello que no se tendrá en cuenta como tal en el modelo de datos sino que se incluirá en las aportaciones de los otros dos autores. Por el contrario, las citadas dimensiones de Complejidad del contenido y Tipología aportan conceptos relacionados pero que no se solapan entre sí, sino que son complementarios. Es decir: cada una de las tipologías descritas por Keil et al. pueden presentar una complejidad del contenido diferente. Es por ello que se ha decidido tratar estos dos conceptos de forma separada.

Por su parte, la Conectividad de Müller únicamente indica que la información virtual ha de estar conectada semánticamente con su anclaje. Esta misma idea es tratada de una forma más exhaustiva por Wither et al. bajo el concepto de Relevancia semántica, por lo que también ha sido eliminada en la síntesis de la Figura 3.10. En cuanto al Tipo de referencia de Tönnis et al., aunque aporta conceptos interesantes sobre la visibilidad de los anclajes y la referencia que de éstos hace la información virtual, se trata de un concepto transversal que abarca tanto ideas tratadas en la Tipología de Keil et al. como en la Presentación de Hansen, por lo que también ha sido eliminada. Por último, se observa que los

Objetivos de Keil et al. y la Relevancia semántica de Wither et al. han quedado relacionados para ser tratados de forma conjunta ya que ambos hacen referencia a la funcionalidad de la anotación.

En la parte central de las Figuras 3.9 y 3.10, se encuentran las características verdes, que tienen que ver con la dimensión espacial de las anotaciones de Realidad Aumentada. La Relación espacial de Müller se ha eliminado pues no es más que una reafirmación de la necesidad de que toda anotación debe tener un componente espacialmente dependiente para ser considerada como tal. Por su parte, la Complejidad de la ubicación de Wither et al. y el Montaje de Tönnis et al. se mantienen unidos puesto que ambos aportan matices diferentes sobre un mismo concepto: la complejidad de la ubicación del anclaje y el sistema de referencia que utiliza. Lo mismo ocurre con la Presentación de Hansen, el Movimiento de la ubicación de Wither et al. y el Sistema de referencia de Müller: los tres conceptos se pueden tratar de forma conjunta puesto que versan sobre la distancia y libertad de movimiento de la ubicación de la información virtual y el sistema de referencia utilizado.

Las tres características amarillas describen la dimensión temporal de las anotaciones y todas se van a tratar por separado puesto que transmiten ideas diferentes y complementarias. La Permanencia de la anotación de Wither et al. describe las diferentes estrategias que se pueden seguir a la hora de decidir cuándo una anotación es visible para el usuario y cuando no. Por su parte, la Temporalidad de Tönnis et al. diferencia entre las anotaciones que existen de forma permanente y las que sólo existen cuando ocurren determinados eventos, independientemente de si son visibles o no para el usuario. Finalmente, el Cambio discreto de Müller tiene en consideración que la información virtual puede cambiar a lo largo del tiempo.

Por último, la Interactividad de Wither et al., marcada en rojo, queda como única representante de esta categoría puesto que tanto la Edición y creación de Hansen como la Manipulabilidad de Müller no aportan ninguna información que no quede ya descrita en la dimensión de Wither et al.

3.4. Caracterización

En base a la síntesis y clasificación de las características de las anotaciones de Realidad Aumentada expuesta en la sección anterior, se propone a continuación una caracterización que engloba las propiedades fundamentales que hay que definir durante el proceso de diseño de cualquier anotación de Realidad Aumentada. Como se expuso en el capítulo anterior, estos elementos virtuales son uno de los usos más comunes del paradigma de Realidad Aumentada, por lo que disponer de una caracterización de los mismos es fundamental para el desarrollo de sistemas robustos, flexibles y escalables. En la caracterización propuesta en esta tesis, se agrupan las diferentes características de las anotaciones en torno a cuatro ejes: el **contenido**, la **ubicación** (tanto del anclaje como de la información virtual), la **temporalidad** y el grado de **interacción** que se le va a permitir al usuario con respecto a las anotaciones. La Figura 3.11 muestra de forma resumida esta caracterización, que se describe detalladamente a continuación.

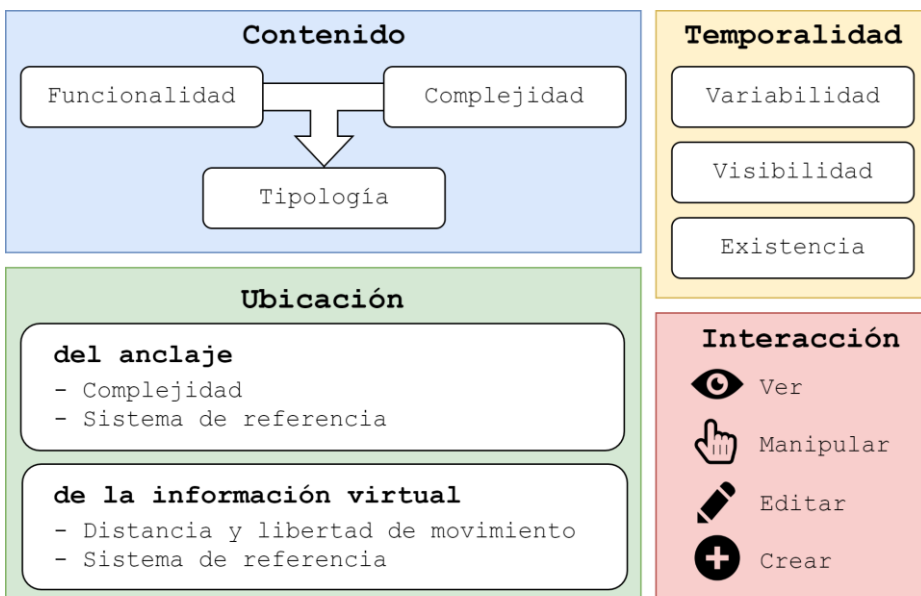


Figura 3.11. Caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada

Contenido

Para diseñar el contenido de una anotación, es fundamental definir, por un lado, su **funcionalidad**. Para ello, hay que establecer el objetivo del sistema de Realidad Aumentada que se está desarrollando. Este objetivo puede ser: extender el mundo físico, enfatizarlo o enriquecerlo (o una combinación de alguno de ellos). En base al objetivo seleccionado, se deberá optar por descriptores con una mayor o menor relevancia semántica, es decir: por anotaciones que nombran, describen, agregan información, modifican el elemento físico anotado o dirigen al usuario.

Por otro lado, hay que determinar el grado de **complejidad** que se le quiere dar a la información virtual, atendiendo tanto a la cantidad de información que contendrá como a su composición visual (desde un punto en el espacio hasta un modelo 3D animado y con sonido).

Delimitados estos dos aspectos, se puede elegir el **tipo** de anotación que se va a desarrollar: etiquetas, iconos, resaltados, ayudas, guías, indicadores, rayos X, diagramas de despiece o material transmedia.

Ubicación

Además del contenido, es fundamental hacer un buen diseño de la dimensión espacial de la anotación. Para ello, hay que definir la **ubicación del anclaje** y la **ubicación de la información virtual**. Ambas se regirán por un **sistema de referencia** que no necesariamente han de compartir, por ejemplo: el anclaje de una anotación puede utilizar las coordenadas del mundo mientras que la información virtual puede usar las coordenadas del usuario y moverse junto a él. Además, la información virtual puede usar un sistema de referencia para la posición y otro diferente para la orientación, por ejemplo: una etiqueta que se sitúa en un punto fijo del mundo pero está siempre orientada hacia el usuario. Así pues, los posibles sistemas de referencia que pueden utilizar tanto los anclajes como la información virtual son: usuario, elemento físico y mundo.

Además del sistema de referencia, hay que determinar cuál será la **complejidad** de la ubicación del anclaje, ya que puede ir desde un punto con tres o seis grados de libertad hasta una ubicación definida por un modelo 3D pasando por anotaciones ubicadas en una región 2D o 3D.

Por su parte, la ubicación de la información virtual debe tener delimitada tanto su **libertad de movimiento** como la **distancia** a la que puede estar de su anclaje. Según esta distancia y las características de la aplicación que se esté desarrollando, puede ser necesario trazar una línea o conector entre información virtual y anclaje.

Temporalidad

En la dimensión temporal de la aplicación, hay que tener en cuenta tres aspectos fundamentales. El primero de ellos es la **variabilidad**, es decir: cuánto cambia la información virtual a lo largo del tiempo. Aunque parezca obvio, es importante tener presente este aspecto a la hora de desarrollar un sistema de Realidad Aumentada, pues no es lo mismo diseñar una anotación cuya información sea siempre fija que una cuyo contenido varía durante el uso de la aplicación.

El segundo aspecto es la **visibilidad**, ya que una anotación no tiene por qué estar siempre visible para el usuario. Existen cinco estrategias para controlar la visibilidad de las anotaciones: fija (la información virtual es siempre visible), temporal (sólo son visibles en determinados momentos y durante cierto tiempo), espacial (son visibles cuando el usuario se sitúa en una ubicación determinada), a demanda (es el usuario el que controla qué anotación es visible en cada momento) y filtrada (la visibilidad de la anotación depende del estado actual de la aplicación y del usuario).

El tercer aspecto a considerar en cuanto a la temporalidad de una anotación es su propia **existencia**, es decir: si la información virtual existe de forma constante (tanto si es siempre visible para el usuario como si sólo se muestra en determinadas circunstancias) o si, por el contrario, sólo existe como consecuencia de determinados eventos. En el primer caso hablamos de una temporalidad continua mientras que en el segundo se trata de una temporalidad discreta.

Interacción

Por último, en la fase de diseño de una anotación de Realidad Aumentada, hay que determinar el grado de **interacción** que se le va a permitir al usuario. Para ello, habrá que elegir entre: anotaciones que se crean fuera de líneas y que son estáticas (se pueden ver pero no manipular); anotaciones que sí se pueden manipular pero no se pueden editar; anotaciones que se pueden editar; y anotaciones que son creadas en línea por los propios usuarios, quienes eligen su contenido y ubicación.

3.5. Modelo de datos

Gracias a la caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada propuesta en la sección anterior, ha sido posible desarrollar un modelo de datos que admite cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada, independientemente de sus características y de los dispositivos utilizados tanto para su implementación como para su visualización. En una primera fase de análisis, se ha desarrollado un modelo de alto nivel mediante un diagrama de clases UML. Posteriormente, se ha diseñado un diagrama de clases mucho más detallado, con atributos y estereotipos, que concreta los conceptos expuestos en el diagrama de la fase de análisis. Finalmente, se ha generado un documento de esquema XML para la implementación directa de las anotaciones de Realidad Aumentada.

3.5.1. Diagrama de clases

Para el diseño del diagrama de clases de una anotación de Realidad Aumentada, se ha utilizado uno de los lenguajes de modelado de sistemas software más utilizado actualmente, el Lenguaje Unificado de Modelado (UML, *Unified Modeling Language*). Este lenguaje es, desde 1997, el estándar establecido por el OMG (*Object Management Group*). A partir de la caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada en torno a cuatro ejes mostrada en la Figura 3.11, se ha diseñado el diagrama de clases UML de la Figura 3.12. Se trata de una versión en alto nivel que se extenderá en el siguiente apartado.

La clase principal del modelo propuesto es *Anotación*, que tiene como atributos, entre otros, un objeto de las siguientes clases: *Ubicación del anclaje*, *Ubicación de la información virtual*, *Contenido* y *Visibilidad*. Además, las anotaciones editables tienen una colección de objetos *Anotación* cuyo propósito es almacenar el historial de cambios. Otros atributos importantes de esta clase son el autor y la fecha de creación. Si su temporalidad es discreta en vez de continua, también tendrá los métodos necesarios para administrar la suscripción a determinados eventos de la aplicación. La clase *Visibilidad* permite gestionar la permanencia de la anotación, ya sea fija, temporal, espacial, bajo demanda o filtrada.

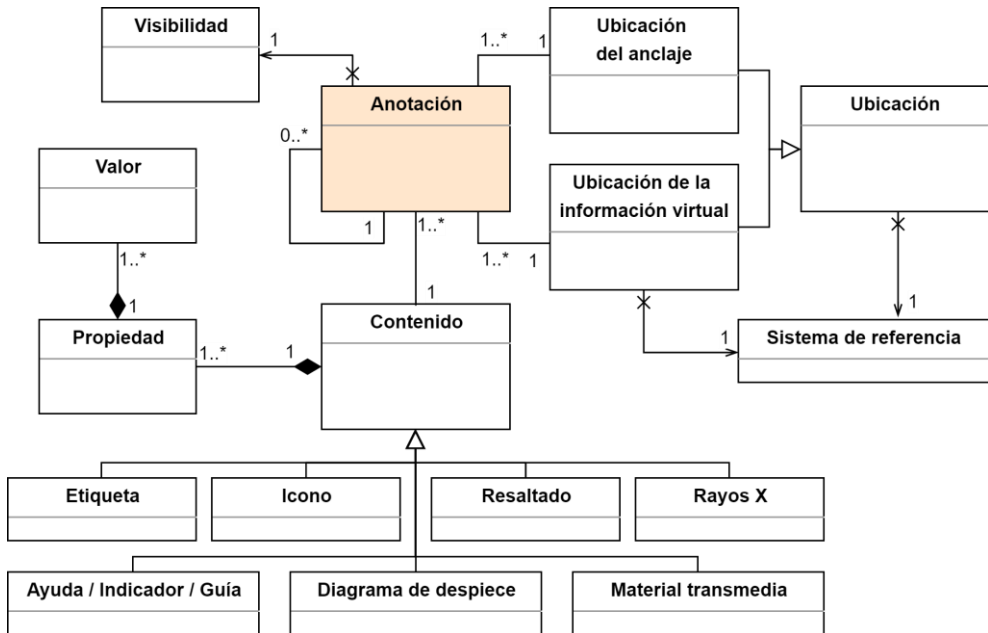


Figura 3.12. Diagrama de clases simplificado de una anotación de Realidad Aumentada

Las clases Ubicación del anclaje y Ubicación de la información virtual heredan sus atributos de la clase abstracta Ubicación. Uno de ellos es un objeto Sistema de referencia para gestionar la posición del anclaje y de la información virtual, respectivamente. Además, el objeto Ubicación del anclaje tiene un atributo para almacenar las coordenadas que permiten que el anclaje se coloque correctamente en función del sistema de referencia elegido. Estas coordenadas pueden ser desde un simple punto en el espacio hasta una compleja nube de puntos. El objeto Ubicación de la información virtual tiene un atributo adicional de la clase Sistema de referencia para conocer la orientación de la información virtual. Además, tiene atributos para almacenar la distancia mínima y máxima de la información virtual al anclaje y/o al usuario y, en el caso de existir, la unión visual de la información virtual con el anclaje. Con estas cuatro clases se puede implementar el eje Ubicación de la caracterización propuesta en la sección anterior.

Dependiendo de la complejidad y funcionalidad de la anotación que se va a implementar, los diseñadores deben elegir entre una clase u otra: Etiqueta, Icono, Resaltado, Rayos X, Ayuda/Indicador/Guía, Diagrama de

explosión o `Material` transmedia. Todas estas clases heredan de la clase `Contenido`, que requiere que los desarrolladores definan un conjunto de pares clave-valor. En el modelo de datos propuesto, esto se define mediante un conjunto de objetos `Propiedad` dentro de la clase `Contenido`. Esta clase `Propiedad`, además de los atributos `id` y `nombre`, tiene un conjunto de objetos `Valor`, con sus respectivos atributos `id` y `valor`. De esta manera, cualquier tipo de anotación se puede implementar en función de una lista de propiedades, incluso si su información virtual es variable en el tiempo o si permite al usuario interactuar con ella. Con estas diez clases se puede implementar el eje `Contenido` de la caracterización propuesta en la sección anterior.

Por su parte, el eje `Temporalidad` queda definido mediante la clase `Visibilidad`, la clase `Anotación` (para la característica `Existencia`) y las clases `Propiedad` y `Valor` (para la característica `Variabilidad`). El eje `Interacción` puede ser implementado haciendo uso de las clases `Anotación`, `Propiedad` y `Valor`.

3.5.2. Documento de esquema XML

Para poder utilizar el modelo teórico presentado hasta ahora en el desarrollo de sistemas de Realidad Aumentada, es necesario transformarlo en un modelo de datos que permita su implementación directa. Para ello, se va a generar un documento de esquema XML (del inglés *eXtensible Markup Language*, Lenguaje de Marcado Extensible) a partir del diagrama de clases UML.

XML es un metalenguaje que permite definir lenguajes de marcas para aplicaciones específicas. Un lenguaje de marcas o de marcado es una forma de codificar un documento mediante la incorporación de marcas o etiquetas que contienen información adicional acerca de la estructura del texto o de su presentación. XML sirve para representar información estructurada de modo que pueda ser almacenada, transmitida, procesada, visualizada e impresa por diferentes tipos de aplicaciones y dispositivos.

El **esquema XML** (*XML Schema*) o XSD (del inglés *XML Schema Definition*), recomendación del *World Wide Web Consortium* (W3C), es un lenguaje de esquemas escrito en XML que permite restringir la estructura y los tipos de datos de los documentos XML. A diferencia de las tradicionales DTD (Definición de Tipo de Documento), el esquema XML utiliza sintaxis XML, permite especificar tipos de

datos y crear nuevos, posibilita la creación de nuevos elementos y admite el uso de espacios de nombres o *namespaces*. Así pues, el esquema XML es una solución a los problemas de modelado que están fuera del alcance de las DTD, por lo que se ha elegido para desarrollar el modelo de datos de las anotaciones de Realidad Aumentada que se presenta en este documento. Actualmente se encuentra en la versión 1.1.

Cuando se hace uso del esquema XML para una aplicación específica, se crea un **documento de esquema XML**. Sin embargo, es muy habitual utilizar de forma generalizada la expresión “esquema XML” para referirse no sólo al lenguaje sino también a los documentos de esquema XML, es decir: un documento XML que sigue las especificaciones del lenguaje esquema XML.

Como cualquier documento XML, un documento de esquema XML comienza con una declaración XML (el prólogo) y va seguida de la declaración del elemento raíz del documento que, en el caso concreto de los documentos de esquema XML, ha de ser *schema*, como muestra el Código 3.1. Dentro de la raíz, se han de incluir todas las definiciones y declaraciones que conforman el contenido del documento XML (el cuerpo). Cada uno de los elementos que componen el cuerpo tiene un prefijo que lo asocia a uno de los espacios de nombres que aparecen en el prólogo. Por convención, se usa el prefijo *xs* para diferenciar el vocabulario del lenguaje esquema XML de otros vocabularios que estén siendo utilizados.

```
<!--Prólogo-->
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!--Cuerpo-->
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
</xs:schema>
```

Código 3.1. Prólogo y cuerpo base de un documento de esquema XML

Además de la documentación oficial del W3C (*W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures*, s. f.; *W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 2: Datatypes*, s. f.), en (Nava & Carrera, 2004) puede leerse en detalle las particularidades del lenguaje esquema XML, con sus tipos de componentes y de datos, la definición de tipos simples y complejos, la declaración de atributos y de elementos, etc. En este apartado, se siguen algunos procedimientos detallados en dicho trabajo para convertir un diagrama de clases UML en un documento de esquema XML. A continuación, se resumen los elementos más importantes del

esquema XML (*XSD elements*) que serán utilizados para confeccionar el documento de esquema XML de las anotaciones de Realidad Aumentada (*XML Schema Reference*, s. f.):

- **simpleType**. Define un tipo simple y especifica restricciones e información de valores de atributos o elementos de solo texto.
- **complexType**. Define un elemento de tipo complejo, esto es: un elemento XML que contiene otros elementos y/o atributos.
- **simpleContent**. Contiene extensiones o restricciones en un tipo complejo de solo texto o en un tipo simple como contenido y no contiene elementos.
- **complexContent**. Define extensiones o restricciones en un tipo complejo que contiene contenido mixto o sólo elementos.
- **element**. Define un elemento (un elemento XML es todo lo que hay desde una etiqueta de inicio hasta su correspondiente etiqueta final, incluidas ambas etiquetas, por ejemplo: <persona>).
- **attribute**. Define un atributo (los atributos contienen datos relacionados con el elemento XML al que acompañan y deben ir entre comillas, por ejemplo: <persona edad="30">, donde edad sería un atributo del elemento persona).
- **all**. Especifica que sus elementos hijos pueden aparecer en cualquier orden y 0 o 1 vez (en XSD 1.1 se ha quitado esta restricción y pueden aparecer 0 o más veces).
- **sequence**. Especifica que cada elemento hijo puede aparecer 0 a más veces, pero en el orden especificado.
- **restriction**. Define restricciones en un simpleType, simpleContent o complexType.
- **enumeration**. Define una lista de valores aceptables.
- **list**. Define un elemento de tipo simple como una lista de valores de un tipo de dato especificado (útil para atributos de tipo vector).
- **union**. Define un elemento de tipo simple como una colección de valores de los tipos de datos simples especificados (útil para atributos que pueden adoptar diferentes tipos).

Existen diversas herramientas que convierten automáticamente un diagrama de clases UML en un documento de esquema XML, entre ellas el conocido software Visual Paradigm (*Ideal Modeling & Diagramming Tool for Agile Team Collaboration*, s. f.). Sin embargo, los resultados que ofrecen no son del todo satisfactorios. Por ejemplo: convierten todos los atributos de las clases en elementos de tipo `element`, en vez de en `attribute`, no especifican los valores de una clase de tipo enumeración, no elaboran tipos de datos simples como listas o con restricciones específicas, etc. Aún con estos y otros inconvenientes, el documento de esquema XML que ofrece Visual Paradigm tras la conversión automática de un diagrama de clases bien detallado es bastante completo y sirve como base de trabajo.

Así pues, para obtener un documento de esquema XML haciendo uso de Visual Paradigm, el primer paso consiste en detallar todos los atributos, estereotipos y relaciones del diagrama de clases UML presentado en el apartado anterior. La Figura 3.13 muestra el resultado. Se ha decidido utilizar el inglés pensando ya en la futura implementación del sistema. Así mismo, el nombre de las clases comienza ahora por minúscula para seguir la convención de los documentos XML, en los que se acostumbra a nombrar de este modo los elementos que lo componen. Por otro lado, se han especificado o modificado todas las multiplicidades necesarias, los tipos de datos de los atributos, su visibilidad, la navegabilidad y las relaciones entre clases. A continuación, se detallan los cambios concretos que han sufrido algunas clases y su justificación:

- A las clases `visibility` y `referenceSystem` se les ha añadido el estereotipo `enumeration` ya que su finalidad es especificar, en las clases que las utilizan, un valor concreto dentro de una lista cerrada de posibilidades. Además, este tipo de clases son fácilmente ampliables si se desean añadir nuevos tipos en el futuro.
- Se ha suprimido la herencia de la clase `content` y se han convertido sus hijos en una única clase de tipo enumeración: `contentType`. Lo que diferencia un tipo de anotación de otro es su contenido y éste viene definido por sus propiedades. Es por ello que lo único que especificaban todas estas clases hijas de `content` era el tipo de anotación, lo que es mucho más práctico de indicar mediante una lista de tipos predefinidos fácilmente modificable.

- Se ha suprimido la clase `Ubicación`, pues sólo propaga un atributo a sus hijos y, por claridad en el XML, se ha decidido incorporar dicho atributo como propio de las clases `anchoringLocation` y `virtualInformationLocation`, en vez de heredarlo de `Ubicación`.
- Se ha eliminado la clase `Valor` pues, incorporando su contenido a la clase `property`, el XML resultante es más claro.
- Se ha añadido la clase `anchoringVirtInfConexion` que permite definir, si es necesario, una línea que una visualmente la información virtual de una anotación con su anclaje. Sus atributos son: `init` y `end` (para indicar el tipo de puntas que tiene la línea: flecha, círculo, nada...), `colour`, `thickness`, `transparency` y `dotted` (para establecer el tipo de punteado).

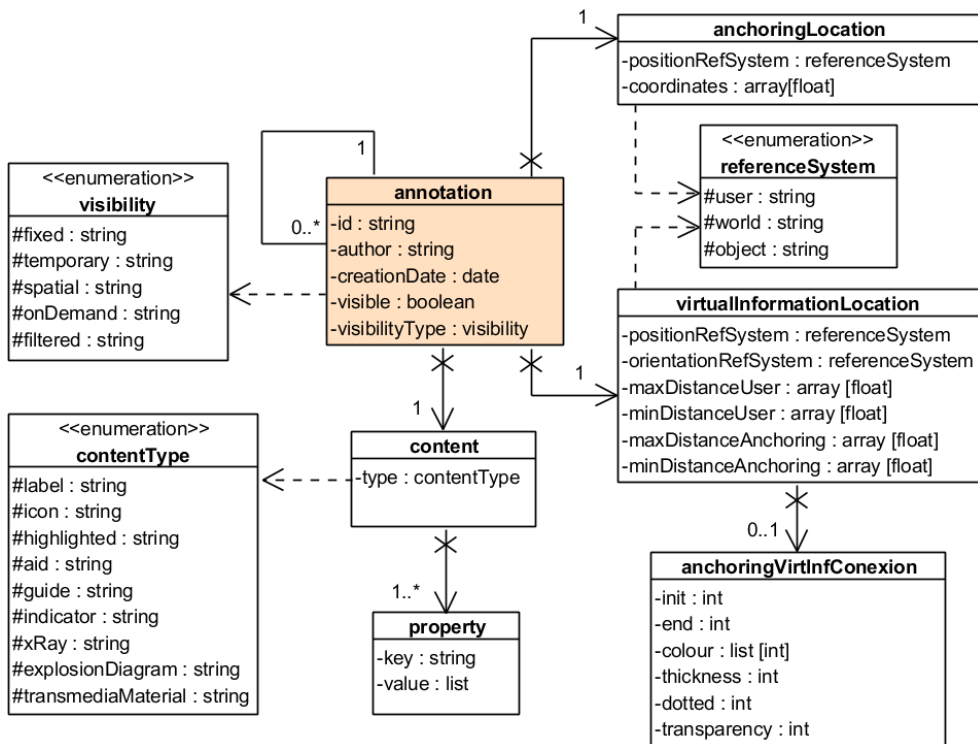


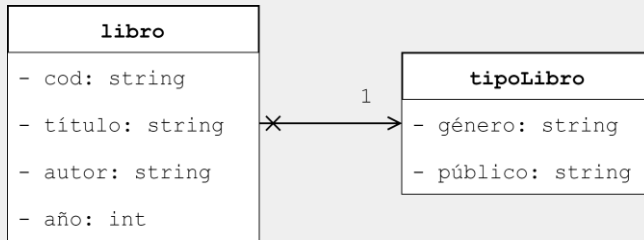
Figura 3.13. Diagrama de clases con atributos y estereotipos de una anotación de Realidad Aumentada

Con el diagrama de clases detallado, hay que proceder a convertir cada clase, con sus relaciones, en un componente dentro del documento de esquema XML haciendo uso de reglas específicas. Una **clase** se puede representar de diferentes formas con el esquema XML pero generalmente se hace mediante el uso del elemento `complexType` (o `simpleType` en determinadas circunstancias). Sin embargo, hay que tener en cuenta que son los elementos de tipo `element` y no los tipos complejos los que pueden ser instanciados en un documento XML. Así pues, las clases que se definen como tipos complejos para poder formar parte de la definición de otras clases, no es necesario que sean de tipo `element` pero el resto sí. El Código 3.2 presenta un ejemplo con dos clases: `libro` y `tipoLibro`. En los documentos XML que utilicen estas clases será necesario instanciar elementos `libro` pero no `tipoLibro`, ya que `tipoLibro` se convierte en un atributo de la clase `libro`. Es por ello que, en el documento de esquema XML presentado en este ejemplo, tanto `libro` como `tipoLibro` se definen como `complexType` pero sólo `libro` es también un `element`.

En el modelo de datos de las anotaciones de Realidad Aumentada que se desarrolla en este trabajo, sólo la clase `annotation` ha de ser instanciada. El resto de clases serán definidas como tipos complejos que serán utilizados por la propia definición de la clase `annotation`.

Además de la conversión de las clases de UML a XML, hay que decidir cómo transformar los **atributos** de dichas clases. Los atributos de una clase pueden representarse tanto con elementos `element` como con `attribute`. Esta decisión se hace en base al resultado que se quiere obtener posteriormente en los documentos XML que utilicen el esquema diseñado. En este trabajo, sólo se va a usar `attribute` para atributos de tipo identificador (como ID, nombre o tipo). Para el resto se utilizará `element`. De esta forma, el documento XML resultante es más sencillo de leer y de procesar tanto de manera visual como por parte de los analizadores sintácticos o *parsers*, como ilustra el Código 3.3. En él, los atributos de la clase `persona` se han implementado de dos formas distintas en XML: en `persona1` todos los atributos se han transformado en `attribute` mientras que en `persona2` el atributo que actúa de identificador es un `attribute` y el resto son `element`.

Diagrama de clases UML:



Documento de esquema XML:

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="libro">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element name="título" type="xs:string"/>
        <xs:element name="autor" type="xs:string"/>
        <xs:element name="año" type="xs:int"/>
        <xs:element name="tipo" type="tipoLibro"/>
      </xs:sequence>
      <xs:attribute name="cod" type="xs:string"/>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:complexType name="tipoLibro">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="género" type="xs:string"/>
      <xs:element name="público" type="xs:string"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:schema>
  
```

Documento XML válido:

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<libro cod="383402SIG">
  <título>Lady Tyger</título>
  <autor>Silvia Cruz Lapeña</autor>
  <año>2020</año>
  <tipo>
    <género>Biografía</género>
    <público>Adulto</público>
  </tipo>
</libro>
  
```

Código 3.2. Conversión de dos clases UML a XML mediante la utilización de los elementos complexType y element

Diagrama de clases UML:

persona
- DNI: string
- nombre: string
- apellido: string
- edad: int

Documento de esquema XML:

```
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:complexType name="persona1">
    <xs:attribute name="DNI" type="xs:string"/>
    <xs:attribute name="nombre" type="xs:string"/>
    <xs:attribute name="apellido" type="xs:string"/>
    <xs:attribute name="edad" type="xs:int"/>
  </xs:complexType>
  <xs:complexType name="persona2">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="nombre" type="xs:string"/>
      <xs:element name="apellido" type="xs:string"/>
      <xs:element name="edad" type="xs:int"/>
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="DNI" type="xs:string"/>
  </xs:complexType>
  <xs:element name="personas">
    <xs:complexType>
      <xs:all>
        <xs:element name="persona1" type="persona1"/>
        <xs:element name="persona2" type="persona2"/>
      </xs:all>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>
```

Documento XML válido:

```
<personas>
  <persona1 DNI="12345678A" nombre="Sergio"
    apellido="Leal" edad="38"/>
  <persona2 DNI="12345678A">
    <nombre>Sergio</nombre>
    <apellido>Leal</apellido>
    <edad>38</edad>
  </persona2>
</personas>
```

Código 3.3. Conversión de los atributos de una clase UML a XML mediante dos usos diferentes de los elementos `attribute` y `element`

Aunque el uso de `element` y `attribute` es muy similar, hay que tener en cuenta algunas particularidades a la hora de utilizarlos:

- Ambos elementos comparten, entre otros, los siguientes atributos opcionales: `default` (para inicializarlos con un valor por defecto), `fixed` (para asignarles un valor fijo) o `type` (para declarar su tipo de datos).
- Los elementos de tipo `attribute` pueden aparecer 0 o 1 vez. Para ello, cuentan con el atributo opcional `use` que especifica si dicho elemento es `optional` (este es el valor por defecto e indica que su uso es opcional), `required` (para especificar que es obligatorio usarlo) o `prohibited` (si no se puede utilizar).
- Los elementos de tipo `element` pueden aparecer 0 o más veces. Para ello, se utilizan los atributos `minOccurs` y `maxOccurs` que especifican, respectivamente, el número mínimos y máximo de veces que dicho elemento puede aparecer dentro del elemento padre. El valor por defecto en ambos casos es 1 y pueden tomar cualquier valor mayor o igual que 0 (o `unbounded` para indicar que es ilimitado).

Cuando se declara un atributo en un documento de esquema XML, ya sea mediante `element` o mediante `attribute`, hay que especificar su tipo de dato. Éste puede ser simple (`string`, `float`, `boolean`, `date`...) o complejo (definido en el propio documento de esquema XML), como se ha visto en los códigos de ejemplo anteriores. Existe, además, una tercera posibilidad que es derivar un tipo simple mediante lista, restricción o unión. Gracias al elemento `list`, se pueden definir tipos de dato vector. Con `restriction`, se permite acotar los valores que puede tomar un atributo (valor máximo o mínimo, valor fijo, tamaño, patrón...). Por su parte, `union` permite que un atributo pueda adoptar diferentes tipos de dato (por ejemplo, `int` y `string`). El Código 3.4 muestra un ejemplo de cada uno de ellos.

Por su parte, las clases de tipo **enumeración** presentan ciertas particularidades a la hora de ser representadas mediante XML. En un documento de esquema XML, una clase con el estereotipo enumeración (*enumeration* o *enum*) se declara mediante un elemento `simpleType`. Dentro de éste, se declara un elemento `restriction` cuyo atributo `base` tomará el valor del tipo de dato declarado en la clase. Cada uno de los atributos de la clase se agregan al elemento

`restriction` como hijos de tipo `enumeration` con el valor establecido en el diagrama UML. El Código 3.5 muestra un ejemplo de clase con el estereotipo enumeración y su uso como atributo de otra clase.

Documento de esquema XML:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="enteros">
    <xs:simpleType>
      <xs:list itemType="xs:integer"/>
    </xs:simpleType>
  </xs:element>
  <xs:element name="edad">
    <xs:simpleType>
      <xs:restriction base="xs:integer">
        <xs:minInclusive value="0"/>
        <xs:maxInclusive value="99"/>
      </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
  </xs:element>
  <xs:element name="talla">
    <xs:simpleType>
      <xs:union memberTypes="xs:int xs:string"/>
    </xs:simpleType>
  </xs:element>
  <xs:element name="ejemplo">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="enteros"/>
        <xs:element ref="edad"/>
        <xs:element ref="talla" maxOccurs="unbounded"/>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>
```

Documento XML válido:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<ejemplo>
  <enteros>2 7 10</enteros>
  <edad>45</edad>
  <talla>42</talla>
  <talla>mediana</talla>
</ejemplo>
```

Código 3.4. Ejemplo de uso de los elementos XML `list`, `restriction` y `union`



Código 3.5. Conversión de UML a XML de una clase de tipo enumeración

Además de la representación de los diferentes tipos de clases y de sus atributos, hay que decidir cuál será el elemento raíz de los documentos XML que se generen a partir del esquema definido. La declaración del **elemento raíz** está compuesta por el conjunto de declaraciones de los elementos que conforman cada documento

XML generado. Esta declaración debe incluir la referencia al elemento que define la clase principal del diagrama UML con multiplicidad de 1 a muchos. Por convención, la declaración del elemento raíz aparece al final de todas las definiciones y declaraciones del documento de esquema XML. En el modelo de datos que aquí se está desarrollando, el elemento raíz es `annotations` y está compuesto por un número ilimitado de elementos `annotation`, como muestra el Código 3.6.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="annotations">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="annotation" maxOccurs="unbounded"/>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>
```

Código 3.6. Declaración del elemento raíz del documento de esquema XML de las anotaciones de Realidad Aumentada

Tras aplicar todas las reglas descritas en este apartado para transformar el diagrama de clases UML de la Figura 3.13 en un documento de esquema XML lo más preciso y detallado posible, se ha obtenido el esquema que se muestra en el Código 3.7. Para que su lectura sea más clara, se ha añadido el sufijo `Class` al nombre de los tipos complejos que definen a las clases principales y el sufijo `Enum` a los tipos simples que definen a las clases de tipo enumeración. Primero se encuentran las definiciones de las clases principales, luego las enumeraciones y luego la declaración de otros tipos de datos necesarios. El esquema se cierra con la declaración de los elementos instanciables y del elemento raíz. Gracias a este documento de esquema XML, se pretende posibilitar la generación de documentos XML capaces de representar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada con todas las características definidas en las secciones anteriores y sintetizadas en la Figura 3.11.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <!--Classes-->
  <xs:complexType name="annotationClass">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="author" type="xs:string"
        minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="creationDate" type="xs:date"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="visible" type="xs:boolean"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="visibilityType" type="visibilityEnum"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="anchoringLocation"
        type="anchoringLocationClass"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="virtualInformationLocation"
        type="virtualInformationLocationClass"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="content" type="contentClass"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="editionsHistory"
        type="listOfAnnotations"
        minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="id" type="xs:string" use="required"/>
  </xs:complexType>
  <xs:complexType name="anchoringLocationClass">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="positionRefSystem"
        type="referenceSystemEnum"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="coordinates" type="listOfCoordinates"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
  <xs:complexType name="virtualInformationLocationClass">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="positionRefSystem"
        type="referenceSystemEnum"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="orientationRefSystem"
        type="referenceSystemEnum"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="maxDistanceUser"
        type="listOfCoordinates"

```

```

        minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
<xs:element name="minDistanceUser"
    type="listOfCoordinates"
    minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
<xs:element name="maxDistanceAnchoring"
    type="listOfCoordinates"
    minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
<xs:element name="minDistanceAnchoring"
    type="listOfCoordinates"
    minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
<xs:element name="anchoringVirtInfConexion"
    type="anchoringVirtInfConexionClass"
    minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:complexType name="anchoringVirtInfConexionClass">
<xs:sequence>
    <xs:element name="init" type="xs:int"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="end" type="xs:int"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="colour" type="listOf3Rgb"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="thickness" type="xs:int"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="dotted" type="xs:int"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="transparency" type="xs:int"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:complexType name="contentClass">
<xs:sequence>
    <xs:element name="property" type="propertyClass"
        minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
</xs:sequence>
<xs:attribute name="type" type="contentTypeEnum"
    use="required"/>
</xs:complexType>
<xs:complexType name="propertyClass">
<xs:sequence>
    <xs:element name="value" type="valueType"
        minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
</xs:sequence>
<xs:attribute name="key" type="xs:string"
    use="required"/>
</xs:complexType>

```

```

<!--Enumerations-->
<xs:simpleType name="visibilityEnum">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="fixed"/>
    <xs:enumeration value="temporary"/>
    <xs:enumeration value="spatial"/>
    <xs:enumeration value="onDemand"/>
    <xs:enumeration value="filtered"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="referenceSystemEnum">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="user"/>
    <xs:enumeration value="world"/>
    <xs:enumeration value="object"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="contentTypeEnum">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="label"/>
    <xs:enumeration value="icon"/>
    <xs:enumeration value="highlight"/>
    <xs:enumeration value="aid"/>
    <xs:enumeration value="guide"/>
    <xs:enumeration value="indicator"/>
    <xs:enumeration value="xRay"/>
    <xs:enumeration value="explosionDiagram"/>
    <xs:enumeration value="transmediaMaterial"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<!--Other definitions of data types-->
<xs:complexType name="listOfAnnotations">
  <xs:sequence>
    <xs:element ref="annotation" minOccurs="1"
      maxOccurs="unbounded"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:simpleType name="listOfCoordinates">
  <xs:list itemType="xs:float"/>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="listOf3Rgb">
  <xs:restriction base="listOfRgb">
    <xs:length value="3"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="listOfRgb">
  <xs:list itemType="rgb"/>

```



```

</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="rgb">
  <xs:restriction base="xs:integer">
    <xs:minInclusive value="0"/>
    <xs:maxInclusive value="255"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
<xs:simpleType name="valueType">
  <xs:union memberTypes="xs:string xs:int xs:long xs:short
                        xs:byte xs:float xs:double xs:date
                        xs:boolean xs:base64Binary
                        xs:hexBinary listOf3Rgb"/>
</xs:simpleType>
<!--Instantiable elements-->
<xs:element name="annotation" type="annotationClass"/>
<!--Root element-->
<xs:element name="annotations" type="listOfAnnotations"/>
</xs:schema>

```

Código 3.7. Propuesta de documento de esquema XML para las anotaciones de Realidad Aumentada

El Código 3.8 es el resultado de aplicar el documento de esquema XML presentado en el Código 3.7 en la implementación de la anotación de tipo etiqueta que muestra la Figura 3.14. La información virtual (etiqueta “Pelota”) es siempre visible y está unida al anclaje (una pelota roja situada en unas coordenadas concretas del entorno) mediante una línea sin puntas. Su posición es relativa a la del objeto físico anotado, pero se orienta siempre hacia el usuario.



Figura 3.14. Ejemplo de anotación de Realidad Aumentada de tipo etiqueta

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="label001">
    <author>Inma García-Pereira</author>
    <creationDate>2020-05-23</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>fixed</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <coordinates>0.43 -1.5 2.2 -0.6 3.8 0.2</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>object</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>user</orientationRefSystem>
      <maxDistanceAnchoring>5 5 5</maxDistanceAnchoring>
      <minDistanceAnchoring>0 0 0</minDistanceAnchoring>
      <anchoringVirtInfConexion>
        <init>0</init>
        <end>0</end>
        <colour>255 255 255</colour>
        <dotted>0</dotted>
        <thickness>1</thickness>
        <transparency>0</transparency>
      </anchoringVirtInfConexion>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="label">
      <property key="text"> <value>Pelota</value>
      </property>
      <property key="font"> <value>Courier New</value>
      </property>
      <property key="size"> <value>20</value>
      </property>
      <property key="style"> <value>bold</value>
      </property>
      <property key="font color"> <value>0 0 0</value>
      </property>
      <property key="background"><value>255 255 255</value>
      </property>
      <property key="border color"> <value>0 0 0</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>

```

Código 3.8. Ejemplo de aplicación del documento de esquema XML propuesto en el Código 3.7 para la anotación de la Figura 3.14

3.6. Aplicación y validación

El modelo de datos que se acaba de presentar pretende ser una herramienta universal que ayude a investigadores y desarrolladores en su tarea de crear sistemas de Realidad Aumentada, independientemente del dispositivo que utilicen o del tipo de anotación que vayan a implementar. Siguiendo la caracterización propuesta en este capítulo, es posible diseñar anotaciones de Realidad Aumentada de forma robusta, consiguiendo los objetivos de comunicación e interacción deseados. En los Capítulos 4 y 5, se validan estas aportaciones aplicándolas en el desarrollo e implementación de dos sistemas colaborativos de Realidad Aumentada y realizando las pruebas de usuario pertinentes.

En esta sección, se pretende hacer una primera validación de la caracterización y del modelo de datos propuestos aplicándolos a algunos de los trabajos analizados en el Apartado “2.4.2. Sistemas ad hoc” del capítulo anterior. La selección se ha llevado a cabo teniendo en cuenta los diferentes tipos de colaboración, de dispositivos, de anotaciones y de interacción existentes para cubrir así una amplia casuística. De cada uno de los artículos elegidos, se extrae, en los siguientes apartados, la información necesaria para realizar una caracterización detallada de las anotaciones de Realidad Aumentada que utilizan. Además, se muestra un ejemplo de implementación de una de estas anotaciones mediante el documento de esquema XML desarrollado. El título de los siguientes apartados indica el tipo de Realidad Aumentada que utiliza cada trabajo seleccionado, atendiendo a la colaboración que permite y al dispositivo utilizado. En el último apartado de esta sección, se añade un sexto ejemplo que permite ejemplificar aquellas características que no quedan recogidas en los cinco trabajos seleccionados.

3.6.1. Realidad Aumentada monousuario espacial basada en proyectores

El primer ejemplo de aplicación de la caracterización y el modelo de datos desarrollados es el sistema presentado en (Hattab & Taubin, 2019). Éste utiliza anotaciones de Realidad Aumentada para indicarle a un usuario qué partes de un bloque de material ha de tallar para hacer una copia física de un modelo 3D, como muestra la Figura 3.6b.

Caracterización

- **Contenido.** El objetivo de las anotaciones de Realidad Aumentada que se utilizan en este sistema es ayudar a usuarios no cualificados a tallar una réplica física aproximada de un modelo 3D utilizando el mínimo número de cortes. La funcionalidad de las anotaciones es enfatizar el mundo físico, pues deben atraer la atención de los usuarios sobre la zona que han de tallar. Para ello, la información virtual va a modificar el elemento físico anotado, cambiando su color. Han de ser anotaciones con una complejidad baja para entorpecer lo mínimo posible la visibilidad del objeto físico que el usuario está manipulando. Con todo ello, se opta por anotaciones de tipo highlights o resaltados, pues cumplen con todos estos requisitos. Debido al material utilizado para las pruebas, estos resaltados serán de color rojo y azul.
- **Ubicación**
 - **del anclaje.** El bloque de material que se va a tallar se coloca sobre una base que tiene unas marcas específicas para conocer su posición y ubicación. El anclaje de las anotaciones se sitúa en la estructura compuesta por base y bloque de material, por lo que el sistema de referencia del anclaje es el elemento físico que se va a anotar y su complejidad es alta, pues la ubicación está definida por un modelo 3D.
 - **de la información virtual.** La información virtual se ubica en una posición concreta del objeto que se está tallando por lo que el sistema de referencia de la información virtual, tanto para la posición como para la orientación, es el elemento físico que se está anotando. La información virtual siempre ha de estar situada sobre el anclaje por lo que, si se gira el bloque de material (el sistema permite giros de 90 grados), las proyecciones han de girar con él. Esto implica que no existe distancia ni libertad de movimiento entre información virtual y anclaje.
- **Temporalidad**
 - **Variabilidad.** En cada paso del tallado, el objeto físico es escaneado de nuevo, pues su estructura se modifica. Esto implica que, tanto el anclaje como la información virtual, cambian. Es por ello que se ha de considerar cada sección proyectada sobre el bloque de

material como una anotación independiente de las demás. Por tanto, no hay variabilidad de las anotaciones en el tiempo pues, aunque la información virtual varíe en cada paso, se tratan, en realidad, de anotaciones diferentes.

- **Visibilidad.** Las anotaciones de este sistema son visibles a demanda ya que es el usuario el que decide, una vez generada una anotación, durante cuánto tiempo desea que esté visible. Por ejemplo: solicita al sistema que le muestre cuál es la siguiente sección del bloque que tiene que cortar; hace unas marcas de referencia con un lápiz; invisibiliza la anotación; junta las marcas para terminar de marcar el corte que ha de hacer; vuelve a mostrar la anotación para verificar que lo ha hecho correctamente; desactiva de nuevo la proyección para proceder a tallar el bloque.
- **Existencia.** Una vez generada cada anotación, su temporalidad es continua ya que la información virtual existe de forma constante, aunque no sea siempre visible.
- **Interacción.** Los usuarios sólo pueden ver las anotaciones ya que éstas son creadas automáticamente por el sistema y no pueden ser manipuladas ni editadas de ningún modo por parte del usuario.

Ejemplo de implementación

Las propiedades descritas en la caracterización anterior se pueden implementar siguiendo el modelo de datos propuesto en este capítulo. El Código 3.9 muestra la implementación de la anotación de la Figura 3.6b (izquierda) haciendo uso del documento de esquema XML desarrollado en la sección anterior.

3.6.2. Realidad Aumentada colaborativa cara a cara para HMD

El segundo trabajo sobre el que validar las aportaciones de este capítulo es (Bork et al., 2019, 2021). En él, se presenta VesARlius, un sistema interactivo de Realidad Aumentada para enseñar anatomía a varios usuarios ubicados conjuntamente. La Figura 2.36 muestra el sistema en uso.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="carving01">
    <author>Hattab Taubin</author>
    <creationDate>2019-06-16</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>onDemand</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>object</positionRefSystem>
      <coordinates>0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>object</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>object</orientationRefSystem>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="highlight">
      <property key="shape">
        <value>squarePrism</value>
      </property>
      <property key="height">
        <value>5</value>
      </property>
      <property key="length">
        <value>5</value>
      </property>
      <property key="width">
        <value>1</value>
      </property>
      <property key="color">
        <value>255 0 0</value>
      </property>
      <property key="transparency">
        <value>0</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>

```

Código 3.9. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Hattab & Taubin, 2019)

Caracterización

- **Contenido.** Las anotaciones de VesARlius muestran partes del cuerpo humano como herramienta de enseñanza en clases de anatomía. Su funcionalidad es enriquecer el mundo físico, pues incorporan nuevos

elementos virtuales al entorno que las rodea. Para ello, la información virtual va a cambiar el mundo físico agregándole contenido. Son, por tanto, anotaciones con una alta complejidad puesto que han de representar de forma precisa diferentes partes del cuerpo humano y modificarse en función de las peticiones del usuario. Con todo ello, se opta por anotaciones de tipo material transmedia y, en concreto, por modelos 3D dinámicos. Los modelos 3D, a su vez, tienen asociadas diversas imágenes 2D obtenidas a partir de tomografías computarizadas (TC). Éstas forman parte del contenido virtual de las anotaciones de Realidad Aumentada, pues el usuario puede interactuar con ellas y visualizarlas de diferentes formas junto al modelo 3D.

- **Ubicación**

- **del anclaje.** El anclaje de estas anotaciones puede ser cualquier zona del aula, por lo que el sistema de referencia del anclaje es el mundo y su complejidad es baja, pues la ubicación queda definida por un punto 6DoF.
- **de la información virtual.** La información virtual se ubica en el mismo sitio que el anclaje y no varía su orientación por lo que el sistema de referencia de la información virtual, tanto para la posición como para la orientación, es el mundo. Además, la información virtual siempre ha de estar situada sobre el anclaje por lo que no existe distancia ni libertad de movimiento entre información virtual y anclaje.

- **Temporalidad**

- **Variabilidad.** Los usuarios pueden interactuar con el material transmedia que se les está mostrando y éste responde en consecuencia. Por tanto, existe una alta variabilidad de la información virtual en el tiempo.
- **Visibilidad.** Las anotaciones de este sistema tienen una visibilidad fija ya que, una vez se muestran en el entorno, son siempre visibles para el usuario.
- **Existencia.** Una vez generada cada anotación, su temporalidad es continua ya que la información virtual existe de forma constante.

- **Interacción.** Los usuarios de VesARlius pueden manipular las anotaciones de Realidad Aumentada que muestra el sistema, ya que éstas son interactivas y disponen de diversos menús que les agragan usabilidad.

Ejemplo de implementación

Aunque la mayoría de las propiedades descritas en la caracterización anterior se pueden implementar siguiendo el modelo de datos propuesto en este capítulo, la variabilidad y la manipulación deben ser tratadas, principalmente, en el diseño de los modelos 3D. Aun así, se pueden añadir algunos elementos en la implementación de la propia anotación que ayuden a saber en qué estado se encuentra la información virtual. El Código 3.10 muestra la implementación de la anotación de la Figura 2.36 (centro) haciendo uso del documento de esquema XML desarrollado en la sección anterior. En el elemento `content`, se ha añadido la propiedad `state` para indicar en qué estado se encuentra la anotación, por ejemplo: 0 para mostrar todos los componentes del modelo 3D de un tórax (Figura 2.36 izquierda) y 1 para que los huesos se muestren al 25% de transparencia de forma que se vean mejor los órganos internos (Figura 2.36 centro). Del mismo modo, las imágenes TC asociadas a cada modelo anatómico se pueden visualizar de diferentes formas: de forma frontal al usuario (Figura 2.36 centro) y de forma transversal al modelo (Figura 2.36 derecha). Esto se indica en la implementación del Código 3.10 mediante las propiedades `TCXstate`.

3.6.3. MARS para colaboración asíncrona in situ

En tercer lugar, se aplican las aportaciones de este capítulo sobre el trabajo presentado en (Ioannidi et al., 2017), donde se desarrolla Flaneur, una herramienta para la creación e intercambio participativo de contenido sobre el patrimonio arquitectónico en exteriores mediante Realidad Aumentada. La Figura 3.6f muestra un ejemplo de anotación generada con este sistema.


```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="thorax01">
    <author>Bork</author>
    <creationDate>2019-10-14</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>fixed</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <coordinates>0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>world</orientationRefSystem>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="transmediaMaterial">
      <property key="3DmodelURL">
        <value>/models/thorax01.obj</value>
      </property>
      <property key="scale">
        <value>1</value>
      </property>
      <property key="state">
        <value>1</value>
      </property>
      <property key="TC1URL">
        <value>/TC/thorax01_TC01.jpg</value>
      </property>
      <property key="TC1state">
        <value>0</value>
      </property>
      <property key="TC2URL">
        <value>/TC/thorax01_TC02.jpg</value>
      </property>
      <property key="TC2state"> <value>0</value>
      </property>
      <property key="TC3URL">
        <value>/TC/thorax01_TC03.jpg</value>
      </property>
      <property key="TC3state"> <value>0</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>

```

Código 3.10. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Bork et al., 2019, 2021)

Caracterización

- **Contenido.** Flaneur permite anotaciones de diferentes tipos y, aunque todas aportan información adicional a edificios físicos, su forma de hacerlo varía de unas a otras. La funcionalidad de algunas es simplemente extender el mundo físico, pues facilitan el acceso a la información mediante textos. Por tanto, lo que hacen es nombrar y describir el elemento físico anotado. Otras, en cambio, enriquecen el mundo físico, ya que agregan o modifican la información del entorno mediante imágenes o modelos 3D. Por tanto, son anotaciones con una complejidad media-baja, dependiendo de los elementos virtuales que se utilicen en cada momento. Con todo ello, se opta por anotaciones de tipo indicadores visuales, etiquetas y material transmedia. Los indicadores se utilizan para señalar qué edificios están anotados, las etiquetas aportan información descriptiva sobre un determinado patrimonio arquitectónico y el material transmedia muestra imágenes del pasado mediante fotografías 2D o modelos 3D.
- **Ubicación**
 - **del anclaje.** Los anclajes de estas anotaciones son elementos del patrimonio arquitectónico, principalmente edificios. Su ubicación queda definida por coordenadas GPS, por lo que el sistema de referencia del anclaje es el mundo y su complejidad es baja.
 - **de la información virtual.** La información virtual se ubica en el mismo sitio que el anclaje por lo que su sistema de referencia para la posición es el mundo. La orientación de los elementos virtuales varía en función de su tipología. Los modelos 3D siempre mantienen la misma orientación puesto que se colocan en la que sería su ubicación real en el entorno. Por tanto, su sistema de referencia para la orientación es el mundo. Las etiquetas y las fotografías, en cambio, siempre se muestran orientadas hacia el usuario, por lo que su sistema de referencia para la orientación es el usuario. Por otro lado, la información virtual siempre se muestra sobre su anclaje por lo que no existe distancia ni libertad de movimiento entre ambos.
- **Temporalidad**
 - **Variabilidad.** El contenido virtual de las anotaciones es siempre el mismo, por lo que no existe variabilidad en el tiempo.

- **Visibilidad.** Las anotaciones de este sistema tienen una visibilidad espacial, ya que son visibles cuando el usuario se sitúa en unas determinadas coordenadas GPS.
- **Existencia.** La información virtual de las anotaciones existe de forma constante por lo que su temporalidad es continua.
- **Interacción.** Flaneur permite crear anotaciones de Realidad Aumentada sobre edificios y ver las que ya han generado otros usuarios.

Ejemplo de implementación

Gracias al modelo de datos propuesto en este capítulo, se pueden implementar las anotaciones de Realidad Aumentada que utiliza el sistema Flaneur. El Código 3.11 muestra el XML correspondiente a la anotación de la Figura 3.6f: un modelo 3D de un antiguo elemento arquitectónico sobre su supuesto emplazamiento físico.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="columbia_annotation">
    <author>Ioannidi</author>
    <creationDate>2017-07-03</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>spatial</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <coordinates>1.5 0.3 -2.7 0.9 16.6 -1.8</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>world</orientationRefSystem>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="transmediaMaterial">
      <property key="3DmodelURL">
        <value>/models/columbiaArch.fbx</value>
      </property>
      <property key="scale"> <value>1</value> </property>
      <property key="transparency"> <value>10</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>
```

Código 3.11. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Ioannidi et al., 2017)

3.6.4. Realidad Aumentada para asistencia remota mediante dispositivo móvil y ordenador

El cuarto trabajo seleccionado para aplicar las aportaciones de este capítulo es (Gauglitz et al., 2014a). Se trata de un sistema diseñado para asistir a los usuarios de forma remota. En este caso, el usuario local utiliza un dispositivo móvil mientras que el experto remoto utiliza una interfaz de escritorio con pantalla táctil. La Figura 2.41 muestra el sistema en uso.

Caracterización

- **Contenido.** Las anotaciones de este sistema tienen por objetivo centrar la atención del usuario que está siendo asistido sobre determinados elementos de su entorno. Por tanto, su funcionalidad es enfaticar el mundo físico, pues señalan las partes relevantes que el usuario ha de manipular. Para ello, la información virtual va a dirigir al usuario pues, aunque éste no se desplace físicamente, si ha de mover su mirada y dirigir su atención hacia los elementos físicos señalados por las anotaciones que crea el experto. Serán anotaciones con una complejidad baja para entorpecer lo mínimo posible la visibilidad del objeto físico que el usuario ha de reparar. Con todo ello, se opta por anotaciones de tipo indicadores visuales, que se traducen en trazos dibujados a mano alzada por el experto.
- **Ubicación**
 - **del anclaje.** El anclaje de estas anotaciones es cualquier elemento del entorno físico por lo que el sistema de referencia del anclaje es el mundo y su complejidad es baja, pues la ubicación queda definida por un punto 6DoF.
 - **de la información virtual.** La información virtual se ubica en el mismo sitio que el anclaje pero queda asociada al elemento que está anotando, de forma que, si éste se mueve, la anotación se mueve y orienta con él. Por tanto, el sistema de referencia de la información virtual, tanto para la posición como para la orientación, es el elemento físico anotado. La información virtual siempre ha de estar situada sobre el anclaje por lo que no existe distancia ni libertad de movimiento entre ambos.

- **Temporalidad**

- **Variabilidad.** Una vez han sido creadas, el contenido virtual de las anotaciones es siempre el mismo, por lo que no existe variabilidad en el tiempo.
- **Visibilidad.** Las anotaciones que crea el experto son inmediatamente visibles para el usuario asistido. Una vez se ha comprendido una determinada instrucción, el experto puede ocultar los indicadores visuales para realizar otros nuevos. Por tanto, su visibilidad es a demanda, pues se pueden mostrar u ocultar cuando sea necesario.
- **Existencia.** Una vez generada cada anotación, su temporalidad es continua, ya que la información virtual existe de forma constante.
- **Interacción.** Con este sistema, los expertos remotos pueden crear anotaciones de Realidad Aumentada mientras que los usuarios asistidos sólo pueden ver dichas anotaciones.

Ejemplo de implementación

Las propiedades descritas en la caracterización anterior se pueden implementar siguiendo el modelo de datos propuesto en este capítulo. El Código 3.12 muestra la implementación de la anotación de la Figura 2.41 haciendo uso del documento de esquema XML desarrollado en la sección anterior.

3.6.5. MARS para colaboración asíncrona remota

El último ejemplo de aplicación de la caracterización y el modelo de datos desarrollados en este capítulo es el sistema presentado en (Wang et al., 2021). Se trata de una herramienta que permite la creación remota de contenido virtual mediante Realidad Aumentada. En concreto, los usuarios pueden realizar diseños de interiorismo colocando muebles en estancias en las que no están ubicados físicamente. La Figura 2.43 muestra un ejemplo de creación de contenido con este sistema.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="instruction03">
    <author>Gauglitz</author>
    <creationDate>2014-11-11</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>onDemand</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <coordinates>4.209 1.758 -0.526
        17.407 321.562 0.516</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>object</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>object</orientationRefSystem>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="indicator">
      <property key="shape">
        <value>drawing</value>
      </property>
      <property key="color">
        <value>255 0 0</value>
      </property>
      <property key="thickness">
        <value>3</value>
      </property>
      <property key="transparency">
        <value>0</value>
      </property>
      <property key="traced">
        <value>-0.05 0.03 0.16 -0.05 0.03 0.17 -0.08 0.04
          -0.09 0.04 0.30 -0.09 0.04 0.33 -0.10 0.04
          -0.10 0.04 0.36 -0.11 0.04 0.39 -0.11 0.04
          -0.11 0.04 0.42 -0.11 0.04 0.44 -0.12 0.04
          -0.12 0.04 0.50 -0.11 0.04 [...]</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>

```

Código 3.12. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Gauglitz et al., 2014a)

Caracterización

- **Contenido.** Este sistema permite visualizar muebles u otros elementos en estancias donde no los hay. Por tanto, la funcionalidad de las anotaciones de Realidad Aumentada es enriquecer el mundo físico, pues incorporan nuevos elementos virtuales al entorno que les rodea. Para ello, la información virtual va a cambiar el mundo físico agregándole contenido. Tienen una complejidad media puesto que, aunque sean modelos 3D que pueden alcanzar un alto grado de detalle, no son animados ni permiten interacción. Con todo ello, se opta por anotaciones de tipo material transmedia y, en concreto, por modelos 3D.
- **Ubicación**
 - **del anclaje.** El anclaje de estas anotaciones son unas coordenadas en el espacio, por lo que el sistema de referencia del anclaje es el mundo y su complejidad es baja.
 - **de la información virtual.** La información virtual se ubica en el mismo sitio que el anclaje y no varía su orientación por lo que el sistema de referencia de la información virtual, tanto para la posición como para la orientación, es el mundo. Además, la información virtual siempre ha de estar situada sobre el anclaje por lo que no existe distancia ni libertad de movimiento entre información virtual y anclaje.
- **Temporalidad**
 - **Variabilidad.** El contenido virtual de las anotaciones es siempre el mismo, por lo que no existe variabilidad en el tiempo.
 - **Visibilidad.** Las anotaciones de este sistema tienen una visibilidad fija ya que, una vez se muestran en el entorno, son siempre visibles para el usuario.
 - **Existencia.** La información virtual de las anotaciones existe de forma constante por lo que su temporalidad es continua.
- **Interacción.** Este sistema permite tanto crear anotaciones de Realidad Aumentada como ver las que otros usuarios han generado.

Ejemplo de implementación

El modelo de datos propuesto en este capítulo permite una implementación directa de las anotaciones de Realidad Aumentada descritas arriba. El Código 3.13 muestra el XML correspondiente a una de las anotaciones de la Figura 2.43c: un modelo 3D que una mesa.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="room03_table05">
    <author>Wang</author>
    <creationDate>2021-05-08</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>fixed</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <coordinates>5.824 3.029 -2.178
                  9.811 6.275 -1.438</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>world</orientationRefSystem>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="transmediaMaterial">
      <property key="3DmodelURL">
        <value>/models/table05.fbx</value>
      </property>
      <property key="scale">
        <value>0.75</value>
      </property>
      <property key="transparency">
        <value>0</value>
      </property>
      <property key="rotation">
        <value>45</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>
```

Código 3.13. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema desarrollado en (Wang et al., 2021)

3.6.6. Realidad Aumentada monousuario para dispositivos portátiles

En los cinco apartados anteriores, se ha comprobado que la caracterización y el modelo de datos propuestos en este capítulo tienen una aplicación directa en diferentes sistemas de Realidad Aumentada. Con los cinco trabajos analizados, se ha validado gran parte de la amplia casuística que subyace tras la caracterización desarrollada. La Tabla 3.1 muestra las diferentes características que cumple cada anotación analizada. Como puede verse, algunos casos concretos de anotaciones se han quedado sin ejemplificar, como son:

- a) iconos, ayudas, guías, rayos X y diagramas de despiece
- b) con sistema de referencia del anclaje o de la posición de la información virtual que sea el usuario
- c) con una complejidad de la ubicación media
- d) con distancia y/o libertad de movimiento entre anclaje e información virtual
- e) con una visibilidad temporal o filtrada
- f) con una existencia discreta
- g) que se puedan editar

El caso d) fue tratado en el ejemplo propuesto en el apartado 3.5.2. (Figura 3.14 y Código 3.8). Por su parte, el caso g) será analizado en el siguiente capítulo, pues se trabajará con anotaciones que se pueden editar. El resto de casos se analizan en el ejemplo que se propone a continuación. En cuanto al caso a), se ha elegido como tipo de anotación los rayos X, por lo que sólo quedarían por implementar anotaciones de tipo iconos, guías, ayudas y diagramas de despiece. Como se ha visto a lo largo de esta sección, la implementación del contenido de las anotaciones se hace mediante pares clave-valor que permiten la descripción de cualquier tipo de anotación, por lo que se haría de forma muy similar a los ejemplos ya mostrados. Lo mismo ocurre con el caso e): aunque se ha elegido para el ejemplo una visibilidad temporal, la forma de implementar la visibilidad filtrada es similar al resto. Es el propio sistema el que, mediante eventos, debe cambiar el valor del elemento `visible` a `true` o `false` cuando se encuentre en determinados estados.

Apartado		3.6.1	3.6.2	3.6.3	3.6.4	3.6.5	6.3.6
Contenido							
Funcionalidad A	Extender			X			
	Enfatizar	X			X		
	Enriquecer		X	X		X	X
Funcionalidad B	Nombrar			X			
	Describir			X			
	Agregar		X	X		X	
	Modificar	X		X			X
	Dirigir				X		
Complejidad	Baja	X		X	X		
	Media			X		X	
	Alta		X				X
Tipología	Etiqueta			X			
	Icono						
	Resaltado	X					
	Ayuda						
	Guía						
	Indicador			X	X		
	Rayos X						X
	D. despiece						
M. transmedia		X	X		X		
Ubicación del anclaje							
Sistema de referencia	Usuario						X
	Elemento físico	X					
	Mundo		X	X	X	X	
Complejidad	Baja		X	X	X	X	
	Media						X
	Alta	X					
Ubicación de la información virtual							
Sistema de referencia posición	Usuario						X
	Elemento físico	X			X		
	Mundo		X	X		X	
Sistema de referencia orientación	Usuario			X			
	Elemento físico	X			X		X
	Mundo		X	X		X	

Distancia		No	No	No	No	No	No
Libertad de movimiento		No	No	No	No	No	No
Temporalidad							
Variabilidad		No	Sí	No	No	No	Sí
Visibilidad	Fija		X			X	
	Temporal						X
	Espacial			X			
	A demanda	X			X		
	Filtrada						
Existencia	Continua	X	X	X	X	X	
	Discreta						X
Interacción							
	Ver	X	X	X	X	X	X
	Manipular		X				X
	Editar						
	Crear			X	X	X	

Tabla 3.1. Características que cumple cada anotación analizada en la Sección 3.6.

El sistema que se propone en este apartado es un juego de Realidad Aumentada que le proporciona pistas a los usuarios a través de una visión de rayos X de sus extremidades. Mientras el usuario está jugando, puede mirar sus brazos y piernas a través del sistema y éste le muestra, durante un periodo de tiempo limitado, lo que hay debajo de su piel (músculos, huesos, venas...). Esto le da determinadas pistas que tendrá que utilizar para poder avanzar en el juego.

Caracterización

- **Contenido.** La funcionalidad de las anotaciones de este sistema es enriquecer el mundo físico, pues permiten revelar lo invisible. Para ello, la información virtual va a modificar el elemento físico anotado, pues hacen desaparecer la piel de las extremidades para mostrar lo que hay debajo. Se trata de anotaciones con una complejidad alta, pues han de mostrar de forma creíble el supuesto interior del cuerpo humano. Con todo ello, se opta por anotaciones de tipo rayos X, pues cumplen con todos estos requisitos.

- **Ubicación**

- **del anclaje.** El sistema de referencia del anclaje es el usuario ya que siempre se sitúa sobre alguna de sus extremidades y, si el usuario se mueve, las anotaciones lo hacen con él. Su complejidad es media, pues la ubicación está definida por una región 3D (un prisma cuadrangular que engloba un brazo del codo a la mano o una pierna de la rodilla al pie).
- **de la información virtual.** La información virtual se ubica en el mismo sitio que el anclaje y se mueve con este, es decir, con el movimiento de las extremidades del usuario. Su orientación va en función de la posición del brazo o la pierna que está siendo anotado. Por tanto, el sistema de referencia para la posición es el usuario mientras que el sistema de referencia para la orientación es el elemento físico anotado. Esto implica que no existe distancia ni libertad de movimiento entre información virtual y anclaje.

- **Temporalidad**

- **Variabilidad.** Las anotaciones pueden ir cambiando en el tiempo para proporcionar al usuario las pistas necesarias para avanzar en el juego. por tanto, la variabilidad es alta.
- **Visibilidad.** Las anotaciones de este sistema tienen una visibilidad temporal ya que sólo son visibles durante cierto tiempo y, además, tienen un orden temporal concreto que le aporta lógica al juego.
- **Existencia.** Para que aparezcan las anotaciones, el usuario debe estar en etapas concretas del juego. Por tanto, su temporalidad es discreta, pues sólo se crearán como consecuencia de determinados eventos.

- **Interacción.** Los usuarios pueden ver y manipular las anotaciones ya que algunos elementos del interior del cuerpo deben ser activados para avanzar en el juego.

Ejemplo de implementación

Las propiedades descritas en la caracterización anterior se pueden implementar siguiendo el modelo de datos propuesto en este capítulo. El Código 3.14 muestra la implementación de una posible anotación para el sistema propuesto en este ejemplo haciendo uso del documento de esquema XML desarrollado en la sección

anterior. Se han añadido algunas propiedades que permiten indicar la duración de la anotación y si se ha resuelto o no la pista. Éstas se pueden cambiar de forma dinámica para actualizar la visibilidad de la anotación y avanzar en el juego.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="clue3">
    <author>Leal García</author>
    <creationDate>2022-04-06</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>temporary</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>user</positionRefSystem>
      <coordinates>0.0 0.0 0.0 0.0 0.0</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>user</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>object</orientationRefSystem>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="xRay">
      <property key="3DmodelURL">
        <value>/models/clue3.fbx</value>
      </property>
      <property key="scale">
        <value>0.75</value>
      </property>
      <property key="duration">
        <value>300</value>
      </property>
      <property key="solved">
        <value>>false</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>
```

Código 3.14. Aplicación del documento de esquema XML propuesto al sistema planteado en el Apartado 3.6.6.

3.7. Conclusiones

En este capítulo, se ha ofrecido una definición precisa de las anotaciones de Realidad Aumentada, detallando cada uno de sus componentes y de sus características. Para obtener dichas características, se han analizado diversos trabajos que estudian la información virtual, tanto de forma genérica como de forma específica para el caso concreto de las anotaciones de Realidad Aumentada. Fruto de esta investigación, se han establecido las interrelaciones existentes entre las diferentes aportaciones y se ha sintetizado toda la información recopilada. Con ello, se ha obtenido una caracterización de las anotaciones de Realidad Aumentada. Ésta es una herramienta indispensable para diseñar cualquier tipo de anotación de forma que todas sus propiedades queden bien definidas y su implementación futura sea exitosa.

A partir de esta caracterización, se ha desarrollado un modelo de datos que permite implementar cualquier tipo de anotación independientemente del dispositivo que se utilice. Para ello, se ha optado por un documento de esquema XML, ya que permite definir cualquier tipo de dato, estructurar la información de forma precisa y flexible y validar los XML basados en dicho esquema.

La caracterización y el modelo de datos desarrollados en este capítulo han sido validados mediante su aplicación a sistemas propuestos por otros autores en publicaciones sobre la materia. Con ello, se ha verificado, a nivel teórico, tanto su utilidad como su versatilidad y universalidad, pues las aportaciones de este capítulo sobre anotaciones de Realidad Aumentada han sido aplicadas con éxito en todo tipo de dispositivos, en diferentes modos de colaboración y para funcionalidades muy diversas. En los próximos capítulos, se harán validaciones prácticas y experimentales para corroborar estas afirmaciones.

Capítulo 4

Caso de estudio: uso de anotaciones de Realidad Aumentada en la inspección de edificios prefabricados

En este capítulo, se presenta el proyecto SIRAE como ejemplo práctico de aplicación de la caracterización y el modelo de datos desarrollados en esta tesis. Este proyecto se va a tratar como caso de estudio con el objetivo de llevar a la práctica los conocimientos teóricos adquiridos en el capítulo anterior mediante su aplicación a un caso real. El aprendizaje basado en el estudio de casos, metodología diseñada por Christopher Columbus Langdell a finales del siglo XIX, permite dar un enfoque pragmático al conocimiento, buscando la eficacia y el valor para la vida práctica de lo que se está estudiando. En el desarrollo de este caso de estudio, se identifica y estudia un problema (la detección de desviaciones durante la inspección de edificios prefabricados) y se plantea una solución (una herramienta colaborativa de Realidad Aumentada) haciendo uso de las aportaciones del capítulo anterior.

SIRAE es un proyecto apropiado para realizar este caso de estudio porque ha permitido aplicar en diferentes fases de su desarrollo las propuestas de esta tesis. En la fase de diseño, se ha hecho uso de la caracterización para definir de forma precisa las anotaciones de Realidad Aumentada que utiliza el sistema. Con ello se ha diseñado una estructura de datos robusta y coherente. En la fase de implementación, el uso del modelo de datos ha permitido aplicar de forma directa la caracterización desarrollada en la fase anterior, facilitando su ejecución y dando lugar a una base de datos que asegura la coherencia e integridad de los datos. Todo ello proporciona, a su vez, un alto grado de flexibilidad y escalabilidad al sistema, pues permite almacenar y representar cualquier tipo de anotación.

Como se detalla en la Sección 4.2. “Descripción del proyecto”, SIRAE es un proyecto cuyo objetivo es automatizar y enriquecer el proceso de inspección de edificios prefabricados mediante el uso de tecnologías de Realidad Aumentada. En él, se desarrollan dos herramientas diferentes, pero integradas y complementarias:

- **Herramienta de PPI (Programa de Puntos de Inspección):** permite llevar a cabo de forma automatizada el proceso de inspección tradicional y ofrece nuevas funcionalidades a los inspectores en base a documentación digital.
- **Herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada:** permite inspeccionar los módulos y crear, consultar o modificar anotaciones mediante tecnologías de Realidad Aumentada.

Las aportaciones de esta tesis se han aplicado de forma directa a la herramienta de anotación de Realidad Aumentada, por lo que este estudio se centra únicamente en ella. De la herramienta de PPI, sólo se nombrarán aquellos aspectos que sean relevantes para la comprensión del sistema en su conjunto. En (Portalés et al., 2018), se pueden encontrar más detalles sobre dicha herramienta.

A continuación, se introduce el concepto de inspección de edificios y cómo pueden ayudar las tecnologías de Realidad Aumentada en este campo. Posteriormente, se describe el proyecto SIRAE y cómo éste integra la Realidad Aumentada en la metodología tradicional de inspección. A continuación, se presenta la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada desarrollada. Finalmente, se detallan las pruebas de usuario llevadas a cabo, se discuten los resultados y se exponen las conclusiones y el trabajo futuro.

4.1. Inspección y Realidad Aumentada

Los edificios prefabricados se componen de módulos producidos en fábrica que, una vez terminados, se transportan y ensamblan en su ubicación final para formar un edificio completo. Para asegurar una desviación mínima entre los módulos diseñados y los construidos, se llevan a cabo inspecciones en diferentes etapas: primero, en las unidades individuales (por ejemplo, paneles), luego, en los módulos ensamblados en fábrica y, finalmente, en los edificios completos. Asegurar esta mínima desviación es de suma relevancia para mantener la eficiencia energética de este tipo de edificaciones. Por eso, la inspección de edificios prefabricados es una

tarea relevante y exigente que requiere la participación de un grupo de expertos que necesitan trabajar en colaboración. Algunas de las tareas que se llevan a cabo durante el proceso de inspección son: la recopilación de medidas, el examen visual de diferentes componentes y la anotación escrita de posibles defectos. Durante este proceso, el inspector decide sobre los defectos, su importancia, su intensidad y su extensión. Para finalizar una inspección, se deben corregir todos los defectos, lo que puede llevar mucho tiempo. Por tanto, un proceso de inspección puede durar varios días e involucrar a diferentes inspectores.

Tradicionalmente, durante el proceso de inspección, los defectos encontrados y las medidas de corrección tomadas son anotados y documentados por el inspector en papel y mediante fotografías. Una vez terminada la inspección, estos apuntes manuscritos se cargan manualmente en un software de gestión dedicado, en la oficina, y se descargan las fotografías tomadas. Esto supone que la documentación de defectos y su registro digital son dos procesos distintos. Sin embargo, hoy en día existe una variedad de nuevas tecnologías que se pueden integrar en la inspección de edificios prefabricados, permitiendo la documentación digital y la gestión interactiva de defectos. Así, la Realidad Aumentada puede ayudar en el proceso de inspección al permitir una comparación visual en tiempo real del edificio diseñado y del construido, una documentación mejorada a través de diferentes tipos de anotaciones y una colaboración entre los diferentes inspectores, ya sea simultáneamente o en diferentes períodos de tiempo. Y todo ello permitiendo a los inspectores navegar libremente por el entorno real.

En (García-Pereira, Portalés, et al., 2020), se puede encontrar una detallada búsqueda bibliográfica en la que se muestran diferentes trabajos que utilizan la tecnología de Realidad Aumentada en procesos de inspección y, concretamente, en el sector de la construcción. De dicho estudio se desprende la dificultad de encontrar una solución dedicada que permita la toma de diferentes tipos de anotaciones de Realidad Aumentada y su uso en el tiempo por diversos inspectores. En este sentido, la herramienta que se presenta en este capítulo es novedosa, ya que combina las ventajas de un sistema colaborativo con la versatilidad de las anotaciones editables, multitipo y geolocalizadas. Todo ello se integra en un entorno de Realidad Aumentada que permite visualizar simultáneamente tanto un modelo 3D del módulo prefabricado (previamente diseñado) como el módulo real tal y como ha sido construido.

4.2. Descripción del proyecto

SIRAE (Sistema de Realidad Aumentada para la Autoinspección de Edificios Energéticamente Eficientes) es un proyecto de I+D+I centrado en tecnologías de Realidad Aumentada para su uso en la autoinspección de edificios energéticamente eficientes. Se trata de un proyecto de la convocatoria Retos-Colaboración 2015 (RTC-2015-4203-7) financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, y por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) (SIRAE, s. f.).

El objetivo principal de este proyecto es la detección y eliminación de las desviaciones de calidad y de rendimiento energético existentes entre los valores previstos en fase de diseño y los valores reales en fase de operación de edificios concebidos para ser de alta eficiencia energética, centrándose en los prefabricados. Esta eliminación de desviaciones es posible mediante el uso, in situ y en tiempo real, de procedimientos y herramientas de autoinspección basadas en tecnologías de Realidad Aumentada.

Este objetivo se consigue a través del desarrollo de una metodología innovadora, sustentada en los protocolos y directrices propios de las inspecciones, y del posterior diseño e implementación de una plataforma software, novedosa, intuitiva, robusta y rentable, de inspección para los técnicos durante y después de los procesos constructivos. La utilización de la tecnología de Realidad Aumentada, que conecta las edificaciones virtuales y físicas en tiempo real, permite visualizar in situ elementos indicativos de la eficiencia energética facilitando a los técnicos una actuación en el momento adecuado y en tiempo real. Esto hace posible alcanzar el rendimiento previsto, eliminando las brechas de calidad y de rendimiento energético entre el modelo y el edificio. Así pues, SIRAE aspira a mejorar sustancialmente la supervisión de las edificaciones y el diagnóstico a través de los dispositivos móviles de los técnicos. El concepto general del sistema se muestra en la Figura 4.1.

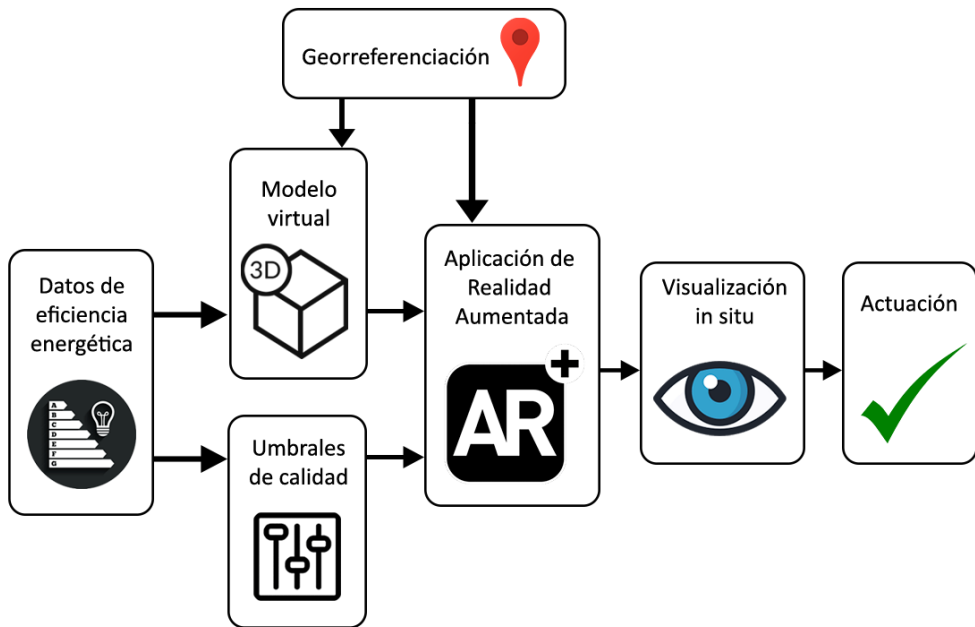


Figura 4.1. Concepto general del funcionamiento de SIRAE

Este proyecto se ha realizado desde el grupo de investigación ARTEC de la Universitat de València en consorcio con la empresa DRAGADOS. El grupo ARTEC pertenece al Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (IRTIC) y está dedicado, desde su fundación en 1992, a los gráficos 3D interactivos, la Realidad Virtual, la Realidad Aumentada y la Simulación Civil. Por su parte, DRAGADOS es la empresa líder de la construcción en España, además de tener una fuerte proyección internacional. Desde 1972, cuenta con una factoría propia en Sevilla dedicada al diseño y fabricación de componentes prefabricados para edificios. En ella se dispone de diversos módulos tipo CARACOLA, que son el escenario de aplicación de SIRAE.

El Sistema CARACOLA de edificación modular consiste en la construcción de edificios, de una o más alturas, a base de módulos tridimensionales, de estructura metálica y uniones principalmente soldadas, que permiten su adición vertical y horizontal. Estos módulos son prefabricados en factorías e incorporan todos los cerramientos, particiones, acabados e instalaciones necesarios. Una vez fabricados, se transportan a obra y se montan, según el orden establecido, apoyándose sobre

una cimentación previamente ejecutada in situ. La Figura 4.2 (izquierda) muestra el proceso de ensamblado de los módulos prefabricados.

DRAGADOS tiene la capacidad de simular diferentes supuestos para verificar la versatilidad y el buen funcionamiento de SIRAE en un entorno real de inspección de edificios energéticamente eficientes. Además, durante la ejecución del proyecto en fase de laboratorio, la validación de los resultados intermedios se realiza en el edificio del IRTIC, que está construido a base de módulos CARACOLA, como se aprecia en la Figura 4.2 (derecha).



Figura 4.2. Proceso de ensamblado de módulos CARACOLA (izquierda, fuente: DRAGADOS) y edificio construido a base de este tipo de módulos (derecha)

4.3. Integración de la Realidad Aumentada en la metodología de inspección

El sistema actual de inspección de los módulos CARACOLA se basa en Programas de Puntos de Inspección (PPI), tanto para la inspección de elementos o lotes de elementos (PPI GRC, *Grassfibre Reinforced Concrete*) como para la inspección de los módulos una vez finalizados (PPI MODULAR). Estos PPI están confeccionados atendiendo a los umbrales de calidad exigidos por la normativa vigente y contienen todos los factores a considerar por el inspector en las distintas fases de construcción de los módulos, ya sea en fábrica o en el emplazamiento definitivo. La Figura 4.3 muestra el desglose de los PPI. Es en los PPI modular es donde cobra especial relevancia la utilización de tecnologías de Realidad Aumentada.

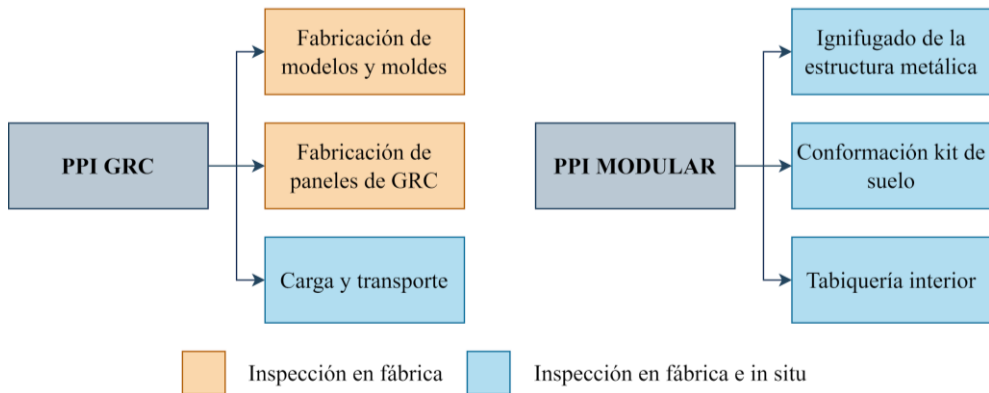


Figura 4.3. Programas de Puntos de Inspección (PPI) de componentes y módulos de edificios prefabricados

Tradicionalmente, estas inspecciones basadas en PPI se llevan a cabo mediante la toma de anotaciones en una hoja de papel que posteriormente se pasan manualmente a un programa informático en la oficina. A su vez, los inspectores toman imágenes con una cámara fotográfica o con un teléfono móvil que deben ser transferidas posteriormente a una base de datos de forma manual. La Figura 4.4 muestra un esquema de la inspección tradicional mediante PPI.

Con SIRAE, se propone una inspección in situ mediante Realidad Aumentada que ayude a los técnicos en su trabajo diario. Gracias a esta herramienta, los inspectores pueden visualizar diferentes tipos de información virtual (elementos, capas, indicaciones de los umbrales de calidad...) superpuesta sobre los elementos constructivos. Además, los operarios pueden interactuar directamente con el modelo virtual, tanto mediante anotaciones georreferenciadas como con la captura de datos adicionales (imágenes o modelos 3D) que se vinculan al modelo inicial. La Figura 4.5 muestra un esquema de la metodología de inspección propuesta por SIRAE, que incluye la tradicional y la dota de nuevas funcionalidades.

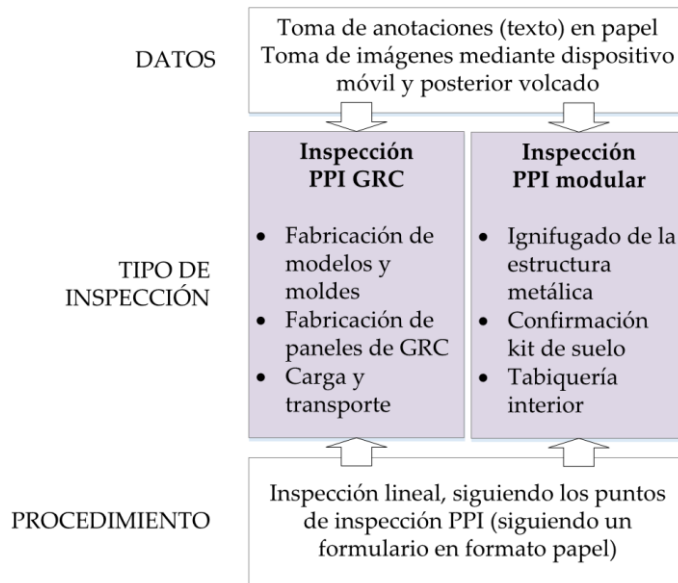


Figura 4.4. Esquema de inspección tradicional mediante PPI

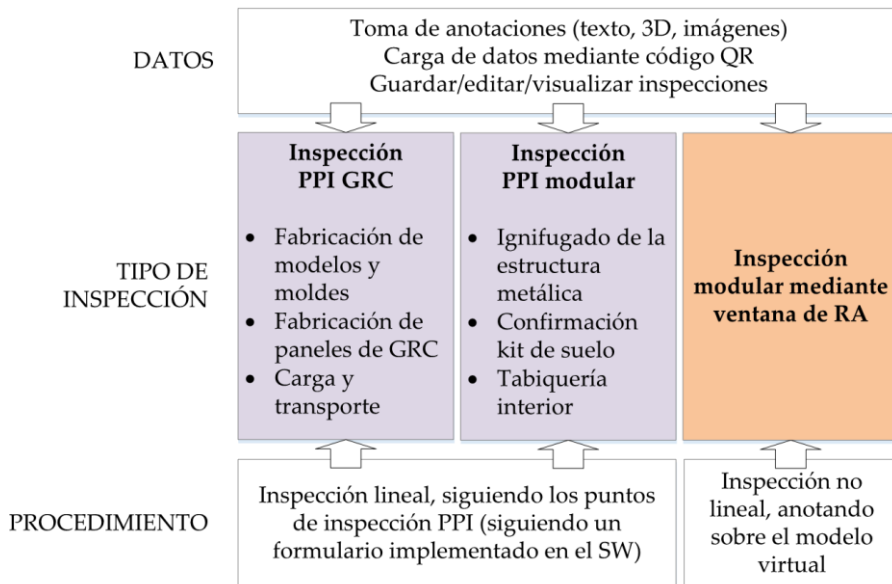


Figura 4.5. Metodología de inspección propuesta por SIRAE que se basa en los tradicionales PPI

A continuación, se muestra un ejemplo de actuación en un módulo prefabricado mediante la utilización de la metodología y la tecnología desarrolladas en SIRAE:

1. **Acceso al módulo.** El operador accede al módulo prefabricado CARACOLA llevando consigo una tableta con un sensor de visión 3D integrado.
2. **Escaneado y calibración.** El operador empieza una fase de escaneado y calibrado, en la que el sistema reconoce su entorno y es capaz de posicionarse dentro de este en tiempo real. Esto es posible gracias al uso de técnicas de visión por computador y de los sensores propios de la tableta (acelerómetro y giroscopio).
3. **Selección de tipo de parámetro.** El inspector selecciona, en la aplicación de Realidad Aumentada, el tipo de parámetro que quiere evaluar (por ejemplo, la eficiencia térmica). Automáticamente, el sistema muestra los umbrales de calidad, atendiendo a diversos factores (localización geográfica, elemento inspeccionado, etc.), que sirven de guía para el siguiente proceso de medición.
4. **Medición tradicional.** El inspector realiza la inspección mediante los dispositivos habituales (por ejemplo, una cámara térmica).
5. **Visualización e interacción mediante Realidad Aumentada.** El inspector puede visualizar el modelo virtual del módulo prefabricado superpuesto sobre el entorno físico. De este modo, puede crear anotaciones de Realidad Aumentada de diferentes tipos (texto, trazo, imagen o modelo 3D) referentes al resultado de la inspección y que quedan georreferenciadas al modelo. Además, puede visualizar y editar otras anotaciones que se hayan realizado en el módulo en inspecciones anteriores, tanto por él mismo como por otros inspectores.
6. **Trabajo en oficina.** Posteriormente, el operador puede visualizar en la oficina las anotaciones que ha realizado y los datos capturados durante la inspección en cuanto a las deficiencias o desviaciones constructivas. Por tanto, ya no es necesario que el inspector anote manualmente las deficiencias encontradas in situ, puesto que ya lo ha hecho de forma interactiva. Tampoco es necesario un volcado manual de los datos porque toda la información ha sido correctamente almacenada en la base de datos y puede recuperarse en cualquier momento. Con ello, se reduce el tiempo de trabajo en oficina y las posibilidades de error.

4.4. Especificación

Se detallan, a continuación, los requisitos técnicos del equipamiento hardware y los requisitos de usuario que describen los servicios que ofrece el sistema y las restricciones asociadas a su funcionamiento. Este conjunto de requisitos formará la base para desarrollar la especificación del sistema. Durante toda la sección, se hace referencia únicamente a aquellos aspectos que afectan de manera general al sistema o de forma específica a la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada, pero no a aquellos elementos que son propios de la herramienta PPI.

4.4.1. Requisitos técnicos

A la hora de determinar qué dispositivos son los idóneos para el desarrollo de SIRAE, es necesario tener en cuenta una serie de requisitos técnicos de funcionamiento del equipamiento en obra:

- **Precisión.** El sistema ha de realizar un posicionamiento preciso del dispositivo dentro del entorno de la obra en tiempo real para construir el entorno de la Realidad Aumentada de forma correcta.
- **Movilidad.** El equipo en el que se instale el sistema tiene que poder ser llevado de forma fácil y cómoda por los inspectores, por lo que se han de tener en cuenta aspectos como la autonomía, el tamaño y el peso.
- **Robustez.** Dado que el equipo se utilizará en un entorno de obra, debe tener robustez frente a agentes externos (polvo, agua, vibraciones, etc.).
- **Mantenimiento.** El mantenimiento del sistema ha de ser compatible con el del resto del equipo en obra. Por ello, las carcasas de protección de los dispositivos deben ser de materiales que no se degraden y que sean fácilmente lavables.
- **Precio.** Para maximizar las posibilidades de utilizar el sistema en un gran número de obras, es necesario que el precio de los equipos sea reducido.
- **Facilidad de instalación.** El software desarrollado debe ser autoejecutable en los dispositivos seleccionados.
- **Presentación.** La información se debe presentar de forma amigable e intuitiva. Además, es importante que el operador disponga de una visión amplia del entorno real, que estará aumentado con información virtual interactiva, sin que los elementos de la interfaz gráfica resulten molestos.

- **Adecuación.** El dispositivo debe ser apropiado para el entorno de trabajo en el que será utilizado, por lo que debe cumplir los siguientes requisitos: debe ser óptimo para trabajar en interiores, ser lo menos intrusivo posible evitando el contacto directo con los elementos constructivos y permitir trabajar con rangos de distancia entre 1 y 3 metros.
- **Tiempo de respuesta.** El sistema ha de trabajar en tiempo real por lo que los tiempos de respuesta deben ser los más cortos posibles.

Para diseñar la solución final, se ha de tener en cuenta tanto el dispositivo que se va a utilizar para combinar el mundo físico con el mundo virtual, pues será el que proporcione una interacción óptima, como los sensores que permitirán conseguir el posicionamiento en tiempo real con la precisión requerida. La robustez del sistema final depende, en gran medida, de la elección de ambos elementos.

4.4.2. Requisitos de usuario

Los requisitos funcionales y no funcionales de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE son los siguientes:

Requisitos funcionales

- RF1. El sistema debe permitir realizar trabajos de inspección en campo y en oficina.
- RF2. El sistema debe permitir consultar en oficina todos los defectos anotados mediante Realidad Aumentada durante las diferentes inspecciones realizadas en campo.
- RF3. El sistema debe permitir el posicionamiento de forma automatizada durante el proceso de inspección en campo. Para ello, será necesaria una calibración inicial.
- RF4. El sistema debe permitir la visualización de elementos virtuales superpuestos a la imagen del entorno físico en tiempo real durante el proceso de inspección en campo.
- RF5. El sistema debe permitir cambiar el nivel de transparencia del mundo virtual sobre el mundo físico durante la inspección en campo.
- RF6. El sistema debe permitir la creación y el almacenamiento de anotaciones de Realidad Aumentada de diversos tipos durante la inspección.

- RF7. El sistema debe permitir la lectura, edición y eliminación de anotaciones de Realidad Aumentada durante la inspección en campo, hayan sido tomadas en dicha inspección o en otras anteriores.
- RF8. El sistema debe permitir a los inspectores marcar como corregidos defectos anotados mediante Realidad Aumentada en proceso previos de inspección en campo.

Requisitos no funcionales

- RNF1. El escaneado de módulos constructivos en tiempo real debe alcanzar precisiones del orden de 2-3 cm.
- RNF2. Las distancias de trabajo deben oscilar entre 0,4 y 3 m, pues deben ser menores a cualquiera de las tres dimensiones (longitud, anchura, altura) del interior de los módulos CARACOLA.
- RNF3. El campo de visión de las cámaras del sistema debe ser óptimo para la inspección interior de un módulo CARACOLA (mínimo 45 grados).
- RNF4. Los dispositivos que conformen el sistema deben tener una autonomía de, al menos, 2 horas.
- RNF5. La visualización del entorno de Realidad Aumentada debe hacerse en una pantalla de suficientes dimensiones para permitir visualizar diversos datos y realizar anotaciones de forma cómoda (mínimo 10 pulgadas).
- RNF6. Los dispositivos que lleve consigo el inspector de campo no deben pesar, en su conjunto, más de 2,5 kg.

4.4.3. Especificación del sistema

Tras el análisis de todos los requisitos técnicos y de usuario, la solución propuesta para SIRAE consiste en una aplicación de Realidad Aumentada para dispositivos móviles cuyo uso óptimo se consigue mediante el uso de una tableta con un sensor 3D acoplado. Se trata de un sistema dirigido a los inspectores de módulos prefabricados de edificios energéticamente eficientes. Gracias a esta herramienta, sus usuarios pueden llevar a cabo de forma digital el proceso de inspección tradicional (Programa de Puntos de Inspección, PPI), consultar y editar la información almacenada previamente sobre el módulo y sus elementos constructivos, tomar y almacenar nuevos datos y documentar las desviaciones en

el diseño mediante el uso de anotaciones de Realidad Aumentada. Tras realizar un estudio de las posibles soluciones hardware que existen en el mercado, se opta por los siguientes **dispositivos**, que cumplen con todos los requisitos no funcionales (RNF1-RNF6):

- **Structure Sensor de Occipital.** Este dispositivo es un sensor 3D que se acopla a dispositivos móviles. La reconstrucción 3D está basada en técnicas de luz estructurada. El dispositivo cuenta con un par proyector/cámara en la banda del infrarrojo cercano. Mediante el proyector, se proyectan miles de puntos. La cámara recoge estos puntos y, mediante triangulación, se calcula una imagen de rango que posteriormente se puede transformar a nube de puntos 3D. El dispositivo es ligero y viene provisto de un dispositivo de aluminio para ser acoplado a una tableta tipo iPad. El rango de medición óptimo del sensor va desde los 40 cm a los 3.5 m, lo que lo hace ideal para capturar espacios interiores.
- **iPad.** El sensor seleccionado está pensado para acoplarse al iPad y su SDK es compatible con el sistema operativo iOS. Es por ello que se ha optado por un iPad. Por otro lado, dentro del mercado de las tabletas inteligentes, el iPad sobresale por sus altas prestaciones: nivel de rendimiento y autonomía, capacidad de almacenamiento y calidad de componentes ópticos. En concreto, se ha optado por un iPad Pro de 10.5 pulgadas.

Ambos dispositivos están protegidos con una carcasa que los aísla de las condiciones adversas del entorno de obra a la vez que permite a los inspectores un uso cómodo del sistema. El dispositivo iPad se protege mediante una carcasa de tres piezas, tal y como muestra la Figura 4.6. La primera de las piezas consiste en una funda transparente que protege la pantalla táctil; la segunda de las piezas es rígida, protege el resto del iPad y permite sujetarlo con una mano por detrás cómodamente; la tercera de las piezas es de goma, abraza a las otras dos sujetándolas con firmeza y amortigua los posibles golpes y caídas. Por su parte, el dispositivo Structure Sensor se protege mediante una carcasa ligera pero robusta. Esta pieza es de fabricación propia y se ha construido mediante una impresora 3D. La carcasa se ajusta al sensor, lo protege y lo fija a la pieza de goma del iPad mediante tornillos, tal y como muestra la Figura 4.7.

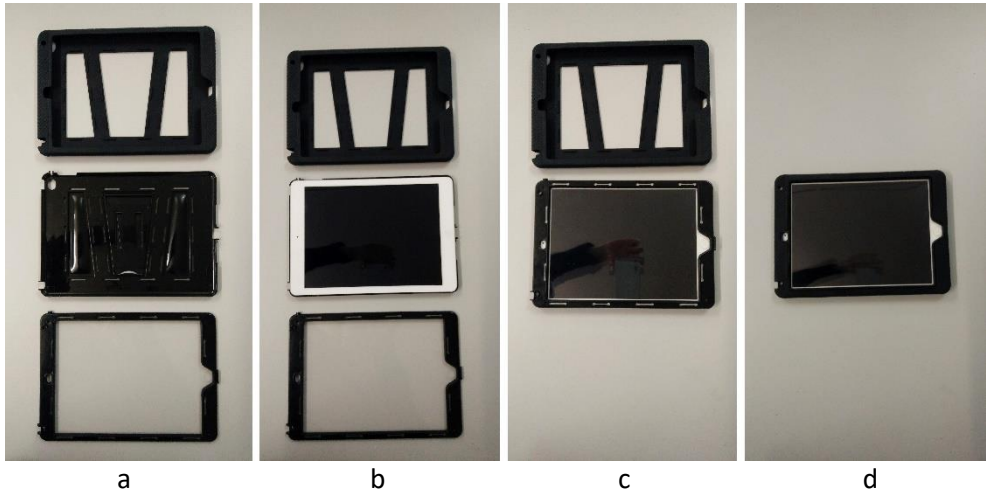


Figura 4.6. Proceso de montaje de la carcasa del iPad: a) las tres piezas de la carcasa (arriba: funda protectora de goma; medio: pieza rígida; debajo: funda transparente para la pantalla); b) el iPad montado sobre la funda rígida; c) la funda transparente montada sobre el iPad y la funda rígida; d) solución final del iPad protegido con las tres piezas de la carcasa



Figura 4.7. Carcasa 3D y Structure Sensor (izquierda); montaje final sobre la carcasa de goma (derecha)

Para poder acceder a las funcionalidades de la aplicación, el usuario debe introducir unas credenciales válidas. A continuación, debe indicar el código de la obra que va a inspeccionar y se le muestra la información de dicha obra. Posteriormente, se le presenta un sencillo menú desde el que puede acceder a la herramienta de PPI o a la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada.

Para utilizar la **herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada**, los inspectores deben situarse físicamente en el módulo CARACOLA a revisar. Una vez allí, el sistema se ha de calibrar para superponer adecuadamente el modelo virtual

del módulo diseñado inicialmente sobre el entorno físico. Para ello, deberán enfocar con la cámara de la tableta alguna de las marcas ubicadas en el módulo prefabricado. Cuando el sistema alinea los dos mundos, el operario puede desplazarse físicamente por el módulo que está inspeccionando y visualizar la información virtual superpuesta sobre el entorno físico. Con este procedimiento, se da solución a los requisitos RF3 y RF4. Cuando detecta algún error, puede señalar el punto en el modelo virtual que quiere remarcar y elegir el tipo de anotación que quiere realizar. Una vez realizada la anotación, ésta se representa mediante una esfera y puede ser consultada en inspecciones posteriores para añadirle nueva información mediante otro tipo de anotación o para marcarla como corregida cuando el problema haya sido resuelto.

La herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada tiene integrado un canal alfa que opera sobre el modelo virtual del módulo CARACOLA. El nivel de transparencia del modelo virtual puede ajustarse en cualquier momento. Esto permite visualizar únicamente el entorno físico, únicamente el modelo virtual o ambos mundos superpuestos, con diferentes transiciones intermedias. Esta funcionalidad es crucial para comparar los elementos físicos con sus homólogos virtuales y así detectar las posibles desviaciones geométricas existentes en los módulos prefabricados. No se aplica transparencia a las esferas que representan las anotaciones porque, si bien son elementos virtuales, deben estar siempre visibles durante la inspección, sin importar si el inspector está visualizando el entorno físico o el virtual. Con esto, se da solución al requisito RF5.

Con esta herramienta, los inspectores pueden realizar cinco tipos de anotaciones de Realidad Aumentada (RF6):

- **Texto.** Para crear una anotación de tipo texto, el inspector primero debe seleccionar en la pantalla de la tableta el punto del modelo 3D que quiere anotar. Posteriormente, se abre un cuadro de texto en el que puede ingresar el texto deseado y guardar la información.
- **Imagen RGB.** Las anotaciones fotográficas se realizan mediante la cámara de la tableta. Al capturar una imagen RGB, una pequeña esfera se vincula al mundo real a través de las coordenadas donde fue tomada. Posteriormente, la imagen se puede visualizar de dos formas: en una galería de imágenes tradicional o proyectada sobre el modelo virtual. Para

esta segunda modalidad, se aplican las deformaciones necesarias para obtener una perspectiva que se corresponda con el punto de vista del usuario actual.

- **Imagen infrarroja.** El modo de proceder es el mismo que con las imágenes RGB, pero haciendo uso del escáner 3D en lugar de la cámara de la tableta.
- **Modelo 3D.** Los inspectores pueden escanear parte del mundo físico para construir un modelo 3D de la parte del módulo prefabricado que quieren convertir en una anotación. Para ello, la aplicación captura, mediante el sensor 3D, una nube de puntos, la convierte en un modelo 3D y la vincula a las coordenadas donde se realizó el escaneo.
- **Trazo.** Si el usuario opta por realizar una anotación de tipo trazo, puede dibujar en la escena utilizando su dedo a modo de lápiz sobre la pantalla de la tableta. Esto permite a los inspectores resaltar los errores detectados en el módulo mediante círculos o flechas, por ejemplo.

Cuando un inspector ha creado y guardado una anotación, puede modificarla o eliminarla. Además, otros operarios pueden verla y agregarle nueva información en inspecciones posteriores del módulo prefabricado. Esto permite una colaboración en el tiempo entre los diferentes trabajadores que revisan el módulo. Por lo general, se toma una anotación para indicar un defecto detectado en un módulo prefabricado. Cuando se soluciona el defecto, la anotación debe modificarse y marcarse como “corregida”. Con este fin, las anotaciones se representan mediante pequeñas esferas rojas y, una vez corregidas, se vuelven verdes. La aplicación brinda la posibilidad de ocultar anotaciones ya corregidas para mejorar la interacción con otras esferas. Estas funcionalidades dan solución a los requisitos RF7 y RF8.

El volcado a la **base de datos** de toda la información tomada durante una inspección se hace en tiempo real. Esta base de datos recoge y relaciona información de diversa índole e incluye tanto las anotaciones de Realidad Aumentada (texto, imágenes, modelos 3D, coordenadas, etc.) como los datos previos requeridos (modelo del módulo CARACOLA, umbrales de calidad, planos, etc.). De este modo, es posible saber, mediante una consulta a la base de datos, a qué elemento constructivo y a qué módulo pertenece una fotografía, por ejemplo. Además, la base de datos guarda una relación de los inspectores y de las fechas de cada inspección. Esto permite extraer un listado de todas las inspecciones

realizadas por un mismo inspector o un listado de todas las inspecciones realizadas en un intervalo temporal, por ejemplo. La base de datos de SIRAE también es capaz de almacenar el historial de ediciones de cada anotación de Realidad Aumentada, permitiendo así un uso colaborativo de la aplicación y la gestión eficiente de los problemas a lo largo del tiempo. Con esto se cumple con lo establecido en los requisitos RF1 y RF2.

El diseño de la **interfaz gráfica** se ha de llevar a cabo pensando siempre en hacer el uso de SIRAE lo más sencillo posible. Con este proyecto se pretende simplificar el trabajo de los inspectores por lo que es primordial que la interfaz gráfica sea el mejor aliado de este propósito. Títulos concisos, menús sencillos que no interfieran en la visualización del entorno, pasos claros y delimitados, apariencia minimalista, etc. son los elementos que guían el diseño de la aplicación.

4.5. Análisis

En base a los requisitos y funcionalidades detallados en la sección anterior, se ha diseñado un diagrama con los casos de uso que conforman la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE (Figura 4.8). A continuación, se describe cada uno de ellos en formato de alto nivel.

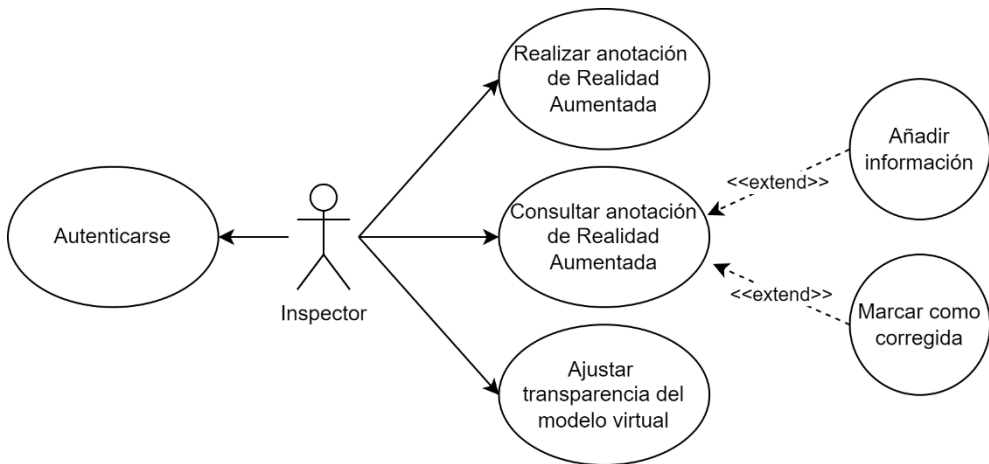


Figura 4.8. Diagrama de casos de uso de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE

Caso de uso: Autenticarse

Actor: Inspector

Tipo: Primario y esencial

Resumen: Al acceder a la aplicación, el usuario debe introducir un nombre de usuario y una contraseña válidos para poder utilizar las funcionalidades del sistema.

Caso de uso: Realizar anotación de Realidad Aumentada

Actor: Inspector

Tipo: Primario y esencial

Pre-condiciones: El usuario se ha autenticado y ha introducido un código de obra.

Resumen: El usuario accede al menú de Realidad Aumentada y enfoca una marca para que el sistema alinee el mundo virtual con el mundo físico. El usuario elige qué elemento del entorno quiere anotar, selecciona el tipo de anotación y realiza los pasos que le indica el sistema para crear una anotación de Realidad Aumentada. Ésta queda representada en el entorno mediante una esfera roja, que podrá pulsar para modificar o eliminar dicha anotación.

Caso de uso: Consultar anotación de Realidad Aumentada

Actor: Inspector

Tipo: Primario y esencial

Pre-condiciones: El usuario se ha autenticado y ha introducido un código de obra.

Resumen: El usuario accede al menú de Realidad Aumentada y enfoca una marca para que el sistema alinee el mundo virtual con el mundo físico. Si él u otros inspectores han realizado con anterioridad anotaciones en el módulo que está inspeccionando, las verá en el entorno representadas mediante esferas rojas o verdes. Al pulsar sobre ellas, podrá consultar la información que contienen y podrá añadirles nuevos datos mediante la creación de otras anotaciones de Realidad Aumentada. En el caso de las esferas rojas, podrá marcarlas como corregidas si el defecto señalado ha sido solventado.

Caso de uso: Añadir información

Actor: Inspector

Tipo: Secundario y esencial

Pre-condiciones: El usuario está consultando una anotación.

Resumen: Un inspector puede añadir nueva información a un defecto de un módulo que ya ha sido documentado mediante una anotación de Realidad Aumentada. Para ello, selecciona una esfera ya creada en el módulo e indica qué tipo de anotación quiere realizar. Seguirá con los pasos habituales del caso de uso “Realizar anotación de Realidad Aumentada” y la nueva información quedará vinculada a la esfera existente, sin crear una nueva.

Caso de uso: Marcar como corregida

Actor: Inspector

Tipo: Secundario y esencial

Pre-condiciones: El usuario está consultando una anotación.

Resumen: Cuando un inspector verifica que un defecto constructivo de un módulo ya ha sido solventado, puede marcar como corregida la anotación de Realidad Aumentada que documenta dicho error, seleccionándola y verificando su decisión. Cuando lo hace, la esfera que representa la anotación se muestra en verde.

Caso de uso: Ajustar transparencia del modelo virtual

Actor: Inspector

Tipo: Primario y esencial

Pre-condiciones: El usuario se ha autenticado y ha introducido un código de obra.

Resumen: El usuario accede al menú de Realidad Aumentada y enfoca una marca para que el sistema alinee el mundo virtual con el mundo físico. Mientras usa esta herramienta, ya sea para crear nuevas anotaciones o para consultar las que hay, puede modificar el nivel de transparencia del modelo virtual desde 0 (sólo verá el modelo virtual) hasta 100 (sólo verá el entorno real y las esferas que representan las anotaciones).

4.6. Diseño

En este apartado se define la arquitectura general del sistema establecida para SIRAE en base a toda la información recopilada en las secciones anteriores; se detalla la estructura de datos que se va a seguir para la futura implementación de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada; y se define la interfaz de usuario de dicha aplicación.

4.6.1. Arquitectura general del sistema

El diseño de SIRAE se basa en una arquitectura software de tipo modular, en la que destacan tres módulos esenciales:

- **Módulo de visión por computador:** se encarga del procesamiento de imágenes para poder analizar las posibles causas de las deficiencias energéticas.
- **Módulo de georreferenciación:** permite el correcto posicionamiento en tiempo real de los objetos virtuales sobre el mundo físico.
- **Módulo de Realidad Aumentada:** dota a la inspección en obra de valor añadido al permitir documentar las deficiencias encontradas mediante anotaciones de Realidad Aumentada.

La Figura 4.9 muestra los componentes de los que dispone cada módulo, repartidos entre las diferentes capas del sistema: la capa central o núcleo, la capa de interfaz y la capa de clientes. La capa del núcleo incorpora los procedimientos internos para la generación del escenario de Realidad Aumentada, la captura de datos, la georreferenciación, etc. Los procedimientos recuperan datos del hardware (tableta y escáner 3D), teniendo acceso a los diferentes sensores integrados en ellos. Estos procedimientos también están conectados a bases de datos, de forma que la información capturada y las anotaciones realizadas se almacenan allí a la vez que se puede recuperar, en tiempo real, la información previa existente. La capa de interfaz consta de un conjunto de ventanas para la visualización del escenario de Realidad Aumentada, la captura de datos de diversa índole (nube de puntos, anotaciones de Realidad Aumentada, cumplimentación de PPI, fotografías, etc.) y la gestión de la configuración de los sensores (calibración, brillo de pantalla, etc.). Todo ello está disponible a través de la pantalla táctil del iPad (el cliente in situ), que pertenece a la capa de clientes.

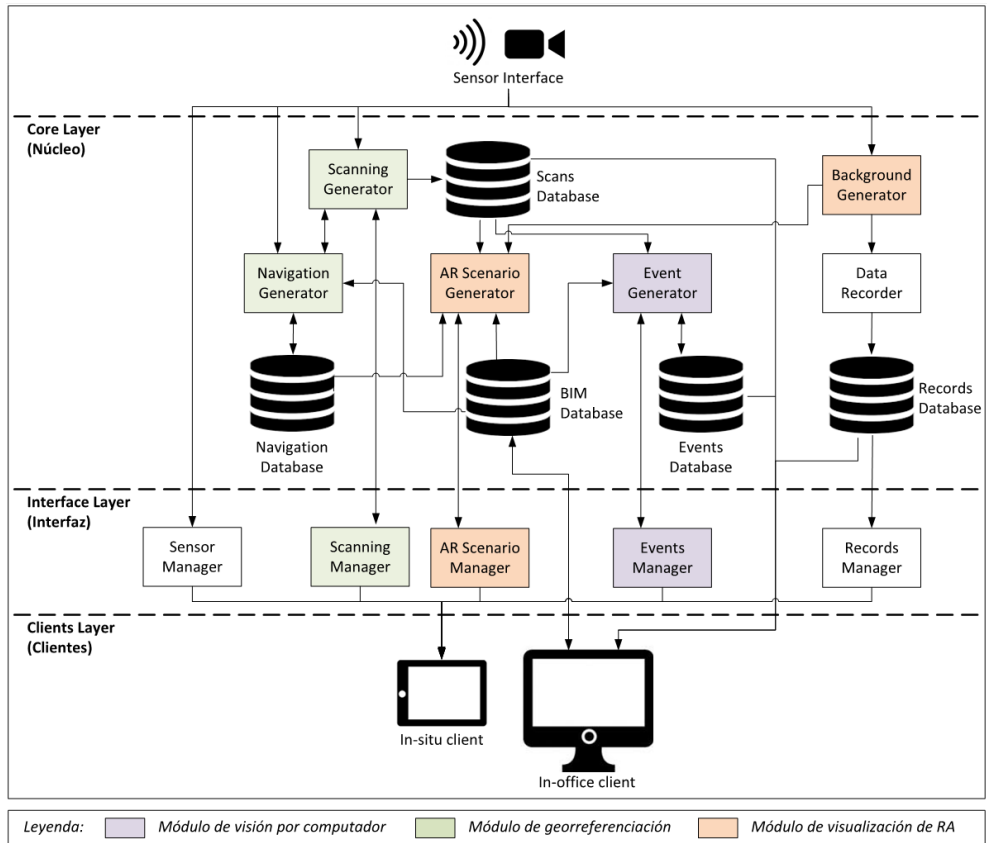


Figura 4.9. Esquema detallado de la arquitectura general del sistema SIRAE

El proceso de anotación que se lleva a cabo durante las inspecciones, se gestiona a través de los componentes **AR Scenario Generator** y **AR Scenario Manager**, principalmente, aunque también se apoya en el **Navigation Generator** para la georreferenciación y el seguimiento.

4.6.2. Estructura de datos

En el componente **AR Scenario Generator** mostrado en la Figura 4.9, se diseña una clase que es la que permite la gestión de toda la información relativa a las anotaciones de Realidad Aumentada y es aquí donde la caracterización y el modelo de datos desarrollados en esta tesis doctoral tiene una aplicación directa. En el Capítulo 3, se establecieron las características fundamentales que hay que definir durante el proceso de diseño de una anotación de Realidad Aumentada.

Estas características se agrupan en torno a cuatro ejes, que se analizan a continuación para el caso concreto de SIRAE:

- **Contenido.** La funcionalidad de las anotaciones que se van a utilizar en el proceso de inspección mediante SIRAE es tanto enfatiza el mundo físico (pues hay que señalar dónde están las desviaciones de diseño) como enriquecerlo (pues se le añade información virtual que documenta cada error). En concreto, se ha visto necesaria la incorporación de los siguientes tipos de anotaciones de Realidad Aumentada:
 - **Texto:** para explicar los detalles de las deficiencias encontradas en un determinado elemento constructivo.
 - **Trazo:** para marcar o señalar el punto exacto de la deficiencia.
 - **Fotografía:** para documentar las deficiencias encontradas mediante imágenes.
 - **Modelo 3D:** para almacenar una representación tridimensional de los elementos constructivos defectuosos.

Esta clasificación atiende más a la complejidad y, por tanto, a la forma final que adquiere la anotación que a su funcionalidad. Sin embargo, esto no es impedimento para aplicar el modelo de datos propuesto ya que, en él, el contenido de una anotación queda definido mediante un conjunto de pares clave-valor, por lo que es aplicable a cualquier tipo de anotación que se quiera definir. En cualquier caso, también se pueden clasificar las anotaciones de SIRAE siguiendo la propuesta hecha por (Keil et al., 2018) ya que, al analizar su funcionalidad, se observa que los trazos son anotaciones de tipo Indicadores Visuales, los modelos 3D y las imágenes son Material transmedia y los textos son Etiquetas.

- **Ubicación.** Cuando se realiza una anotación con SIRAE, ésta queda georreferenciada a unas coordenadas del modelo virtual. Posteriormente, es en ese punto donde se muestra el contenido virtual de la misma. Esto significa que no hay necesidad de diferenciar entre la ubicación del anclaje y la ubicación de la información virtual, pues se almacena una única posición, la del anclaje, y es ahí donde se muestra todo el contenido virtual de la anotación. Por tanto, no existe distancia ni libertad de movimiento y el sistema de referencia es siempre el mismo, el mundo, representado por el modelo virtual del módulo en el que se toma la anotación. Un caso

particular es el de las fotografías ya que éstas pueden ser mostradas proyectadas sobre el modelo virtual. Para ello, se aplican las deformaciones necesarias para obtener una perspectiva que se corresponda con el punto de vista del usuario actual. Por tanto, la única información requerida por SIRAE a la hora de almacenar la ubicación de una anotación de Realidad Aumentada es un punto con seis grados de libertad que se definirá en referencia al punto (0,0,0) del mundo virtual.

- **Temporalidad**, que se basa en tres conceptos:
 - **Variabilidad**. En SIRAE, las anotaciones pueden ser editadas a lo largo del tiempo por uno o varios inspectores. Además, muchas anotaciones están vinculadas entre sí porque hacen referencia a una misma deficiencia y, por tanto, quedan representadas por una única esfera virtual. Así pues, es muy importante tener en cuenta la variabilidad de la información virtual de las anotaciones a lo largo del tiempo ya que esto implica guardar un histórico de todos los cambios producidos.
 - **Visibilidad**. La estrategia seguida en SIRAE para controlar la visibilidad de las anotaciones es “a demanda”, pues es el usuario quien decide en cada momento si quiere ver todas las anotaciones o sólo las que no están corregidas.
 - **Existencia**. Las anotaciones de SIRAE presentan una temporalidad continua pues, una vez creadas, existen de forma constante, independientemente de que estén o no visibles para el usuario.
- **Interacción**. Como se ha venido describiendo a lo largo de todo este capítulo, las anotaciones de SIRAE son creadas en línea por los propios usuarios del sistema, quienes eligen su contenido y ubicación, y posteriormente pueden ser visualizadas y editadas por otros usuarios. Por tanto, su grado de interacción es máximo.

El diseño de las características de las anotaciones de Realidad Aumentada que los inspectores pueden tomar con SIRAE queda completamente definido en torno a los cuatro ejes propuestos en el capítulo anterior. Por tanto, el modelo de datos desarrollado en dicho capítulo es perfectamente aplicable a SIRAE, tomando algunas decisiones con respecto a la representación de determinados datos, que se especificarán en la Sección 4.7. “Implementación”.

4.6.3. Interfaz de usuario

En el diseño de la interfaz de usuario de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada, es importante que el operador disponga de una visión amplia del entorno real, que estará aumentado con información virtual interactiva, sin que otros elementos de la interfaz gráfica resulten molestos. Para ello, se diseña la interfaz de usuario mostrada en la Figura 4.10, donde únicamente se dispone de una barra deslizadora para controlar el grado de opacidad del modelo virtual (en la parte superior), un botón para salir (rojo) y otro para añadir una anotación de Realidad Aumentada (negro). Si se pulsa este último botón, aparece un panel de selección con los diferentes tipos de anotación que los inspectores pueden realizar, como muestra la imagen de la derecha de la Figura 4.10: escribir un texto, tomar una imagen RGB, tomar una imagen de infrarrojos, realizar el escaneo de un modelo 3D y dibujar un trazo. La Figura 4.11 muestra ejemplos de las diferentes interfaces diseñadas para crear algunos de estos tipos de anotaciones.

Cuando se encuentra una deficiencia en un módulo durante una inspección y se documenta mediante una anotación de Realidad Aumentada, ésta queda georreferenciada y se marca con una pequeña esfera roja (Figura 4.12a). Al pulsar sobre ella, se abre un panel que muestra toda la información asociada a dicha deficiencia (Figura 4.12b), esto es: cada una de las anotaciones que uno o varios inspectores han realizado, en diferentes momentos, sobre un mismo punto del espacio físico (sobre un mismo defecto). Desde este panel, se puede pulsar sobre el botón de “Corregir incidencia” cuando se solventa el defecto detectado y, tras confirmar los cambios (Figura 4.12c), la esfera se torna verde (Figura 4.12d).

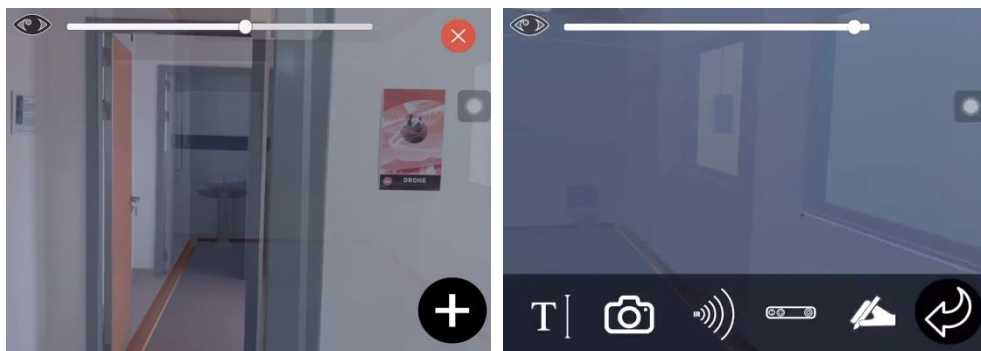


Figura 4.10. Diseño de la interfaz gráfica de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada. A la derecha se muestra desplegado el menú para crear una nueva anotación

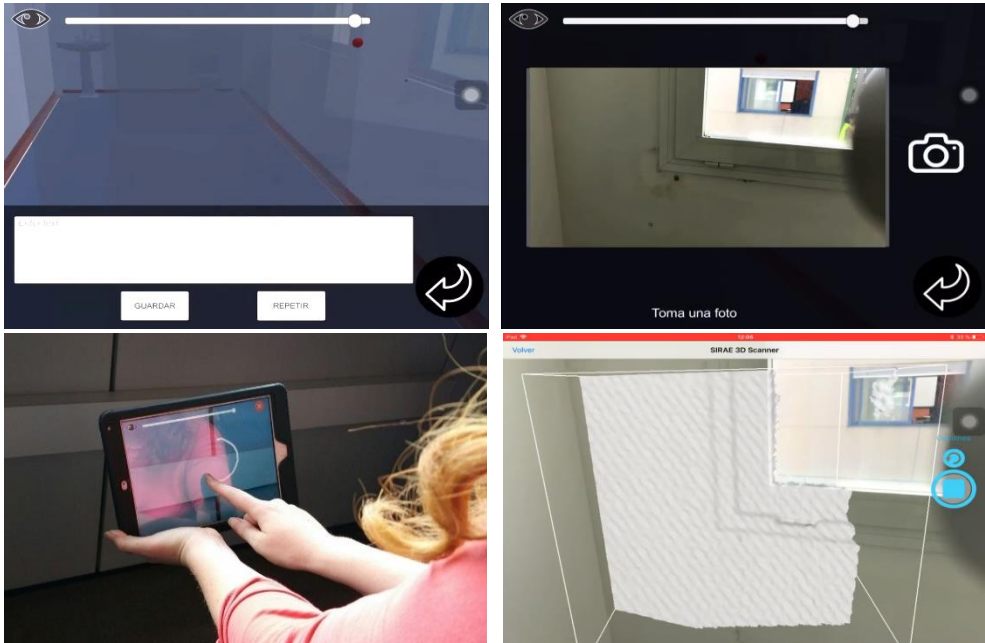


Figura 4.11. Interfaz de usuario para crear anotaciones de tipo texto (arriba izquierda), imagen RGB (arriba derecha), trazo (abajo izquierda) y modelo 3D (abajo derecha)

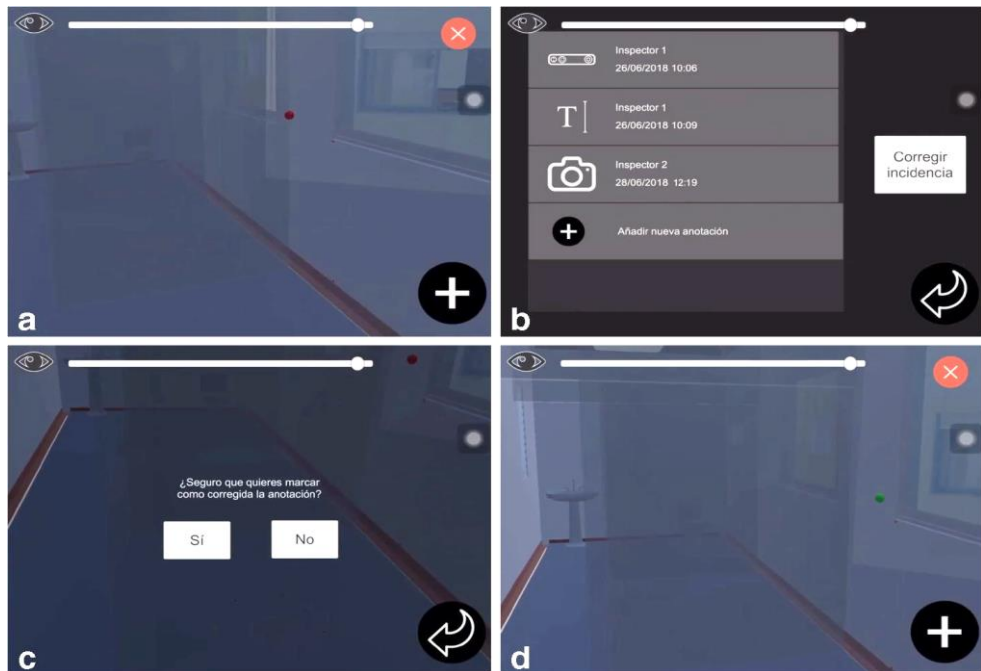


Figura 4.12. Interfaz de usuario para marcar como corregida una anotación con SIRAE

4.7. Implementación

Durante la ejecución de esta tarea, se desarrollan completamente los tres módulos más críticos del sistema, en cuanto a arquitectura software interna, descritos en el Apartado 4.6.1. “Arquitectura general del sistema”. Para ello, se utiliza la plataforma de desarrollo Unity, que permite trabajar con Realidad Aumentada y con todas las librerías requeridas para la correcta implementación de SIRAE, como OpenCV o Vuforia, entre otras. A continuación, se detallan las decisiones más importantes tomadas con respecto a la implementación de los módulos y de la base de datos correspondientes a la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE.

4.7.1. Calibración y seguimiento

La implementación del módulo de georreferenciación proporciona un mecanismo de posicionamiento en tiempo real que tiene en cuenta las necesidades específicas del entorno constructivo (oclusiones, elementos eléctricos que pueden producir interferencias, condiciones de luminosidad adversas, etc.). En concreto, se hace un uso combinado de los marcadores de Realidad Aumentada situadas en el entorno y de los sensores de los dispositivos que llevan consigo los inspectores (tableta y sensor 3D).

Cuando un operario inicia el proceso de inspección de un módulo completo con la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada, es necesario establecer una localización inicial que sirva para alinear el entorno físico y el entorno virtual. Esta calibración inicial se realiza con marcadores de Realidad Aumentada, a partir de las cuales se establece la posición y rotaciones iniciales del punto de vista de la cámara de la tableta en el entorno físico. Esta localización inicial es trasladada a la cámara virtual para poder ofrecer una vista del modelo virtual que esté totalmente alineada con el mundo físico. Una vez hecha la alineación, se utilizan los sensores integrados en la tableta para hacer un seguimiento, en tiempo real, de los movimientos del inspector.

En la implementación de este módulo, se utilizan las bibliotecas Vuforia y ARKit, que permiten desarrollar aplicaciones de Realidad Aumentada con navegación basada en el reconocimiento de imágenes. Gracias a Vuforia, la aplicación captura

los diferentes marcadores de Realidad Aumentada distribuidos a través de los módulos prefabricados para usarlos como referencia y así poder alinear el modelo virtual con el mundo real. Una vez realizada la alineación inicial, ARKit se basa en el análisis de la imagen y la orientación del dispositivo móvil para conocer la ubicación del punto de vista del usuario y obtener su posicionamiento relativo a los marcadores. De esta manera, los inspectores pueden moverse por el módulo prefabricado sin perder la alineación del modelo 3D con respecto al entorno físico. Cada vez que el sistema detecta un marcador de Realidad Aumentada, corrige la alineación espacial, logrando un posicionamiento más preciso.

4.7.2. Anotaciones de Realidad Aumentada

Como se especificó durante el diseño, una esfera representa una combinación de anotaciones para una única ubicación, que se adquieren a lo largo de las sucesivas inspecciones realizadas en un módulo. Por ejemplo, el Inspector 1 puede tomar una anotación de tipo texto que indique que una pared está defectuosa y luego escanearla para documentar el defecto a través de un modelo 3D. Ambas anotaciones están ancladas a un único punto del modelo virtual del módulo prefabricado mediante una esfera roja. Una vez que se corrige el error, el Inspector 2 puede tomar una imagen vinculada a la misma anotación para documentar que el problema en la pared ya se ha solucionado. La Figura 4.12b muestra un panel con el historial de anotaciones que contiene toda esta información. Para lograr esto, es necesario almacenar el historial de ediciones de cada anotación. Con este objetivo, se hace uso de un servicio web REST, que se implementa con Node.js y que dispone de una base de datos MongoDB (detallada en el siguiente apartado). La herramienta de Realidad Aumentada realiza solicitudes HTTP a este servidor para almacenar y recuperar toda la información relacionada con las anotaciones de la base de datos.

Para las anotaciones de tipo texto, es el usuario el que debe indicar el punto exacto del modelo virtual al que quiere vincular la información. Esto se debe a que dichas anotaciones no tienen una referencia espacial directa y es el inspector el que debe dársela. En cambio, las anotaciones de imágenes, ya sean RGB o de infrarrojos, y las de modelos 3D, se georreferencian automáticamente en el espacio mediante la técnica de *ray casting*: el primer objeto interceptado por un rayo es anotado en el punto donde se produce la colisión. Este rayo representa una línea

recta invisible lanzada desde la posición y con la orientación de la cámara de la tableta.

Las fotografías y nubes de puntos generadas durante el proceso de inspección se guardan en formato JPG y OBJ respectivamente. Además, las anotaciones de tipo imagen pueden visualizarse proyectadas sobre el modelo virtual de forma que respeten el punto de vista del usuario actual.

Para las anotaciones de tipo trazo, se opta por una estrategia de proyección. Existen diversos estudios sobre las diferentes técnicas que se pueden emplear a la hora de localizar y representar este tipo de información virtual (Gauglitz et al., 2014a; Nuernberger et al., 2016). En SIRAE, los tipos de trazos a realizar son, principalmente, círculos y flechas, pues el objetivo es señalar el lugar donde se ha encontrado una deficiencia. Es por ello que el método de proyección cumple con las expectativas del proyecto.

A la hora de implementar el módulo de visualización de Realidad Aumentada, es necesario considerar también la oclusión de las esferas poder mostrarlas de forma adecuada a los inspectores. La oclusión en aplicaciones de Realidad Aumentada consiste en la capacidad de ocultar objetos virtuales detrás de los físicos para lograr una perfecta integración entre el mundo físico y el virtual. Las esferas no se ven afectadas por el canal alfa, por lo que siempre son visibles incluso cuando el nivel de transparencia es del 100%. Por tanto, se debe calcular una oclusión adecuada con los elementos reales de la escena. Dado que se dispone de un modelo 3D del módulo prefabricado, es posible utilizarlo como objeto fantasma para realizar correctamente la oclusión de las esferas, tal y como muestra la Figura 4.13.

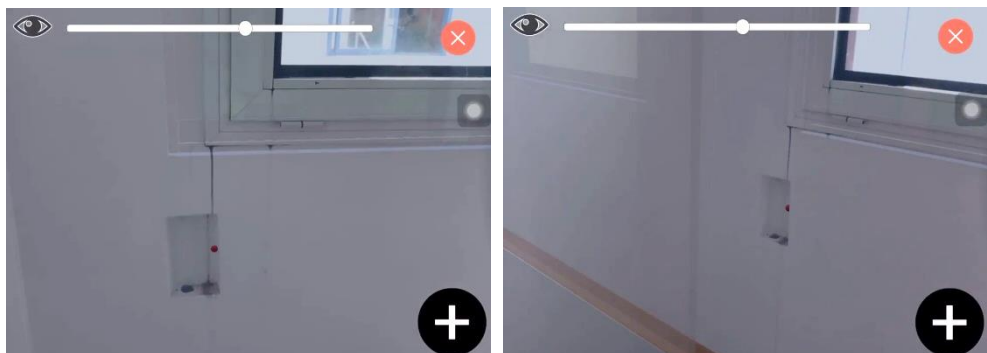


Figura 4.13. Oclusión de una anotación de Realidad Aumentada durante una inspección

4.7.3. Base de datos

La información referente a las anotaciones de Realidad Aumentada se almacena en una base de datos no relacional que se implementa mediante MongoDB. Esta decisión se toma en base a la flexibilidad que ofrecen las bases de datos noSQL. Éstas están orientadas a colecciones y documentos y se caracterizan por su sencillez, por ser más rápidas que las SQL y por presentar un esquema libre. Esta forma de trabajo permite tener un modelo más abierto para incorporar, en cualquier momento, cuantos tipos de anotaciones sean necesarios con modificaciones mínimas en la base de datos.

Como se analizó en la fase de diseño (Apartado 4.6.2.), el modelo de datos desarrollado en esta tesis doctoral es perfectamente aplicable a SIRAE, tomando algunas decisiones con respecto a la implementación de determinados datos, como se detalla a continuación.

Una de las particularidades de las anotaciones realizadas durante las inspecciones es que pueden estar marcadas como corregidas o no. Esto afecta a su visibilidad e implica guardar información respecto a qué usuario las corrigió y cuándo. Para indicar que una anotación está corregida, se añade una nueva `<property>` dentro de `<content>`, como muestra el Código 4.1. No es necesario incluir en este campo los datos del usuario que hizo esta modificación y en qué fecha puesto que cada anotación dispone de un historial de ediciones. Esto significa que, cada vez que se altera algún parámetro de una anotación, se guarda de nuevo toda su información con los campos debidamente modificados. Así pues, una anotación que ha sido marcada como corregida dispone de su propio usuario y fecha e incluye una `<property key="corregida">`.

```
<content type="texto">
  <property key="corregida">
    <value>true</value>
  </property>
</content>
```

Código 4.1. Elemento que indica que una anotación ha sido marcada como corregida

Quando un inspector documenta un defecto de un elemento constructivo mediante una anotación de Realidad Aumentada, ésta queda vinculada al modelo virtual mediante una pequeña esfera georreferenciada. Esta esfera puede estar

compuesta por una o más anotaciones. Esto implica que el sistema debe ser capaz de recuperar todas las anotaciones referenciadas por una única esfera. Si bien el elemento `editionsHistory` del modelo de datos propuesto permite relacionar un conjunto de anotaciones, su finalidad es almacenar los cambios hechos en una misma anotación, por lo que no sirve para este fin. La decisión de implementación tomada ha sido indicar, en cada anotación, quién es su anotación raíz (la que generó la esfera) mediante una nueva `<property>` dentro de `<content>`, como muestra el Código 4.2, donde el `id` hace referencia al elemento raíz. Si la anotación es la primera que se toma creando la esfera asociada, este `id` es el suyo propio.

```
<content type="texto">
  <property key="root">
    <value>id</value>
  </property>
</content>
```

Código 4.2. Elemento que indica con qué otra anotación está vinculada una anotación

Por su parte, el elemento `virtualInformationLocation` del modelo de datos propuesto siempre adquiere los mismos valores durante el uso de SIRAE. Esto se debe a que, en este sistema, la información virtual de las anotaciones se ubica en el mismo punto espacial que su anclaje. El Código 4.3 muestra cómo es este elemento común de todas las anotaciones. Del mismo modo, dado que la visibilidad de las anotaciones depende de si el usuario decide verlas todas o sólo las no corregidas, el elemento `visibilityType` siempre tomará el valor `onDemand`. Además, el sistema de referencia utilizado en SIRAE es siempre el mundo: `<positionRefSystem>world</positionRefSystem>`.

```
<virtualInformationLocation>
  <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
  <orientationRefSystem>world</orientationRefSystem>
  <maxDistanceAnchoring>0</maxDistanceAnchoring>
  <minDistanceAnchoring>0</minDistanceAnchoring>
</virtualInformationLocation>
```

Código 4.3. Localización de la información virtual de todas las anotaciones de SIRAE

Para la implementación de las anotaciones de Realidad Aumentada y su uso por parte de la aplicación instalada en la tableta de los inspectores, se desarrolla un servicio web REST mediante Node.js, que incluye una base de datos MongoDB y

utiliza la librería mongoose (*Mongoose ODM*, s. f.). Las funciones de este servicio REST permiten hacer las llamadas pertinentes a la base de datos principal de SIRAE (desarrollada en MySQL) para obtener información referente a los usuarios.

La decisión de los responsables del proyecto de utilizar MongoDB obliga a transformar el documento de esquema XML diseñado en el capítulo anterior a formato BSON (*Binary JSON, JavaScript Object Notation*). El Código 4.4 muestra un ejemplo de anotación tomada con SIRAE en formato BSON mientras que el Código 4.5 muestra su equivalencia en XML. En ambos casos, se sigue el modelo de datos desarrollado en esta tesis doctoral. Como se desprende de este caso de estudio, el modelo de datos propuesto es altamente flexible, pues permite no sólo representar cualquier tipo de anotación, sino también hacerlo mediante diferentes implementaciones de una forma rápida y sencilla.

```
{
  "_id": {
    "$oid": "5b291cf9a26f2b0580f71a8b"
  },
  "author": {
    "$oid": "5accce828dc91e1f00ad69e3"
  },
  "creationDate": {
    "$date": "2018-06-19T15:10:49.435Z"
  },
  "visible": true,
  "visibilityType": "onDemand",
  "positionRefSystem": "world",
  "coordinates": [
    3.856931, 0.782652, -0.509673, 0, 60.100616, 0
  ],
  "type": "Foto",
  "urlFoto": "/img_annotaciones/foto_20180619171049.png",
  "idRoot": {
    "$oid": "5b1934b9c1cf150ba0085698"
  },
  "corrected": false
}
```

Código 4.4. BSON de una anotación de SIRAE

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="5b291cf9a26f2b0580f71a8b">
    <author>5accce828dc91e1f00ad69e3</author>
    <creationDate>2018-06-19T15:10:49.435Z</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>onDemand</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <coordinates>3.856931, 0.782652, -0.509673,
        0, 60.100616, 0</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>world</orientationRefSystem>
      <maxDistanceAnchoring>0</maxDistanceAnchoring>
      <minDistanceAnchoring>0</minDistanceAnchoring>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="Foto">
      <property key="url">
        <value>/img_anotaciones/foto_20180619171049.png</value>
      </property>
      <property key="root">
        <value>5b1934b9c1cf150ba0085698</value>
      </property>
      <property key="corrected">
        <value>>false</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>
```

Código 4.5. XML de una anotación de SIRAE

4.8. Pruebas y resultados

Una vez el sistema fue implementado y tras superar con éxito las primeras pruebas en laboratorio, se diseñaron las pruebas de usuario que deberían realizarse en un entorno de obra real. Estas pruebas están orientadas a alcanzar tres objetivos básicos:

- Verificar el correcto funcionamiento del sistema
- Evaluar la utilidad del mismo para los inspectores

- Validar que la aplicación de las aportaciones de esta tesis a la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE permite alcanzar con éxito los dos objetivos anteriores

Para ello, se diseñaron un conjunto de tareas que los inspectores debían completar en el transcurso habitual de su jornada de trabajo. Como medida de validación, se pidió a los participantes que cumplimentaran una prueba de usabilidad y una prueba de satisfacción del usuario. Además, se les instó a hacer algunos comentarios adicionales sobre el sistema utilizado. A continuación, se detallan las características del estudio y se presentan los resultados obtenidos.

4.8.1. Entorno, participantes y protocolo

La validación de SIRAE en un **entorno** de obra real se llevó a cabo en la factoría que DRAGADOS tiene ubicada en Sevilla (España). En concreto, para la verificación del correcto funcionamiento de la aplicación de anotaciones de Realidad Aumentada, se utilizó un módulo CARACOLA ya finalizado y dispuesto en su ubicación final. La Figura 4.14a muestra dicho módulo. Tal y como muestra el plano de la Figura 4.14c, el módulo está compuesto por cinco pequeñas habitaciones y tiene una dimensión de planta de 11,4 × 3,4 metros. La habitación de la derecha no se consideró para las pruebas, por lo que se colocaron cuatro marcadores de Realidad Aumentada en las habitaciones restantes a una altura de 1,6 metros. La Figura 4.14b muestra una inspectora escaneando una de estas marcas.

Dado que uno de los objetivos de estas pruebas es evaluar la utilidad del sistema para los inspectores de edificios prefabricados, todos los **participantes** reclutados fueron trabajadores de DRAGADOS. Se procuró que la muestra tuviera una proporción equilibrada de edad, género y experiencia en el manejo de las tecnologías de la información. Sin embargo, la disponibilidad de los inspectores a la hora de realizar las pruebas era limitada, puesto que el número de ellos en fábrica no es muy numeroso. Se utilizaron dos jornadas para realizar las pruebas y se obtuvo la colaboración de un total de 11 participantes, cinco mujeres y seis hombres, con edades comprendidas entre los 28 y los 56 años. De ellos, 6 informaron tener muy poca o ninguna experiencia en el uso de sistemas de Realidad Aumentada. Todos ellos son inspectores con experiencia previa en el proceso de inspección de edificios prefabricados.

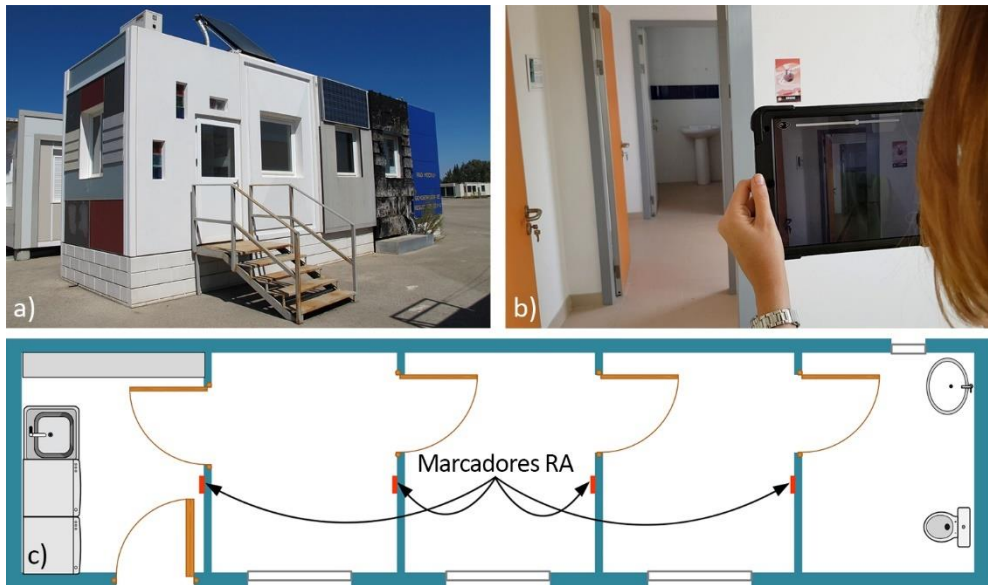


Figura 4.14. Escenario para las pruebas con la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE

Con cada uno de los participantes que realizaron las pruebas, se siguió un **protocolo** con cuatro partes bien diferenciadas: presentación, entrenamiento, realización de tareas y evaluación del sistema. En la presentación, se les hizo una breve introducción al concepto de Realidad Aumentada y cómo ésta se aplica al proceso de documentación de deficiencias durante las inspecciones mediante la utilización de las anotaciones. A continuación, se les describió en qué iban a consistir las pruebas (entrenamiento guiado, realización de tareas y cumplimentación de cuestionarios) y se pasó a la fase de entrenamiento.

Durante el entrenamiento, los inspectores recibieron indicaciones acerca del funcionamiento del sistema: cómo realizar la alineación inicial, cómo crear anotaciones, cómo interactuar con las que ya están creadas y cómo cambiar el nivel de opacidad del modelo virtual del módulo CARACOLA. A continuación, se les dejó que se familiarizar con el manejo de la aplicación y del dispositivo y que realizaran las preguntas que consideraran oportunas. Cuando cada participante estuvo listo para utilizar el sistema, se les pidió que realizaran las siguientes tareas:

- Iniciar la herramienta introduciendo usuario y proyecto
- Acceder a la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada

- Hacer la alineación inicial del mundo físico y virtual mediante la lectura de un marcador
- Cambiar al menos una vez el nivel de transparencia durante la inspección
- Revisar al menos una anotación realizada previamente por otro inspector
- Realizar al menos dos anotaciones de diferente tipo en al menos un lugar
- Volver a visitar al menos una de sus propias anotaciones
- Corregir al menos una anotación

Cuando cada participante terminó la realización de todas las tareas, se les pidió que cumplimentaran un cuestionario. Éste está dividido en tres partes: prueba de usabilidad, prueba de satisfacción y comentarios abiertos sobre aspectos a mejorar del sistema. A continuación, se detalla cada una de estas partes y se muestran los resultados obtenidos.

4.8.2. Prueba de usabilidad

Para evaluar la usabilidad de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada, se realizaron pruebas SUS (*System Usability Scale*) (Brooke, 1996). SUS proporciona una forma rápida y confiable de medir la usabilidad de una herramienta. Consiste en un cuestionario con 10 preguntas a las que hay que responder otorgando una puntuación entre 1 (muy en desacuerdo) y 5 (muy de acuerdo). Creada originalmente por John Brooke en 1986, la SUS permite evaluar una amplia variedad de productos y servicios, incluidos hardware, software, dispositivos móviles, sitios web y aplicaciones. Es por ello que se ha convertido en un estándar de la industria, con referencias en miles de artículos que señalan sus beneficios: es una escala muy fácil de administrar a los participantes, puede usarse en muestras pequeñas con resultados confiables y puede diferenciar eficazmente entre sistemas utilizables e inutilizables.

Años más tarde de la aparición de la SUS, se elaboró un estudio para determinar el significado de las puntuaciones otorgadas por este tipo de test, de tal forma que se añadía una escala de calificación a las puntuaciones (Bangor et al., 2009). La Figura 4.15 muestra esta escala, en cuya parte inferior están las puntuaciones SUS e, inmediatamente sobre estas, los adjetivos de calificación. Por ejemplo, un software que obtuviera una puntuación SUS de 75 sería considerado como “bueno” mientras que otro de 90 sería “excelente”.

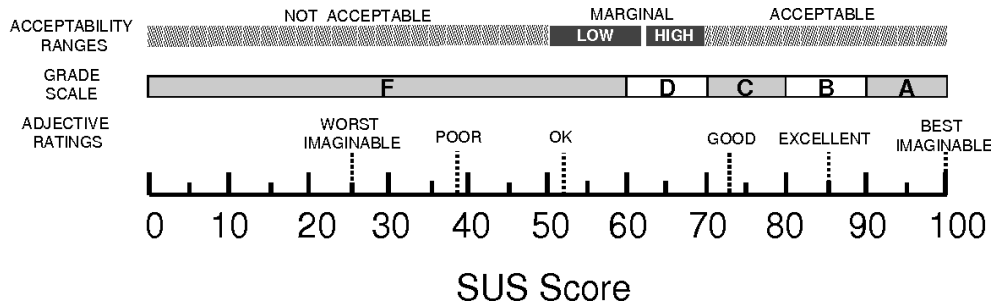


Figura 4.15. Escala de calificación a las puntuaciones SUS (fuente: (Bangor et al., 2009))

Las preguntas de este test se muestran en la Tabla 4.1. Como puede verse, las preguntas impares se formulan de manera positiva, por lo que la mejor puntuación posible es de 5 puntos, mientras que las pares se formulan de manera negativa, por lo que la mejor puntuación es 1 punto.

Preguntas test de usabilidad (SUS)	
SUS1	Creo que me gustaría usar este sistema con frecuencia
SUS2	Encontré el sistema innecesariamente complejo
SUS3	Creo que el sistema es fácil de usar
SUS4	Creo que necesitaría el apoyo de una persona técnica para poder usar este sistema
SUS5	Creo que las diversas funciones de este sistema están bien integradas
SUS6	Creo que hay demasiadas inconsistencias en este sistema
SUS7	Creo que la mayoría de inspectores aprendería a usar este sistema muy rápidamente
SUS8	Encontré el sistema muy engorroso de usar
SUS9	Me sentí muy seguro usando el sistema
SUS10	Necesité aprender muchas cosas antes de empezar a usar este sistema

Tabla 4.1. Preguntas realizadas en el test de usabilidad de SIRAE

Los once inspectores que realizaron las pruebas de usuario de SIRAE rellenaron una encuesta SUS para la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada. Una vez obtenidas las puntuaciones individuales de cada usuario a cada pregunta, hay que calcular la puntuación SUS final de cada usuario. La puntuación final para el sistema será la media de todas estas puntuaciones individuales. Para calcular la puntuación obtenida por cada usuario, hay que sumar la contribución de todas las preguntas y multiplicarla por 2,5. La contribución de las preguntas impares es la posición en la escala otorgada por el usuario menos 1 mientras que la contribución

de las preguntas pares es de 5 menos la posición en la escala. La Tabla 4.2. muestra las puntuaciones individuales otorgadas por los usuarios y la puntuación SUS final de cada uno de ellos. Además, se incluye la media y la desviación estándar de cada pregunta. La puntuación media final obtenida se muestra sombreada en verde.

Pregunta ► Usuario ▼	SUS1	SUS2	SUS3	SUS4	SUS5	SUS6	SUS7	SUS8	SUS9	SUS10	Puntuación SUS
U1	5	1	5	2	4	1	5	1	4	2	90.00
U2	4	1	4	3	4	2	4	1	3	1	77.50
U3	3	2	4	1	3	1	4	2	3	1	75.00
U4	4	2	4	2	5	2	4	2	4	2	77.50
U5	4	1	3	1	5	1	5	2	5	1	90.00
U6	4	2	3	1	2	4	4	2	3	1	65.00
U7	5	1	5	1	4	2	5	1	5	1	95.00
U8	4	1	5	4	5	1	4	1	4	2	82.50
U9	5	3	4	2	4	2	4	2	4	2	75.00
U10	5	2	4	2	4	3	4	1	4	2	77.50
U11	5	1	4	1	4	2	5	1	5	2	90.00
Media	4.36	1.55	4.09	1.82	4.00	1.91	4.36	1.45	4.00	1.55	81.36
S.D.	0.67	0.69	0.70	0.98	0.89	0.94	0.50	0.52	0.77	0.52	8.97

Tabla 4.2. Resultados del test de usabilidad para la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE

La herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada obtuvo una puntuación SUS media de 81,36 puntos. Según la escala de calificación de la Figura 4.15, esta puntuación se corresponde con un valor entre “bueno” y “excelente”. La mínima puntuación obtenida fue 65 (“aprobado”) mientras que la más alta fue 95 (“excelente”). Por tanto, todos los usuarios dieron por bueno el sistema y, en general, su valoración fue bastante positiva.

Si se evalúan ahora las preguntas de forma individual, puede observarse que las preguntas con mejor puntuación fueron la 8, (“Encontré el sistema muy engorroso de usar”), la 2 (“Encontré el sistema innecesariamente complejo) y la 10 (“Necesité aprender muchas cosas antes de empezar a usar este sistema”). Hay que recordar que, para las preguntas impares, la mejor puntuación es 5 (muy de acuerdo), mientras que, para las preguntas pares, la mejor puntuación es 1 (muy en desacuerdo). Por tanto, la valoración muy positiva de estas tres preguntas, conduce a afirmar que los inspectores consideran que se trata de un sistema fácil de

aprender a manejar y sencillo de usar. Con esto se cumple, de forma positiva, con el segundo de los objetivos marcados al inicio de esta sección: evaluar la utilidad del sistema para los inspectores.

Aunque todas las preguntas han obtenido una puntuación muy positiva, las dos con peor puntuación han sido la 5 (“Creo que las diversas funciones de este sistema están bien integradas”) y la 9 (“Me sentí muy seguro usando el sistema”). De este hecho, se podría derivar la necesidad de realizar algunas mejoras en el sistema para poder dar como cumplido el primer objetivo de estas pruebas: verificar el correcto funcionamiento del sistema. Tras analizar el uso hecho del sistema por parte de los inspectores y sus comentarios posteriores, se ha deducido que esta inseguridad puede deberse, principalmente, a la necesidad de alinear los mundos físico y virtual cada cierto tiempo. Este hecho podría solucionarse con la inserción de más marcadores de Realidad Aumentada en los módulos CARACOLA. A pesar de ello, los resultados son satisfactorios, pues no se trata de puntuaciones realmente bajas (4 sobre 5).

Las puntuaciones obtenidas en estas pruebas permiten afirmar que la aplicación de anotaciones de Realidad Aumentada desarrollada en SIRAE utilizando la caracterización y el modelo de datos desarrollados en esta tesis cumple con los requisitos de usabilidad.

4.8.2. Prueba de satisfacción

Para evaluar el grado de satisfacción de los usuarios con la herramienta desarrollada, se realizaron algunas preguntas adicionales a las del test de usabilidad, enfocadas en aspectos más concretos de SIRAE, que se muestran en la Tabla 4.3. Las posibles opciones de respuesta van de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo). En este caso, todas las preguntas se formulan de manera positiva, por lo que la máxima puntuación posible es siempre 5. Además, la interpretación de los resultados difiere de la del SUS, puesto que su escala de rango de 100 puntos no es aplicable a preguntas personalizadas.

Preguntas test de satisfacción	
SATISF-1	Creo que los tiempos de inspección se pueden reducir mediante la utilización de la herramienta SIRAE
SATISF-2	La herramienta SIRAE me ha permitido documentar el proceso de inspección de una forma más cómoda que como se hace de forma habitual
SATISF-3	Creo que la posibilidad de documentar la geometría de los elementos (nubes de puntos 3D) es ciertamente un valor añadido a la inspección
SATISF-4	Pienso que la herramienta SIRAE es adecuada para su utilización en un entorno de obra

Tabla 4.3. Preguntas realizadas en el test de satisfacción de SIRAE

Las preguntas de satisfacción fueron contestadas por los 11 inspectores que participaron en las pruebas de validación de SIRAE. La Figura 4.16 muestra los histogramas con las puntuaciones obtenidas para la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada. Estos histogramas representan, para cada una de las cuatro preguntas realizadas, qué cantidad de usuarios dio cada una de las puntuaciones posibles (de 1 a 5).

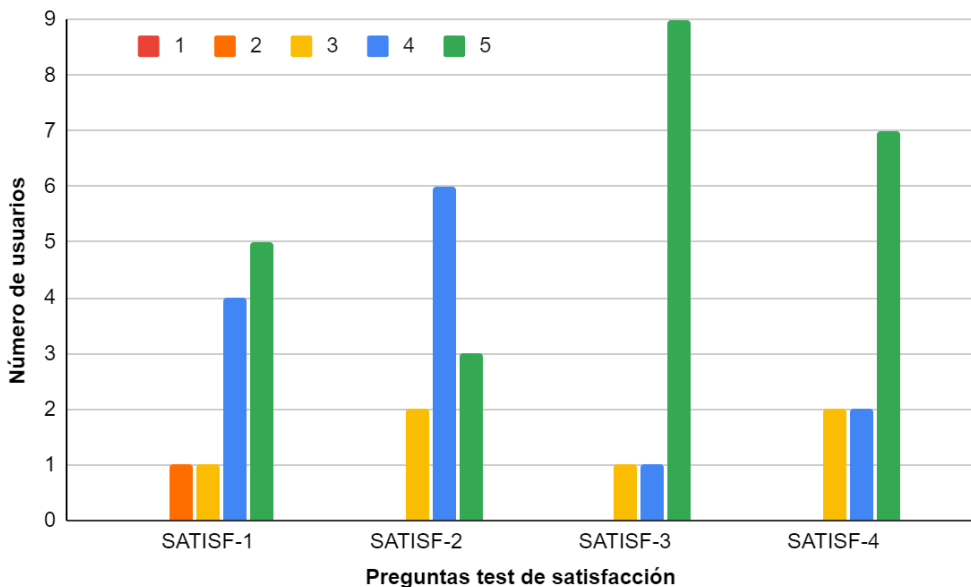


Figura 4.16. Puntuaciones obtenidas para las preguntas del test de satisfacción de la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada

A la vista del histograma obtenido, se puede afirmar que los usuarios están, mayoritariamente (9 o más usuarios), de acuerdo o totalmente de acuerdo con las afirmaciones planteadas (puntuaciones de 4 o de 5). Puesto que todas las preguntas están formuladas en positivo, estos resultados son satisfactorios. En cuanto a puntuación neutra (3 puntos), todas las respuestas reciben uno o dos votos. Únicamente la primera pregunta recibe un voto negativo (2 puntos), aunque no es el peor valor de la escala de valores (1 punto). Esta puntuación negativa a la pregunta 1 (“Creo que los tiempos de inspección se pueden reducir mediante la utilización de la herramienta SIRAE”) puede deberse a la falta de experiencia en el uso de las nuevas tecnologías por parte del inspector que dio dicha puntuación. A pesar de ello, cabe destacar que, en todos los casos, los valores medios de las preguntas se sitúan en 4 puntos o más.

Las puntuaciones obtenidas en estas pruebas permiten afirmar que la aplicación de anotaciones de Realidad Aumentada desarrollada en SIRAE utilizando la caracterización y el modelo de datos desarrollados en esta tesis cumple, también, con los requisitos de satisfacción.

4.8.3. Evaluación cualitativa

Además de las pruebas de usabilidad y satisfacción, se preguntó a los inspectores sobre los aspectos que creían que era necesario mejorar del sistema. El objetivo es obtener una valoración cualitativa que permita corregir posibles problemas de implementación o incorporar nuevas funcionalidades en futuras versiones del software. A continuación, se muestran las impresiones recogidas de todos los encuestados y las medidas adoptadas para subsanar el problema, en caso de que fuera necesario y posible. Las propuestas se han agrupado en función de la medida adoptada ya que, para algunas de ellas, ésta es la misma.

Propuesta 1. “Posibilidad de generación de informes respecto a todos los datos obtenidos”.

Propuesta 2. “Integración en un mismo documento de las evidencias de inspección (fotos, textos, etc.) (formato digital)”.

Medida. Esta opción es perfectamente factible a partir de los datos guardados en la base de datos. Se puede realizar con cualquier gestor de bases de datos.

Propuesta 3. “Durante la prueba parecía que tenía que recalibrar varias veces la imagen. En un espacio pequeño no hay problemas, pero en obras grandes esto puede suponer perder mucho tiempo”.

Propuesta 4. “El modelo virtual se desalineaba con facilidad del real y había que realinear constantemente”.

Mejora. La navegación en entornos interiores es realmente un desafío, como se estudió en el Capítulo 2. Al realizar estas pruebas de usuario, sólo se utilizó un marcador de Realidad Aumentada por habitación, lo que no parecía suficiente para la navegación porque las paredes eran planas y con un color blanco homogéneo. El número de marcadores puede aumentarse para ofrecer mayor estabilidad en la inspección.

Propuesta 5. “Sería interesante añadir una cámara de visión térmica para poder medir los puentes térmicos, en combinación o no de la imagen 3D”.

Mejora. Esta opción supone un gasto adicional considerable a nivel de hardware. Sin embargo, a nivel de desarrollo, se seguiría el mismo procedimiento de toma de imagen y almacenamiento que el ya implementado con la cámara RGB de la tableta y la de infrarrojos del sensor. La implementación de las anotaciones haciendo uso del modelo de datos desarrollado en esta tesis permite incorporar nuevos tipos de anotaciones al sistema sin necesidad de hacer ningún tipo de modificación en la base de datos ni en las peticiones HTTP al servidor implementado. En caso de querer mapear las nubes de puntos 3D con este tipo de datos, se necesitaría un desarrollo adicional para calibrar los sensores y realizar el posterior mapeado.

Propuesta 6. “Definición del procedimiento de inspección”.

Mejora. El procedimiento de inspección con la herramienta de Realidad Aumentada es libre; de necesitarse una secuenciación, puede ser llevada a cabo por los mismos inspectores sin limitaciones de uso de la herramienta.

Propuesta 7. “Mejorar la precisión del trazo”.

Mejora. Se están realizando investigaciones y diferentes ensayos sobre este aspecto puesto que su resolución no es trivial.

Propuesta 8. “Mejorar la selección de anotaciones que están lejos y se ven muy pequeñas”.

Mejora. El tamaño de las esferas ya ha sido corregido para que puedan visualizarse de forma adecuada y sean fácilmente seleccionables por los inspectores.

Propuesta 9. “Tiempo de carga inicial podría ser menor”.

Mejora. El tiempo de carga depende de lo complejos que sean los modelos virtuales. Como la información se almacena en un servidor, también influye la cobertura que haya en el módulo para la conexión con internet. Para evitar este problema inicial, se podría tener descargado en el dispositivo el modelo 3D del módulo. Por otro lado, ya se ha procedido a simplificar los modelos virtuales.

4.9. Conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de este capítulo, se ha presentado la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada desarrollada en SIRAE como caso de estudio para validar la utilidad de la caracterización y el modelo de datos propuestos en el capítulo anterior. SIRAE ha sido concebida como una herramienta que aspira a mejorar el proceso de inspección de edificios prefabricados para mejorar la detección y corrección de deficiencias constructivas y energéticas mediante el uso de tecnologías de Realidad Aumentada. La incorporación de la caracterización y del modelo de datos desarrollados en esta tesis a la herramienta de anotación ha permitido diferenciarla de otras soluciones de inspección mediante Realidad Aumentada ya existentes en el sector de la construcción. La principal novedad del sistema es ofrecer, de forma conjunta, las siguientes funcionalidades:

- Realizar inspecciones **colaborativas** de edificios: diferentes inspectores pueden trabajar de forma asíncrona tanto in situ como en remoto.
- Crear **diferentes tipos** de anotaciones: textos, trazos, imágenes y modelos 3D.
- Disponer de anotaciones **geolocalizadas**: relacionadas con el modelo virtual de los módulos diseñados.
- Llevar a cabo un seguimiento y poder **editar** las anotaciones previamente registradas.
- **Visualizar in situ** tanto el diseño como el estado real del edificio mediante Realidad Aumentada.

En función de los resultados obtenidos en las pruebas de usuario y de la respuesta directa de los inspectores, se ha comprobado que el sistema desarrollado es utilizable y cumple con la mayoría de las expectativas de los inspectores. También se ha podido validar que la aplicación de las contribuciones del Capítulo 3 a la herramienta de anotaciones de Realidad Aumentada de SIRAE ha permitido

alcanzar con éxito los requisitos establecidos. Además, han aportado diversos beneficios durante todo el proceso de desarrollo del sistema, entre los que destacan:

- Durante la fase de diseño: **definición exhaustiva y pormenorizada** de las anotaciones de Realidad Aumentada necesarias para el correcto funcionamiento de la aplicación. Gracias a ello, se han evitado demoras innecesarias en el desarrollo del proyecto y se ha conseguido una solución software robusta y que cumple con los requisitos definidos.
- Durante la fase de implementación: construcción de una **base de datos robusta y escalable**. Esto implica, por un lado, que es capaz de almacenar y recuperar eficientemente toda la información necesaria para la correcta utilización de anotaciones de Realidad Aumentada; por otro lado, que es posible incorporar nuevos tipos de anotaciones o nuevos campos de información sin necesidad de rediseñar la base de datos.
- Para el trabajo futuro: **facilidad de migración** a otras plataformas y dispositivos. La definición de las anotaciones de Realidad Aumentada mediante la caracterización presentada en el capítulo anterior y su implementación haciendo uso del modelo de datos propuesto en esta tesis facilitan la implantación de la herramienta de anotaciones de SIRAE en dispositivos de Realidad Aumentada diferentes a los contemplados en este proyecto.

Así pues, el trabajo futuro más relevante que podría llevarse a cabo sería la generalización de SIRAE para su uso en otros entornos que requieran inspecciones, como los relacionados con los procesos industriales. Como parte de este proceso de generalización, es factible desarrollar una solución multiplataforma en un corto período de tiempo gracias al modelo de datos utilizado y a los continuos avances de las bibliotecas ARKit y ARCore.

Capítulo 5

Estudio experimental: anotación colaborativa asíncrona multidispositivo en entornos desconocidos

En el capítulo anterior, se ha demostrado que la caracterización y el modelo de datos presentados en esta tesis doctoral son útiles para la creación, visualización y edición de diferentes tipos de anotaciones de Realidad Aumentada en entornos colaborativos controlados. Esto supone que ha sido probado en un entorno que requiere una preparación previa: colocación de marcadores de Realidad Aumentada y carga de modelos 3D en el sistema. Además, se trata de un desarrollo pensado únicamente para dispositivos móviles.

En este capítulo, se plantea una problemática mayor y que apenas ha sido estudiada en la literatura científica: la anotación asíncrona en entornos desconocidos con cualquier tipo de dispositivo de Realidad Aumentada. Para abordar este caso, se ha desarrollado un método de calibración que, junto con las aportaciones del Capítulo 3, permite a los usuarios crear anotaciones de Realidad Aumentada en cualquier entorno y visualizar las que otros han realizado previamente independientemente del dispositivo utilizado. Con ello, se pretende validar de forma fehaciente la consecución del objetivo principal de esta tesis: desarrollar herramientas que permitan implementar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada con independencia del dispositivo final que se vaya a utilizar para su visualización. Además, para conseguirlo, se alcanzará uno de los objetivos específicos propuestos: desarrollar un mecanismo que permita utilizar un sistema de anotaciones de Realidad Aumentada en diferentes dispositivos con las mínimas variaciones de implementación posibles.

En esta tesis, se utiliza la expresión “entornos desconocidos” para hacer referencia a entornos que no se pueden preparar previamente de ningún modo. Esto implica que, antes de utilizar un determinado sistema de Realidad Aumentada, no se pueden colocar marcadores en el entorno ni capturar nubes de puntos del mismo. El desarrollador “desconoce” en qué entorno será utilizado el sistema y, por tanto, no puede prepararlo con antelación. En la literatura científica escrita en inglés, es habitual utilizar como sinónimos los términos “*unknown*” (Reardon et al., 2019; Reitmayr et al., 2007; Schall et al., 2008) y “*unprepared*” (Afif & Basori, 2013; R. Azuma et al., 1999; Höllerer et al., 2007) para referirse a este tipo de entornos.

A continuación, se analizan los trabajos científicos que más se acercan a la problemática expuesta arriba, se explican los objetivos e hipótesis a abordar, se describe el sistema desarrollado, se detalla el estudio experimental llevado a cabo con usuarios reales, se discuten los resultados y se presentan las conclusiones de la investigación.

5.1. Estado del arte

En esta sección, se pretende contextualizar el estudio llevado a cabo para poner en relieve su necesidad e importancia. Para ello, se analiza el estado actual de las anotaciones de Realidad Aumentada en torno a los tres pilares que han motivado esta investigación: colaboración asíncrona, entornos desconocidos y asimetría tecnológica. Estos tres factores, unidos, suponen uno de los escenarios más adversos a plantear en el campo de la Realidad Aumentada. Por un lado, en la colaboración asíncrona, productor y consumidor no utilizan el sistema de forma simultánea. Esto implica que es necesario guardar la información de las anotaciones de forma rigurosa para poder mostrársela posteriormente a otros usuarios perfectamente geolocalizada. Por otro lado, usar el sistema en entornos desconocidos conlleva prescindir de marcadores u otras ayudas para la alineación de los mundos virtual y físico, pues no se puede realizar una preparación previa del mismo. Finalmente, la asimetría tecnológica implica abstraerse de las librerías propias de cada dispositivo para así desarrollar sistemas transversales a todos ellos.

La complejidad que supone tratar estas tres problemáticas unidas hace que sea difícil encontrar literatura científica que las aborde simultáneamente. Esto pone de manifiesto la importancia del estudio que se presenta en este capítulo.

5.1.1. Colaboración asíncrona

Como se vio en el Capítulo 2. Estado del arte, la colaboración es un tipo clave de interacción entre usuarios que permite pasar de una perspectiva centrada en un único usuario a sistemas de Realidad Aumentada que pueden ser utilizados por varios individuos que comparten la misma información virtual. Dependiendo de si los colaboradores comparten o no un mismo espacio físico y de si el trabajo es síncrono o asíncrono, se diferencia entre cuatro tipos de interacción: cara a cara, asíncrona, síncrona distribuida y asíncrona distribuida. La mayoría de los trabajos publicados en torno a sistemas AR-CSCW se centran en aplicaciones síncronas, tanto distribuidas como cara a cara, mientras que resulta mucho más complicado encontrar literatura científica en torno a la colaboración asincrónica. Sin embargo, la Realidad Aumentada colaborativa tiene un gran potencial en este último escenario pues permite transmitir información virtual sobre elementos o ubicaciones del entorno físico cuando productor y consumidor no pueden estar presentes en el mismo momento.

Un importante ámbito de aplicación de las anotaciones de Realidad Aumentada en CSCW asíncronos es la industria y la construcción. En (Jalo et al., 2018), se lleva a cabo un estudio cualitativo para explorar cómo la Realidad Aumentada colaborativa puede aportar valor a la gestión de inmuebles y servicios. Los autores señalan que una ventaja fundamental de la Realidad Aumentada colaborativa es permitir la disponibilidad de conocimiento dependiente del contexto para los trabajadores de forma asincrónica. Según su investigación, las soluciones de Realidad Aumentada más completas son potencialmente útiles para acceder al conocimiento basado en la ubicación ya que proporcionan un valor agregado significativo en la colaboración asincrónica y la mejoran en muchos aspectos. Por ejemplo: los empleados pueden ver in situ estructuras ocultas de un edificio o pueden acceder y modificar información geolocalizada para compartir su conocimiento con otros empleados de forma asincrónica en el contexto de uso real. Dos ejemplos concretos, en los que se combina la Realidad Aumentada con el BIM, pueden encontrarse en (Chu et al., 2018; Irizarry et al., 2013).

Otro entorno colaborativo asíncrono que se presta al uso de anotaciones de Realidad Aumentada es el de las aplicaciones, normalmente para dispositivos móviles, que marcan puntos de interés (POI) geolocalizados (navegadores,

buscadores, guías turísticas...). Uno de los primeros buscadores de Realidad Aumentada que superó las limitaciones de precisión de la navegación GPS fue Junaio (*Augmented Reality - junaio... your mobile companion*, 2013). Al igual que otros navegadores de Realidad Aumentada para dispositivos móviles, los usuarios pueden seleccionar un canal de interés y ver anotaciones virtuales superpuestas sobre el mundo real. Además, Junaio admitía la colaboración asíncrona ya que, a diferencia de la mayoría de los demás buscadores de Realidad Aumentada, permitía a los usuarios agregar su propio contenido para que otros lo vieran posteriormente (Billinghurst & Thomas, 2011). Otro ejemplo más reciente es Flaneur (Ioannidi et al., 2017), una aplicación móvil de Realidad Aumentada que sirve como guía del patrimonio arquitectónico. Flaneur permite a los usuarios tanto consumir contenido editado por administradores como compartir su propio conocimiento mediante la creación de anotaciones de Realidad Aumentada textuales y gráficas. Es, por tanto, una herramienta para la creación y el intercambio colaborativo asíncrono de contenido.

Los juegos y el deporte son otro ámbito que potencialmente se presta al desarrollo de sistemas de Realidad Aumentada colaborativos. Aunque la mayoría de ejemplos encontrados son síncronos, se pueden encontrar algunas aplicaciones destinadas a ser utilizadas de forma asíncrona. Es el caso del afamado juego Ingress, de Niantic (*Ingress Prime*, s. f.). El juego depende de Google Maps para identificar las ubicaciones del mundo real que se van a aumentar con contenido virtual. Los jugadores utilizan sus teléfonos móviles para encontrar portales en el mundo real, capturarlos y vincularlos para crear campos virtuales triangulares que representan el sistema de puntuación del juego. Además, pueden crear nuevos portales virtuales que quedan anclados a un punto de referencia del mundo real (Morschheuser et al., 2017). Otro ejemplo puede encontrarse en (Daiber et al., 2013), donde se presenta BouldAR, una aplicación móvil de Realidad Aumentada diseñada para ser utilizada en entrenamientos colaborativos en boulders. El sistema permite crear, compartir y definir objetivos y desafíos entre usuarios, ya sea de forma síncrona o asíncrona. En (Kajastila et al., 2016), van un paso más allá y su sistema combina visión por computadora y gráficos proyectados interactivos para motivar e instruir, mediante juegos, en la escalada de paredes en interiores.

Como puede verse, existe una amplia variedad de campos de aplicación de CSCW-AR asíncronos no distribuidos y, sin embargo, son pocos los trabajos

encontrados que exploran este contexto. Además, la gran mayoría de ellos presentan sistemas ad-hoc desarrollados para un único tipo de dispositivo y en entornos conocidos. En este contexto, diversos estudios plantean retos a superar en el campo de la colaboración asincrónica mediante Realidad Aumentada. En (Sereno et al., 2020), los autores destacan que la creación in situ de anotaciones ancladas no está bien explorada, ya que la mayoría de los estudios encontrados se centran en visualizar anotaciones ya registradas. Los propios autores afirman que las implicaciones técnicas de interacción de esta tarea siguen sin estar del todo claras. Por su parte, en (Irlitti et al., 2016), los autores señalan que una de las cuestiones a resolver es la retención de anotaciones para su consumo en un momento posterior, es decir: cómo generar anotaciones de Realidad Aumentada con diferentes dispositivos de entrada y cómo visualizar esta información en un momento posterior con dispositivos distintos a los de creación. A continuación, se profundiza en estas problemáticas.

5.1.2. Entornos desconocidos

Las consideraciones de los dos estudios citados en el párrafo anterior implican conseguir un registro estricto de la información virtual en el mundo físico. Según el método utilizado para posicionar la información virtual en el mundo físico, se diferencia entre sistemas basados en marcadores o sistemas sin marcadores, más conocidos como *markerless*. Sin embargo, de una u otra forma, ambos necesitan algún tipo de marcador. Los sistemas basados en marcadores utilizan marcadores artificiales (códigos QR, ARTags...) que deben colocarse en el entorno físico para que el sistema los rastree y calcule su posición y orientación. Por su parte, los sistemas *markerless* pueden utilizar casi cualquier parte del entorno real como marcador que se rastrea para posicionar la información virtual. Por lo tanto, aunque no necesitan de marcadores artificiales, sí requieren de la creación de una nube de puntos que describa el entorno, que suele crearse en tiempo real mientras el usuario se mueve. En este caso, para compartir la información virtual, hay que compartir también la nube de puntos que la relaciona con el mundo real.

Otra forma indirecta de utilizar marcadores es aprovechar elementos conocidos del entorno en el que se utilizará el sistema. En (Martín-Gutiérrez et al., 2015), por ejemplo, se utilizan los símbolos normalizados de los circuitos eléctricos para conseguir un correcto posicionamiento de la información virtual sobre planos

eléctricos reales. De forma similar, en (Huang et al., 2011), utilizan los parámetros geométricos del teclado del piano para alinear las anotaciones de Realidad Aumentada que ayudarán a los usuarios a aprender a tocar este instrumento.

Existen otros trabajos que, aunque presentan sistemas que pueden ser utilizados en cualquier entorno, realmente necesitan alguna condición para funcionar correctamente. En (Ahuja et al., 2019), por ejemplo, se aprovechan las luces presentes en el entorno, como ledes o bombillas, para el anclaje de las anotaciones de Realidad Aumentada, como muestra la Figura 5.1 (izquierda). En (T. Lee & Hollerer, 2008), se utiliza como entorno una mesa. A pesar de ello, el sistema de coordenadas 3D se establece en la superficie de la mesa utilizando la mano extendida del usuario como patrón de inicialización temporal, por lo que podría extrapolarse a cualquier entorno. En (Tregel et al., 2020), los autores proponen un juego para teléfonos móviles que utiliza los carteles con nombres de calles para desplegar la Realidad Aumentada, como muestra la Figura 5.1 (derecha). Para ello, utilizan principalmente técnicas basadas en visión y en características de la imagen, la binarización de la imagen, la extracción de texto mediante el algoritmo TranslatAR (Fragoso et al., 2011) y el reconocimiento óptico de caracteres (OCR).



Figura 5.1. Ejemplos de sistemas de Realidad Aumentada *markerless*. Fuentes: (Ahuja et al., 2019) (izquierda) y (Tregel et al., 2020) (derecha)

Quando se quiere usar un sistema de Realidad Aumentada en entornos desconocidos y, por tanto, sin preparación previa, ninguna de estas técnicas puede ser utilizada y hay que encontrar alternativas. Este es, en base a la bibliografía estudiada, un campo poco explotado a día de hoy. En (Langlotz et al., 2012), puede encontrarse un ejemplo, donde el usuario que realiza las anotaciones de Realidad Aumentada crea un mapa panorámico con su dispositivo móvil del entorno donde desea situar la información virtual. Estos datos se almacenan junto a su posición

GPS. Posteriormente, otro usuario puede visualizar dichas anotaciones aproximándose a la zona mediante los datos GPS y creando un nuevo panorama que permitirá mostrar las anotaciones del entorno.

5.1.3. Sistemas multidispositivo

Además del registro de la anotación, Irlitti et al. apuntan la importancia de considerar la asimetría tecnológica entre usuarios. Los sistemas de Realidad Aumentada disponibles actualmente difieren ampliamente entre sí, desde la arquitectura del sistema y las librerías propias hasta las formas de interacción y las características proporcionadas. Normalmente, las aplicaciones son creadas para ser ejecutadas en un único tipo de dispositivo y la migración a otro suele ser muy costosa. Por ejemplo, las aplicaciones que se basan en el seguimiento de marcadores se desarrollan de manera completamente diferente a las que funcionan con mapeo espacial. Del mismo modo, la interacción proporcionada, por ejemplo, por unas HoloLens no es igual a la que ofrece una tableta. Además de todo esto, a la hora de desarrollar el mundo virtual 3D, existen diferentes sistemas de coordenadas y cada uno de ellos tiene su propia orientación de ejes y su propia equivalencia entre las unidades del espacio virtual y las del espacio físico. Por tanto, algo tan aparentemente simple como comunicar la posición de un objeto entre dispositivos se convierte en todo un desafío (Speicher, Hall, et al., 2018).

Uno de los campos donde más se ha estudiado la asimetría tecnológica es el de la Realidad Mixta, donde se utilizan dispositivos de Realidad Aumentada y de Realidad Virtual en un mismo sistema (Casas et al., 2019; García-Pereira et al., 2018; Hoppe et al., 2018). En el campo de la Realidad Aumentada únicamente, los ejemplos son más escasos. En (Butz et al., 1999; MacWilliams et al., 2003), se presentan sistemas en los que se utilizan diferentes dispositivos pero cada uno de ellos tiene una funcionalidad diferente y han de utilizarse de forma síncrona. También síncrono es el trabajo presentado en (Baillard et al., 2017), donde se aumenta el contenido estándar de una televisión. Este trabajo resulta interesante porque varios usuarios ejecutan simultáneamente la aplicación de Realidad Aumentada con diferentes dispositivos (tableta y HoloLens) y pueden tanto compartir contenido como mantener una vista personalizada y diferente a las del resto (por ejemplo: jugar juntos o poner los subtítulos en diferentes idiomas). La Figura 5.2a y b muestra un anuncio de televisión interactivo visto a través de unas

HoloLens (a) y de una tableta (b). En (Speicher, Hall, et al., 2018), se presenta XD-AR, un marco de desarrollo de aplicaciones de Realidad Aumentada para varios dispositivos, diseñado para unificar la entrada y la salida en sistemas de Realidad Aumentada de mano, de cabeza y proyectivos. De nuevo, el trabajo se centra en dos escenarios síncronos: *AR Furniture Placement* (Figura 5.2c) y *AR Shooter* (Figura 5.2d). Uno de los desafíos que plantea es el de conectar los sistemas de coordenadas y anclajes de los diferentes dispositivos. Para superar este requisito, es necesario un proceso manual de calibración inicial en el que los usuarios han de posicionarse en una misma ubicación física y alinear los ejes de coordenadas de sus diferentes dispositivos.

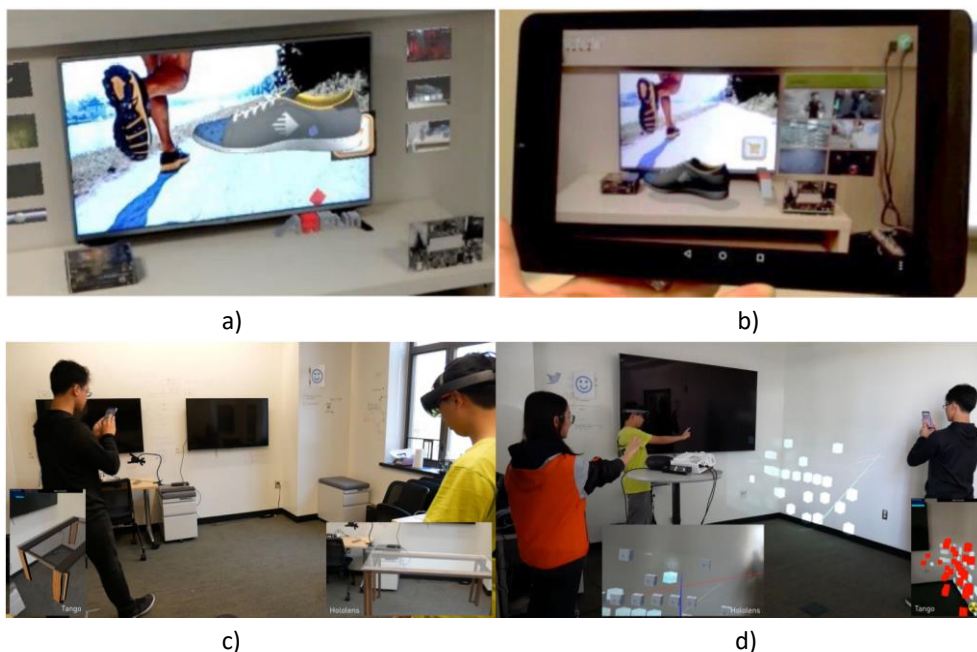


Figura 5.2. Ejemplos de Realidad Aumentada multidispositivo. Fuentes: (Baillard et al., 2017) (a y b) y (Speicher, Hall, et al., 2018) (c y d)

En este punto, resulta interesante mencionar el servicio multiplataforma Azure Spatial Anchors de Microsoft, que permite almacenar y compartir diferentes tipos de contenido virtual, como anotaciones de Realidad Aumentada, utilizando los servicios de Azure Cloud (*Azure Spatial Anchors | Microsoft Azure, s. f.*). En este caso, todos los dispositivos deben utilizar este SDK, no sólo para compartir información, sino también para realizar un proceso de seguimiento paralelo. Esto

significa que todos los dispositivos utilizan el mismo seguimiento para calcular la ubicación de las anotaciones por lo que no existe una asimetría tecnológica real.

Ninguno de los trabajos citados tiene en cuenta la colaboración asíncrona no distribuida entre diferentes dispositivos de Realidad Aumentada en entornos desconocidos. El más cercano al trabajo que se presenta en este capítulo es el mencionado XD-AR, pero éste no contempla la opción de usar los dispositivos de forma asíncrona y, por tanto, la alineación inicial se hace sobre coordenadas conocidas.

5.2. Objetivos e hipótesis

Como puede verse, resulta difícil encontrar sistemas de Realidad Aumentada colaborativos asíncronos que puedan ser utilizados en entornos desconocidos, tanto interiores como exteriores, y con diferentes dispositivos. Aquí es donde se sitúa la investigación de este capítulo, con la que se pretende validar la consecución de los objetivos de esta tesis a la vez que se da solución a una problemática poco abordada en la literatura científica debido a su complejidad tecnológica.

En este capítulo, se presenta una herramienta colaborativa para la toma y lectura de anotaciones de Realidad Aumentada que ha sido desarrollada con el afán de ser lo más universal posible, pudiéndose utilizar en cualquier lugar y con cualquier dispositivo. Esto tiene dos implicaciones fundamentales: no depender de una preparación previa del entorno, por lo que no se pueden utilizar marcadores de ningún tipo, y no depender de la implementación de una librería que limite el tipo de dispositivo que puede ser utilizado. Para superar estas dos restricciones, será clave la utilización del modelo de datos desarrollado en esta tesis. Además, será necesaria la colaboración del usuario quien, mediante un paso previo asistido, introducirá los puntos de anclaje necesarios para la correcta alineación de la información virtual en el entorno físico.

Para la realización del estudio presentado en este capítulo, se han planteado dos hipótesis concretas. La hipótesis principal es que somos capaces de visualizar anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos con independencia del dispositivo utilizado. La hipótesis secundaria es que la usabilidad general del sistema es satisfactoria. Para verificar estas hipótesis, se ha llevado a cabo un

estudio experimental en el que han participado 40 usuarios. Todos ellos han utilizado la herramienta desarrollada para encontrar objetos anotados en una habitación mediante Realidad Aumentada. El experimento se ha realizado con dos dispositivos diferentes: un teléfono móvil de altas prestaciones y otro de bajas prestaciones. Además, se han tomado datos objetivos durante su realización y los usuarios han cumplimentado una encuesta subjetiva al finalizar. Los resultados obtenidos demuestran que las dos hipótesis formuladas son correctas.

La técnica de anotación mediante Realidad Aumentada que se presenta en este capítulo permite crear y visualizar anotaciones con diferentes dispositivos de forma asíncrona en espacios desconocidos. El sistema desarrollado utiliza un método de calibración asistido por el usuario que ha demostrado ser rápido, eficiente, fácil de aprender y sencillo de utilizar. Todos los datos relacionados con las anotaciones de Realidad Aumentada (información virtual y anclajes) se almacenan utilizando el modelo de datos expuesto en el Capítulo 3, que es independiente de los dispositivos utilizados para crearlas y para visualizarlas. Tanto los usuarios con dispositivos de altas prestaciones como los usuarios con dispositivos de bajas prestaciones han sido capaces de visualizar las anotaciones presentes en el entorno sin ningún tipo de marcador, sin cargar previamente nubes de puntos en el sistema y sin necesidad de utilizar el reconocimiento de imágenes.

Según los datos recabados en esta investigación, este es el primer trabajo que realiza un estudio experimental de un AR-CSCW asíncrono y multidispositivo en entornos desconocidos. Este análisis puede ayudar a los investigadores a desarrollar sistemas de Realidad Aumentada universales que puedan ser utilizados para la colaboración entre usuarios en cualquier entorno e independientemente del dispositivo del que dispongan. Esto puede facilitar el desarrollo de aplicaciones novedosas de Realidad Aumentada multidispositivo en una amplia variedad de campos de aplicación.

5.3. Especificación

A continuación, se detallan los requisitos de usuario (tanto funcionales como no funcionales) que definen las funcionalidades que ha de ofrecer el sistema y las restricciones asociadas a su funcionamiento. Este conjunto de requisitos formará la base para desarrollar la especificación del sistema.

5.3.1. Requisitos de usuario

Requisitos funcionales

- RF1. El sistema debe permitir crear anotaciones de Realidad Aumentada. Para hacerlo por primera vez en un entorno, el usuario ha de definir previamente tres puntos de anclaje. Una vez definidos los puntos, podrá crear varias anotaciones en dicho espacio sin necesidad de crear nuevos puntos de anclaje.
- RF2. Para definir los puntos de anclaje, aparecerá en la pantalla del dispositivo una mira virtual que ayude al usuario a determinar dónde desea situar cada punto de anclaje. Una vez colocados, éstos serán representados mediante un modelo virtual de los ejes de coordenadas XYZ.
- RF3. El sistema guardará las coordenadas de cada punto y una fotografía que muestre su ubicación en el entorno físico.
- RF4. El sistema almacenará las coordenadas GPS del dispositivo en el momento de definir los puntos de anclaje.
- RF5. Una vez definidos los tres puntos de anclaje, el usuario podrá crear anotaciones de Realidad Aumentada sobre diferentes puntos del entorno físico. La información virtual de dichas anotaciones consistirá en esferas semitransparentes cuyo tamaño será definido por el usuario.
- RF6. El sistema almacenará la ubicación de cada anotación en relación con los puntos de anclaje definidos previamente.
- RF7. Cuando un usuario se sitúe en un entorno en el que previamente se hayan creado anotaciones de Realidad Aumentada, el sistema le mostrará tres imágenes con la ubicación de los tres puntos de anclaje utilizados para tomar dichas anotaciones. Ayudado por una mira virtual, el usuario deberá situar tres puntos de calibración en el mismo emplazamiento que los puntos de anclaje.
- RF8. Las imágenes con los puntos de anclaje se podrán ampliar (para visualizar bien la ubicación de cada punto) y reducir (para tener suficiente campo de visión del entorno físico).

- RF9. Con la información de los puntos de anclaje y los puntos de calibración, el sistema realizará los cálculos necesarios para posicionar correctamente las anotaciones de Realidad Aumentada en el entorno físico.
- RF10. Una vez calibrado el sistema, el usuario podrá mover su dispositivo de Realidad Aumentada para visualizar las anotaciones presentes en el entorno.
- RF11. Cuando un usuario vea una anotación, podrá pulsar sobre la esfera que la representa y el sistema guardará una imagen de su posición en el entorno físico.
- RF12. El sistema guardará información relativa a los tiempos de calibración y de búsqueda de anotaciones.

Requisitos no funcionales

- RNF1. La aplicación será sencilla de usar, no requiriendo un aprendizaje de más de 5 minutos. Las funcionalidades se llevarán a cabo en la menor cantidad de pasos posibles.
- RNF2. El tiempo de calibración del dispositivo no debe superar los 2 minutos.
- RNF3. El usuario debe saber en todo momento en qué momento del proceso de calibración se encuentra por lo que se le indicará siempre el número de puntos de anclaje y de calibración que ya ha colocado y los que le quedan por colocar.
- RNF4. La aplicación se ofrecerá tanto en español como en inglés.

5.3.2. Especificación del sistema

El sistema a desarrollar se concreta en una aplicación que puede ser desplegada en todo tipo de dispositivos de Realidad Aumentada realizando unas variaciones mínimas. La aplicación pretende ser un prototipo que sirva de base para desarrollar sistemas específicos en diferentes campos (industria, entretenimiento, educación, etc.) por lo que su público potencial es cualquier persona interesada en consumir contenido en Realidad Aumentada. Gracias a este desarrollo, los usuarios podrán crear y visualizar anotaciones de Realidad Aumentada en cualquier entorno de forma rápida y sencilla.

De entre los diferentes dispositivos que permiten visualizar anotaciones de Realidad Aumentada (HMD, MARS, proyectores, de pantalla o escritorio...), para el presente estudio se han seleccionado los dos siguientes: dispositivo móvil de altas prestaciones y dispositivo móvil de bajas prestaciones. Con ello, se pretende ser consecuente con el objetivo de conseguir un sistema lo más universal posible ya que, actualmente, los MARS son los sistemas de Realidad Aumentada más extendidos en el mercado. Esto se debe, principalmente, a su bajo coste, su facilidad de manejo y por ser mucho menos aparatosos que los HMD o los proyectores. Precisamente por este motivo, el estudio experimental realizado con estos dos dispositivos es menos propenso a los sesgos causados por el desconocimiento de los usuarios en el uso de la tecnología (como podría ocurrir con unas HoloLens de Microsoft, por ejemplo). Además, para evitar sesgos relacionados con el tamaño de la pantalla del dispositivo o su capacidad de procesamiento, se ha decidido utilizar el mismo hardware para simular ambos dispositivos: un Xiaomi Mi MIX 2S octa-core con 6GB de RAM y una pantalla de 5,99 pulgadas. A continuación, se describen ambas configuraciones del dispositivo:

- **Altas prestaciones.** En esta configuración, el dispositivo hará uso de la plataforma ARCore de Google para rastrear su posición y su entorno. El desarrollo de la aplicación se hará utilizando el motor Unity3D, que proporciona una capa de abstracción para Realidad Aumentada llamada ARFoundation. Con este marco de trabajo se puede acceder a las funcionalidades tanto de ARCore en Android como de ARKit en dispositivos iOS.
- **Bajas prestaciones.** Para simular este dispositivo, se desactivarán todas las funcionalidades de ARCore por lo que el seguimiento se basará únicamente en el sensor de giroscopio presente en el dispositivo. Este tipo de seguimiento sólo puede estimar la rotación del dispositivo sin información de la posición 3D por lo que limita el movimiento de los usuarios. Éstos podrán hacer girar el dispositivo sobre sí mismos para encontrar anotaciones, pero no podrán desplazarse por el entorno. La precisión de este sistema de seguimiento puede depender en gran medida de la estabilidad de los usuarios al manejar el dispositivo.

Dado que el objetivo es desarrollar un sistema que pueda ser utilizado en entornos desconocidos, no es posible utilizar ningún tipo de marcador ni preparar

el espacio de ningún modo. Por ello, en el momento de crear las anotaciones, es necesario guardar tres puntos en el espacio. Posteriormente, estos puntos se utilizarán para calibrar el dispositivo como paso previo a la visualización de anotaciones ya creadas. Existen, por tanto, dos procesos diferenciados: el de creación de anotaciones y el de visualización de dichas anotaciones, que se detallan a continuación:

- **Creación.** Antes de crear cualquier anotación de Realidad Aumentada, el usuario debe realizar un paso inicial que consiste en geolocalizar tres puntos de anclaje en su entorno. Estos anclajes serán utilizados como sistema de referencia para alinear la información virtual de las anotaciones con el mundo físico. De cada punto de anclaje, se almacenan sus coordenadas y una instantánea que muestra su posición. Esta imagen guiará a otros usuarios en el proceso de calibración. También se almacenan las coordenadas GPS del dispositivo en ese momento. En este trabajo, este paso se realizará con un teléfono inteligente de altas prestaciones con ARCore. Este dispositivo es capaz de rastrear superficies planas y puntos característicos para adquirir información en 3D de su propia posición y de su entorno. Una vez finalizado este proceso, el dispositivo está preparado para crear anotaciones de Realidad Aumentada, es decir: colocar información virtual sobre elementos físicos del entorno. Con este procedimiento, se da solución a los requisitos RF1-RF6.
- **Visualización.** Cuando un usuario se posiciona en un determinado espacio, las coordenadas GPS de su dispositivo ayudan al sistema a informarle de si hay anotaciones de Realidad Aumentada cerca. Para poder mostrarlas correctamente, es necesario realizar una calibración inicial asistida por el usuario. En primer lugar, el usuario debe situar en el entorno tres puntos de anclaje (que llamaremos "puntos de calibración" para diferenciarlos de los almacenados durante el proceso de creación). Para hacerlo en la posición adecuada, se ayuda de las imágenes almacenadas durante la creación de anotaciones. Con ello, el sistema es capaz de calcular las transformaciones de traslación y rotación que alinean el sistema de referencia del dispositivo del usuario con el sistema de referencia de las anotaciones de Realidad Aumentada presentes en el entorno. Una vez finalizado este proceso, el dispositivo está preparado para mostrar las

anotaciones de Realidad Aumentada sobre los correspondientes elementos físicos del entorno. Con este procedimiento, se da solución a los requisitos RF7-RF10.

De cara al análisis de los resultados del estudio experimental que se desea llevar a cabo, el sistema debe guardar información relativa a los tiempos de calibración y de búsqueda de anotaciones. Además, cuando un usuario visualice una anotación, podrá pulsar sobre ésta y el sistema almacenará una instantánea de su posición en el mundo físico en el momento en el que el usuario la encontró. Con esto, se cumple con los requisitos RF11 y RF12.

Todos los procedimientos han de ser claros y sencillos para que el usuario sepa en todo momento en qué estado se encuentra la aplicación y qué pasos ha de seguir. El diseño de la interfaz gráfica se llevará a cabo pensando siempre en hacer el uso del sistema lo más sencillo posible. Además, podrá utilizarse tanto en español como en inglés. Con ello, se pretende dar solución a los requisitos RNF1-RNF4.

5.4. Análisis

Una vez definidos los requisitos y las funcionalidades que ha de cumplir el sistema, en esta fase de análisis se concreta, de una forma más precisa, cómo se van a llevar a la práctica. Para ello, se han definido los diferentes casos de uso que componen la aplicación de anotaciones de Realidad Aumentada (Figura 5.3). A continuación, se detalla, para cada caso de uso, su descripción en formato expandido. Las Tablas 5.1-5.7 muestran los flujos principales y alternativos.

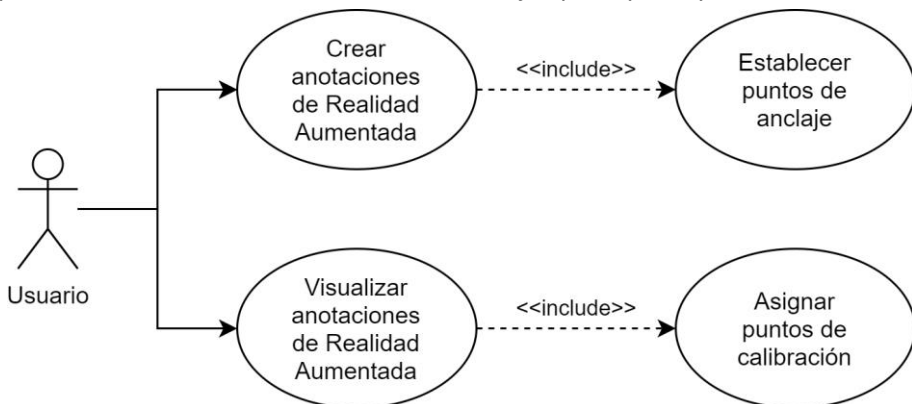


Figura 5.3. Diagrama de casos de uso de la aplicación de anotaciones de Realidad Aumentada

Caso de uso: Establecer puntos de anclaje

Actor: Usuario (principal)

Propósito: Definir el sistema de referencia para las anotaciones que se van a crear.

Resumen: El usuario se sitúa en un espacio con la intención de crear anotaciones de Realidad Aumentada. El usuario crea tres puntos de anclaje geolocalizados en el entorno físico y el sistema los almacena.

Tipo: Primario y esencial

Referencias: RF1, RF2, RF3, RF4.

Pre-condiciones: Se ha accedido a la funcionalidad de “Crear anotaciones”.

Post-condiciones: Se registran tres puntos de anclaje, con sus coordenadas respecto a la posición del sistema, una fotografía de su ubicación en el entorno físico y la posición GPS del sistema. El sistema queda preparado para crear anotaciones de Realidad Aumentada.

Flujo de eventos principal:

Acción de los actores	Respuesta del sistema
1. El caso de uso comienza cuando un usuario accede a la funcionalidad “Crear anotaciones de Realidad Aumentada”.	2. Informa de que se han de introducir tres puntos de anclaje.
3. Confirma que quiere iniciar el proceso.	4. Visualiza la información necesaria para introducir un punto de anclaje.
5. Indica qué punto del entorno físico quiere que sea un punto de anclaje.	6. Almacena las coordenadas del punto de anclaje junto a una fotografía de su ubicación en el entorno físico.
Se repiten los puntos 4, 5 y 6 dos veces más	
	7. Solicita confirmación de los tres puntos de anclaje.
8. Confirma que está de acuerdo con los tres puntos creados.	9. Almacena las coordenadas GPS del sistema y se pasa al caso de uso “Crear anotaciones de Realidad Aumentada”.

Tabla 5.1. Flujo de eventos principal del caso de uso “Establecer puntos de anclaje”

Flujos alternativos:

Acción de los actores	Respuesta del sistema
A1. El usuario quiere repetir la colocación de un punto de anclaje	
La secuencia comienza tras el punto 4 en su segunda o tercera repetición.	
5. Indica que quiere colocar de nuevo un punto de anclaje.	6. Borra la información almacenada de dicho punto (coordenadas y fotografía).
El escenario vuelve al punto 4.	
A2. El usuario quiere repetir todo el proceso de colocación de puntos de anclaje	
La secuencia comienza tras el punto 7.	
8. Indica que quiere colocar de nuevo todos los puntos de anclaje.	9. Borra toda la información almacenada de los tres puntos de anclaje (coordenadas y fotografías).
El escenario vuelve al punto 4.	
A3. El sistema detecta que los tres puntos de anclaje introducidos no proporcionan suficiente información para establecer el sistema de referencia.	
La secuencia comienza tras el punto 8.	
	9. Informa de que los puntos de anclaje introducidos no son válidos y borra toda la información almacenada (coordenadas y fotografías).
El escenario vuelve al punto 4.	

Tabla 5.2. Flujos de eventos alternativos del caso de uso “Establecer puntos de anclaje”

Caso de uso: Crear anotaciones de Realidad Aumentada

Actor: Usuario (principal)

Propósito: Colocar información virtual geolocalizada sobre elementos del entorno físico.

Resumen: El usuario coloca una o más esferas semitransparentes en distintos puntos del entorno que le rodea.

Tipo: Primario y esencial

Referencias: RF5, RF6

Pre-condiciones: Haber definido ya tres puntos de anclaje válidos.

Post-condiciones: El sistema almacena toda la información referente a las anotaciones de Realidad Aumentada creadas por el usuario.

Flujo de eventos principal:

Acción de los actores	Respuesta del sistema
1. El caso de uso comienza cuando se han definido tres puntos de anclaje válidos.	2. Visualiza la información necesaria para crear anotaciones de Realidad Aumentada.
3. Indica sobre qué elemento del entorno quiere posicionar la información virtual.	4. Posiciona una esfera semitransparente sobre dicho elemento.
5. Redimensiona la esfera hasta que consigue el tamaño adecuado y solicita almacenar la información.	6. Almacena la información referente a la anotación y visualiza la información necesaria para crear, editar o eliminar anotaciones de Realidad Aumentada.
7. Pulsa sobre el botón de crear una nueva anotación.	
Se repiten los puntos 3, 4, 5, 6, 7 hasta que ya no se quieran hacer más anotaciones.	
8. Pulsa sobre el botón de finalizar el proceso de creación de anotaciones.	

Tabla 5.3. Flujo de eventos principal del caso de uso "Crear anotaciones de Realidad Aumentada"

Flujos alternativos:

Acción de los actores	Respuesta del sistema
A1. El usuario se equivoca al seleccionar el elemento que quiere anotar.	
La secuencia comienza tras el punto 4.	
5. Indica que quiere colocar de nuevo la anotación.	
El escenario vuelve al punto 3.	
A2. El usuario quiere redimensionar una anotación ya creada.	
La secuencia comienza tras el punto 6.	
7. Pulsa sobre el botón de editar una anotación.	8. El sistema hace seleccionables todas las anotaciones creadas.
9. Selecciona la anotación que quiere editar y la redimensiona.	
El escenario vuelve al punto 6.	

A3. El usuario quiere borrar una anotación ya creada.	
La secuencia comienza tras el punto 6.	
7. Pulsa sobre el botón de eliminar anotaciones.	8. El sistema hace seleccionables todas las anotaciones creadas.
9. Selecciona la anotación que quiere eliminar.	10. Solicita confirmación para borrar la anotación.
11. Confirma que quiere eliminar la anotación.	12. Borra la información almacenada sobre dicha anotación.
El escenario vuelve al punto 6.	

Tabla 5.4. Flujos de eventos alternativos del caso de uso “Crear anotaciones de Realidad Aumentada”

Caso de uso: Asignar puntos de calibración

Actor: Usuario (principal)

Propósito: Calibrar el sistema para poder visualizar las anotaciones presentes en el entorno.

Resumen: El usuario se sitúa en un espacio en el que previamente se han creado anotaciones de Realidad Aumentada. El usuario posiciona tres puntos de calibración en el lugar donde se posicionaron los puntos de anclaje.

Tipo: Primario y esencial

Referencias: RF7, RF8, RF9, RF12, RNF2.

Pre-condiciones: Se ha accedido a la funcionalidad de “Ver anotaciones”. Hay anotaciones de Realidad Aumentada en el entorno donde está el usuario.

Post-condiciones: Se alinea la posición actual del usuario con el sistema de referencia con el que se tomaron las anotaciones. El sistema queda preparado para mostrar las anotaciones de Realidad Aumentada presentes en el entorno.

Flujo de eventos principal:

Acción de los actores	Respuesta del sistema
1. El caso de uso comienza cuando un usuario accede a la funcionalidad “Visualizar anotaciones de Realidad Aumentada”.	2. Informa de que hay que calibrar el sistema, muestra tres fotografías de la ubicación de los puntos de anclaje y solicita al usuario que se ubique en un lugar desde el que vea dichos puntos.
3. Se ubica en la posición adecuada y confirma que está listo para iniciar el proceso de calibración.	4. Muestra la imagen de un punto de anclaje en una esquina de la pantalla y el resto de información necesaria para posicionar un punto de calibración.
5. Selecciona en el entorno el lugar preciso en el que desea colocar el punto de calibración.	6. Almacena las coordenadas del punto de calibración.
Se repiten los puntos 4, 5 y 6 dos veces más	
	7. Muestra en el entorno los tres puntos de calibración colocados por el usuario y las imágenes de los puntos de anclaje para que el usuario verifique que son correctos.
8. Confirma que está de acuerdo con los tres puntos creados.	9. Almacena el tiempo empleado en realizar la calibración y el número de intentos, realiza el proceso de calibración para alinear los sistemas de referencia de los puntos de anclaje y los puntos de calibración y pasa al caso de uso “Visualizar anotaciones de Realidad Aumentada”.

Tabla 5.5. Flujo de eventos principal del caso de uso “Asignar puntos de calibración”

Flujos alternativos:

Acción de los actores	Respuesta del sistema
A1. El usuario no está conforme con la colocación de los puntos de calibración y quiere repetir el proceso.	
La secuencia comienza tras el punto 7.	
8. Indica que quiere colocar de nuevo los puntos de calibración.	9. Borra toda la información almacenada de los tres puntos de calibración.
El escenario vuelve al punto 2.	

Tabla 5.6. Flujo de eventos alternativo del caso de uso “Asignar puntos de calibración”

- Caso de uso:** Visualizar anotaciones de Realidad Aumentada
- Actor:** Usuario (principal)
- Propósito:** Visualizar información virtual geolocalizada sobre elementos del entorno físico que rodea al usuario.
- Resumen:** El usuario contempla a través de su dispositivo de Realidad Aumentada las anotaciones que hay a su alrededor y puede pulsar sobre ellas para indicar que las ha encontrado.
- Tipo:** Primario y esencial
- Referencias:** RF10, RF11, RF12
- Pre-condiciones:** Haber calibrado el dispositivo.
- Post-condiciones:** El sistema almacena información referente a los tiempos de búsqueda y a la ubicación de las anotaciones de Realidad Aumentada encontradas por el usuario.

Flujo de eventos principal:

Acción de los actores	Respuesta del sistema
1. El caso de uso comienza cuando se ha calibrado el dispositivo.	2. Muestra sobre el entorno físico las anotaciones de Realidad Aumentada e informa de cuántas hay.
3. Mueve su dispositivo de Realidad Aumentada para buscar las anotaciones. Cuando encuentra una, puede seleccionarla para indicarle al sistema que la ha encontrado.	4. Guarda una instantánea de la ubicación de la anotación y almacena el tiempo que ha tardado el usuario en encontrarla.
Se repiten los puntos 3 y 4.	
5. Pulsa sobre el botón de finalizar la búsqueda de anotaciones.	

Tabla 5.7. Flujo de eventos principal del caso de uso “Visualizar anotaciones de Realidad Aumentada”

5.5. Diseño

Con el fin de validar la primera hipótesis (somos capaces de visualizar anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos con independencia del dispositivo utilizado), se ha realizado el diseño del sistema de forma que pueda ser desplegado en diferentes tipos de dispositivos efectuando mínimas variaciones.

Este diseño, que incluye un método de calibración asistido por el usuario, el almacenamiento de anotaciones de Realidad Aumentada y su posterior visualización, se ha llevado a cabo teniendo siempre presente la segunda hipótesis: la usabilidad general del sistema es satisfactoria. En este apartado, se define la arquitectura general del sistema a desarrollar, se detalla la estructura de datos que se va a utilizar durante la fase de implementación y se define la interfaz de usuario de la aplicación.

5.5.1. Arquitectura general del sistema

El diseño del sistema se basa en una arquitectura software de tipo modular, en la que los componentes se reparten en tres módulos esenciales:

- **Módulo de sensores:** se encarga de gestionar toda la información referente a los sensores de los dispositivos y su uso a través de las diferentes SDK.
- **Módulo de datos:** gestiona los datos planos (información en XML de las anotaciones y datos estadísticos del uso de la aplicación).
- **Módulo de procesamiento:** gestiona el resto de la lógica de la aplicación y sus funcionalidades principales (calibración, generación de anotaciones, presentación de la información de Realidad Aumentada, etc.).

La Figura 5.4 muestra los componentes de los que dispone cada módulo, repartidos entre las diferentes capas del sistema: la capa de sensores, la capa central o núcleo, la capa de interfaz y la capa de clientes. La capa de sensores incluye los procesos necesarios para el manejo de la información obtenida por los diferentes sensores de los dispositivos de Realidad Aumentada. Estos datos son procesados por la capa central. Dicha capa incorpora los componentes necesarios para la generación del escenario de Realidad Aumentada, el calibrado de los dispositivos, la georreferenciación y el manejo de los datos. Estos procedimientos están conectados a la capa de interfaz, a quien envían la información necesaria para generar las ventanas de visualización que componen la aplicación y que están disponibles a través de los diferentes dispositivos que pertenecen a la capa de clientes.

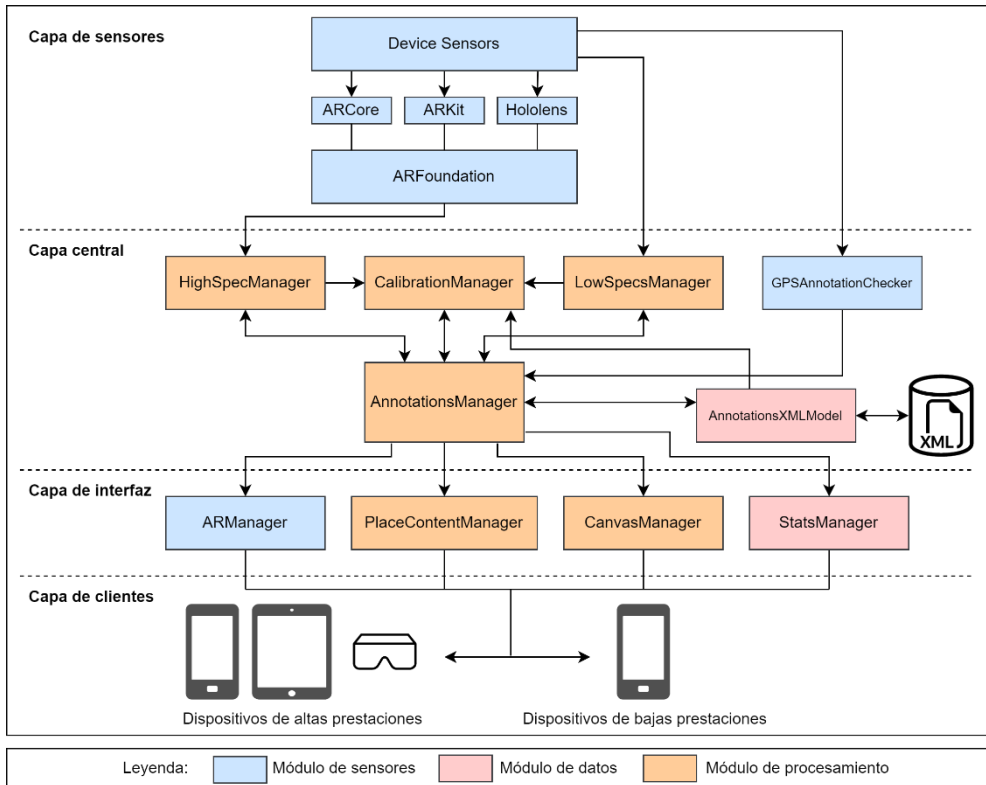


Figura 5.4. Arquitectura general del sistema de anotaciones de Realidad Aumentada

5.5.2. Estructura de datos

En el Capítulo 3, se establecieron las características fundamentales que hay que definir durante el proceso de diseño de una anotación de Realidad Aumentada. Estas características se agrupan en torno a cuatro ejes, que se analizan a continuación para el caso concreto de este estudio experimental:

- **Contenido.** La funcionalidad de las anotaciones que se utilizarán durante este estudio experimental es la de enfatizar o señalar determinados elementos del entorno físico, por lo que serán de complejidad baja. Teniendo esto en cuenta, el tipo de anotación elegido es el de indicador visual, que se concretará mediante una esfera semitransparente situada sobre el objeto que se desea señalar.
- **Ubicación.** En este estudio, la ubicación del anclaje y la ubicación de la información virtual coinciden. Esto se debe a que, cuando se crea una

anotación, se marca el punto en el espacio donde se ubicará de forma definitiva el contenido virtual, quedando anclado al mundo físico en dichas coordenadas. Por tanto, no existe distancia ni libertad de movimiento y el sistema de referencia es siempre el mismo, el mundo. Así pues, la única información requerida por el sistema a la hora de almacenar la ubicación de una anotación de Realidad Aumentada es un punto con seis grados de libertad que se definirá en referencia al punto (0,0,0) del mundo virtual.

- **Temporalidad.** Una vez creada una esfera virtual que marca un determinado elemento del entorno físico, ésta no se modificará y se mostrará siempre sobre dicho elemento. Por tanto, el contenido de las anotaciones que se utilizarán durante este estudio experimental no variará en el tiempo, siempre será visible y tendrá una temporalidad continua.
- **Interacción.** En este sistema, existen dos grados de interacción. Por un lado, el de los usuarios que crean las anotaciones, que lo hacen en línea y eligen su ubicación y las dimensiones del contenido virtual. Y, por otro lado, el de los usuarios que visualizan las anotaciones ya creadas, a quienes se les permite una mínima interacción, pues únicamente pueden seleccionar las anotaciones para indicar que las han visualizado.

En base a estos cuatro aspectos, el diseño de las anotaciones de Realidad Aumentada a utilizar en este estudio experimental queda completamente definido, por lo que, en la fase de implementación, se podrá aplicar de forma directa el documento de esquema XML propuesto en el Capítulo 3 como modelo de datos.

5.5.3. Interfaz de usuario

El diseño de la interfaz gráfica de la aplicación que será utilizada durante el estudio experimental se ha realizado teniendo en cuenta que se desplegará en un teléfono móvil inteligente de 6 pulgadas. Además, la aplicación ha sido diseñada pensando específicamente en el estudio experimental que se va a realizar, donde lo importante es el proceso de calibración del dispositivo y la búsqueda de anotaciones en el entorno, no su creación. A tal efecto, se han considerado los siguientes aspectos:

- El acceso a las tres tareas principales del experimento (entrenamiento, búsqueda de anotaciones con la configuración de altas prestaciones y

búsqueda con la configuración de bajas prestaciones) ha de ser rápido, por lo que se mostrará en la pantalla principal con tres botones bien visibles.

- El acceso al proceso de creación de anotaciones se hará mediante un botón que destaque poco en la pantalla principal.
- En la pantalla principal se podrá seleccionar el idioma: español o inglés.
- La colocación de anotaciones y la redimensión de la esfera virtual que las representa ha de hacerse con los gestos habituales de los dispositivos móviles: un toque en la pantalla para colocarlas y el uso de dos dedos con un gesto de pellizco para redimensionarlas.
- Para la colocación de los puntos de anclaje y de los puntos de calibración habrá un contador de 1 a 3 que indique al usuario en qué momento del proceso se encuentra. Una mira virtual le ayudará a indicar en qué posición quiere colocar cada punto y, cuando esté correctamente posicionada, pulsará un botón (similar al utilizado para realizar fotografías) para marcar dicho punto. Éste quedará georreferenciado en el entorno físico mediante una representación virtual de los ejes de coordenadas.
- La selección de anotaciones encontradas en el entorno se hará pulsando sobre ellas en la pantalla.
- Se mostrarán mensajes concisos que le indiquen al usuario lo que debe hacer en cada momento.
- Los botones de la interfaz gráfica serán autodescriptivos.

La Figura 5.5 muestra el diseño de la pantalla principal que recoge los tres primeros puntos mencionados arriba. Con el botón situado en la parte inferior derecha de la pantalla, se podrá acceder al proceso de creación de anotaciones. En la Sección 5.7. “Estudio experimental”, se verá en detalle el resultado final de la interfaz gráfica implementada.



Figura 5.5. Diseño de la pantalla principal de la aplicación

5.6. Implementación

A continuación, se concretan los detalles de implementación relativos a las dos cuestiones claves del sistema desarrollado: el modelo de datos utilizado para almacenar las anotaciones de Realidad Aumentada y el método de calibración empleado para posicionar de forma correcta la información virtual en el entorno físico.

5.6.1. Modelo de datos

El documento de esquema XML expuesto en el Capítulo 3 ha sido desarrollado con el fin de poder describir cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada y, como se analizó en la fase de diseño, es de aplicación directa en el sistema que aquí se detalla. El Código 5.1 muestra el ejemplo concreto de implementación de una de las anotaciones de Realidad Aumentada creadas con el sistema desarrollado. Se trata de una anotación que siempre es visible y cuyo contenido virtual se sitúa en el mismo lugar que el anclaje (los elementos `maxDistanceAnchoring` y `minDistanceAnchoring` toman valor 0). Esta localización está determinada por unas coordenadas fijas cuyo sistema de referencia es el mundo. Los elementos `property`, compuestos por pares clave-valor, definen fácilmente el contenido virtual de las anotaciones. En este caso, se han utilizado esferas semitransparentes para anotar los objetos del entorno, por lo que tienen propiedades tales como diámetro, color y transparencia del fondo y color y tamaño del borde. Como puede verse, se trata de una estructura sencilla pero potente que permite definir cualquier tipo de anotación, tanto su anclaje al mundo físico como su información virtual. El esquema desarrollado asegura que este XML es válido y, a su vez, permite definiciones de anotaciones más complejas.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<annotations>
  <annotation id="H1">
    <author>user2107201303</author>
    <creationDate>2021-07-20</creationDate>
    <visible>true</visible>
    <visibilityType>fixed</visibilityType>
    <anchoringLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <coordinates>0.4384915,-1.52324259,-2.27827144,
        0.369111031,163.683075,0.260549843</coordinates>
    </anchoringLocation>
    <virtualInformationLocation>
      <positionRefSystem>world</positionRefSystem>
      <orientationRefSystem>world</orientationRefSystem>
      <maxDistanceAnchoring>0</maxDistanceAnchoring>
      <minDistanceAnchoring>0</minDistanceAnchoring>
    </virtualInformationLocation>
    <content type="sphere">
      <property key="diameterSize">
        <value>100</value>
      </property>
      <property key="background color">
        <value>255 255 255</value>
      </property>
      <property key="background alpha">
        <value>25</value>
      </property>
      <property key="border color">
        <value>216 30 91</value>
      </property>
      <property key="border size">
        <value>5</value>
      </property>
    </content>
  </annotation>
</annotations>
```

Código 5.1. Implementación de una anotación creada con el sistema desarrollado

5.6.2. Método de calibración

Como se ha venido explicando a lo largo de este capítulo, cuando el usuario establece los tres puntos de calibración como paso previo a la visualización de las anotaciones de Realidad Aumentada presentes en el entorno, el sistema es capaz de alinear la información virtual de las anotaciones con el sistema de referencia del usuario. Los cálculos internos realizados durante este proceso de calibración son ligeramente diferentes según el tipo de dispositivo utilizado:

- **Calibración en altas prestaciones.** Con este dispositivo, es posible detectar superficies planas, por lo que los puntos de calibración seleccionados por el usuario tienen una correspondencia directa con los puntos de anclaje guardados durante la creación de las anotaciones. Es por ello que sólo es necesario calcular las matrices de traslación y rotación que minimicen la distancia entre el conjunto de los tres puntos de anclaje y sus correspondientes puntos de calibración. Esta matriz se calcula mediante el método “*estimateAffine3D*” incluido en la librería OpenCV.
- **Calibración en bajas prestaciones.** Con este dispositivo, sólo se dispone de la información del giroscopio, por lo que no se puede utilizar el mismo método que en altas prestaciones y se ha optado por implementar un algoritmo basado en la distancia entre líneas rectas. Cuando el usuario establece la ubicación de un punto de calibración, se obtienen tres ángulos del giroscopio (guiñada, cabeceo y alabeo). Estos ángulos definen un vector de dirección que, junto con la posición 3D del punto de anclaje, define una línea (véase Figura 5.6a). Siempre que el usuario haya completado las tres mediciones desde la misma posición con la mínima traslación posible, se puede calcular su posición como el punto de mínima distancia entre las tres rectas (véase Figura 5.6b). En este cálculo, hay que tener en cuenta que las rotaciones obtenidas por el giroscopio del dispositivo pueden estar definidas en ejes cartesianos que no están alineados con los ejes cartesianos de los puntos de anclaje, por lo que, además de la posición, hay que calcular la transformación de rotación entre los dos sistemas de referencia.

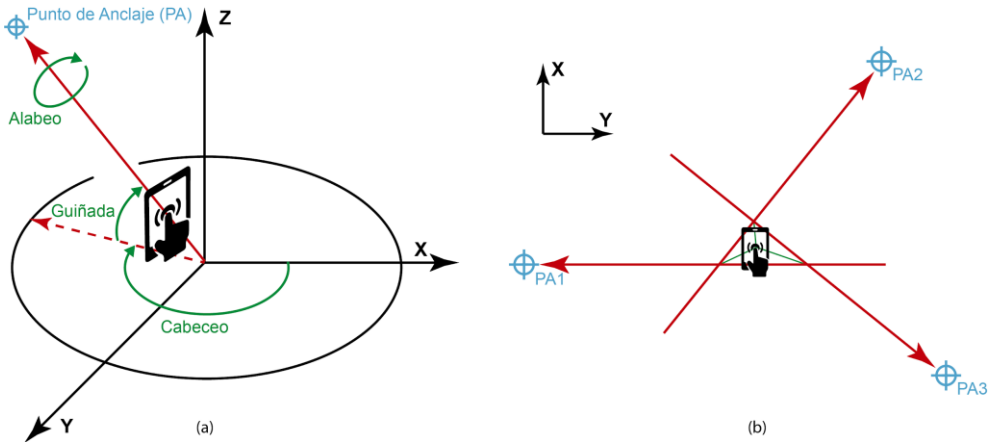


Figura 5.6. Proyección isométrica (a) y planta (b) del método de calibración para un dispositivo de bajas prestaciones

Una vez completado el proceso de calibración, los sistemas de referencia se alinean y las anotaciones de Realidad Aumentada se muestran en sus posiciones correctas en el mundo físico. Este proceso de calibración, junto con el modelo de datos descrito en el apartado anterior, convierte al sistema objeto de estudio en una herramienta universal para el proceso de anotación en Realidad Aumentada. Para validar el método de anotación entre dispositivos propuesto, se ha llevado a cabo un estudio experimental en el que cuarenta usuarios reales realizaron diferentes tareas utilizando la aplicación desarrollada.

5.7. Estudio experimental

El objetivo de este estudio experimental es verificar que el sistema desarrollado permite visualizar anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos independientemente del dispositivo utilizado y que la usabilidad de la aplicación desarrollada es alta. Es por ello que se centra únicamente en el proceso de calibración asistido por el usuario y en la visualización de las anotaciones de Realidad Aumentada presentes en el entorno, no en su creación. Para ello, se ha diseñado un conjunto de tareas que los participantes del estudio deben completar con un teléfono móvil en el que se han simulado dos dispositivos diferentes: uno de bajas prestaciones y otro de altas prestaciones, como se ha descrito anteriormente. A continuación, se detallan las características de dicho experimento.

5.7.1. Entorno

El estudio experimental se ha llevado a cabo en un entorno de laboratorio interior, mostrado en la Figura 5.7, donde se prepararon tres sets de anotaciones de Realidad Aumentada. El primero de ellos consta de una única anotación y se utiliza para la fase de entrenamiento. Los otros dos sets son similares: cada uno consta de tres anotaciones y se utilizan para realizar las pruebas con cada una de las configuraciones del dispositivo. Los puntos de calibración de los tres sets son diferentes, pero se han seleccionado para que tengan una dificultad equivalente. Cada participante realizó una primera prueba guiada por un experto en el set de entrenamiento y, a continuación, realizó el experimento dos veces: una en el Set 1 con la configuración de bajas prestaciones y otra en el Set 2 con la configuración de altas prestaciones.



Figura 5.7. Imagen de 360º del entorno en el que se realizó el estudio experimental

En este experimento, la información virtual de cada anotación consiste en una esfera semitransparente que rodea al objeto anotado. Las anotaciones de cada set se han preparado de tal forma que tengan el mismo grado de dificultad en ambos sets, pero anotando objetos diferentes. Con esto se pretende evitar los sesgos que se producirían por el aprendizaje de su ubicación durante la realización del experimento con la primera configuración. Teniendo esto en cuenta, se han preparado los siguientes sets de anotaciones de Realidad Aumentada según la configuración de dispositivo:

- **Set 1** (configuración de bajas prestaciones): L1) un monitor de ordenador colocado junto a otros dos monitores similares; L2) unos archivadores colocados entre otros objetos de características similares; L3) un póster de tamaño A4 en la pared, colocado junto a otros del mismo tamaño.
- **Set 2** (configuración altas prestaciones): H1) un póster de tamaño A4 en la pared, colocado junto a otros del mismo tamaño (diferente de L3); H2) un proyector colocado entre otros objetos de características similares; H3) un

monitor de ordenador colocado junto a otros dos monitores similares (diferente de L1).

Al preparar estos sets, se han introducido tres grados de dificultad en las anotaciones, en función de su tamaño y de la distancia a objetos cercanos similares. Las anotaciones L1 y H3 corresponden a objetos de tamaño medio-grande (entre 38 y 44 cm) y con una distancia entre ellos mayor a su tamaño (60 cm) (véase Figura 5.8a). Las anotaciones L2 y H2 corresponden a objetos de tamaño medio (unos 30 cm) y con una distancia entre ellos igual a su tamaño (véase Figura 5.8b). Las anotaciones L3 y H1 corresponden a objetos de tamaño medio-pequeño (unos 20 cm) y con una distancia entre ellos igual a su tamaño (véase Figura 5.8c).



Figura 5.8. Anotaciones de Realidad Aumentada que los participantes deben encontrar durante el estudio experimental

5.7.2. Participantes

Dado que uno de los objetivos de esta investigación es conseguir un sistema de anotaciones de Realidad Aumentada lo más universal posible, para el estudio experimental se han reclutado personas con diferentes profesiones, edades y grado de experiencia previa en el uso de tecnologías de Realidad Aumentada. Con las personas voluntarias, se ha realizado un muestreo probabilístico para elegir aleatoriamente a los participantes. Finalmente, se ha realizado el estudio con 40 usuarios válidos. El tamaño de la muestra se ha determinado teniendo en cuenta factores tales como la calidad de los datos, el alcance del estudio, la cantidad de información útil obtenida de cada participante o el número de entrevistas por participante. Como se detalla más adelante en el subapartado “Evaluación”, los participantes han de responder a un cuestionario mediante puntuaciones numéricas y sólo disponen de dos preguntas abiertas en las que exponer sus impresiones sobre el sistema utilizado. Por tanto, al no entrevistar numerosas veces ni en profundidad a cada participante, es necesaria una amplia muestra (Morse, 2000). Reconocidos estudios recomiendan un mínimo de 30 participantes (Morse,

2000) o de 20 por condición (Barkhuus & Rode, 2007). Como se explica a continuación, los participantes se van a dividir en dos grupos, por lo que se ha optado por seleccionar un total de 40 usuarios, 20 para cada grupo.

Para la selección de la muestra, se han tenido en cuenta factores considerados clave, como son: la experiencia en el dominio y en las tecnologías de la información, las características personales (como edad y género) y las habilidades, actitudes y motivación (Hornbæk, 2013). De los 40 usuarios que han realizado el experimento, 17 son mujeres y 23 hombres. Sus edades oscilan entre los 19 y los 60 años, distribuidos de la siguiente manera: 11 participantes menores de 30 años, 9 entre 30 y 39, 10 entre 40 y 49 y 10 mayores de 50 años. La media de conocimientos en tecnologías de Realidad Aumentada y la desviación estándar es de $2,325 \pm 2,403$ (en una puntuación de 0 a 6). En el experimento ha participado personal administrativo, de limpieza y seguridad, ingenieros, investigadores y estudiantes de diferentes áreas, un economista, un periodista, etc.

Se han separado aleatoriamente a los participantes en dos grupos de 20 personas: el Grupo L comenzó con el Set 1 (bajas prestaciones) y el Grupo H, con el Set 2 (altas prestaciones). El grupo L estaba compuesto por 11 hombres y 9 mujeres con una edad media de 40 años y una experiencia previa en Realidad Aumentada de 2,65. El grupo H estaba compuesto por 12 hombres y 8 mujeres con una edad media de 39,2 años y una experiencia previa en Realidad Aumentada de 2. El motivo de esta separación es evitar sesgos relacionados con el aprendizaje de la herramienta y comprobar si el orden en el que se utiliza el dispositivo en cada una de las dos configuraciones tiene un efecto notable en la forma en que los usuarios perciben el sistema.

5.7.3. Protocolo

Con cada uno de los participantes que acudió al laboratorio para realizar el experimento, se ha llevado a cabo un protocolo que consta de cuatro partes bien diferenciadas: presentación, entrenamiento, realización de tareas y evaluación del sistema por parte de los usuarios. A continuación, se describe cada una de ellas.

Presentación

Antes de empezar con el experimento propiamente dicho, se le explicó a cada usuario de manera sucinta el concepto de anotaciones de Realidad Aumentada y sus posibles aplicaciones. A continuación, se les describió en qué consistiría el experimento: un entrenamiento guiado, la realización de una serie de tareas con dos configuraciones diferentes del mismo dispositivo y un cuestionario final.

Entrenamiento

Todos los usuarios recibieron una breve sesión informativa sobre cómo usar la aplicación y se insistió en las diferencias entre usar el dispositivo móvil en su configuración de altas prestaciones (se pueden desplazar por el entorno) o de bajas prestaciones (sólo pueden girar sobre sí mismos, pero sin desplazarse). A continuación, se realizó una práctica guiada sobre cómo colocar los tres puntos de anclaje para calibrar el dispositivo y cómo detectar las anotaciones presentes en el entorno con ambas configuraciones.

Realización de tareas

El experimento consta de dos partes bien diferenciadas. La primera consiste en calibrar el dispositivo para que la información virtual se posicione adecuadamente sobre los objetos físicos que se están anotando. La segunda tiene por objetivo encontrar los objetos que previamente se han anotado en la habitación. Cada usuario realizó este conjunto de tareas dos veces, una con cada configuración del dispositivo.

Para realizar la **calibración** inicial, se le presentan al usuario, en la pantalla del dispositivo, tres fotografías que muestran la ubicación de los tres puntos de anclaje que se utilizaron para tomar las anotaciones de Realidad Aumentada (véase Figura 5.9a). El usuario debe situarse en un punto de la sala desde el que pueda ver lo que muestran dichas fotografías. A continuación, se le van mostrando una por una. Al presionar con el dedo sobre la fotografía, ésta se hace más grande para una correcta visualización (véase Figura 5.9c). El usuario tiene que encontrar, con la cámara del dispositivo y la ayuda de una mira virtual, dónde va cada punto de anclaje (véase Figura 5.9b). Cuando encuentra la ubicación exacta, toca sobre un botón de la interfaz gráfica para registrarla. Terminado el proceso con los tres

puntos de anclaje, se le muestran de nuevo las tres fotografías y, sobre el entorno real, los puntos de calibración que el usuario ha establecido (véase Figura 5.9d). De esta forma, puede verificar que ha realizado la calibración correctamente. Si es así, puede pasar a la siguiente tarea; si no, puede volver a realizar la calibración. Al finalizar la tarea, la aplicación calcula internamente el tiempo que se ha tardado en realizar el proceso de calibración y el número de intentos.

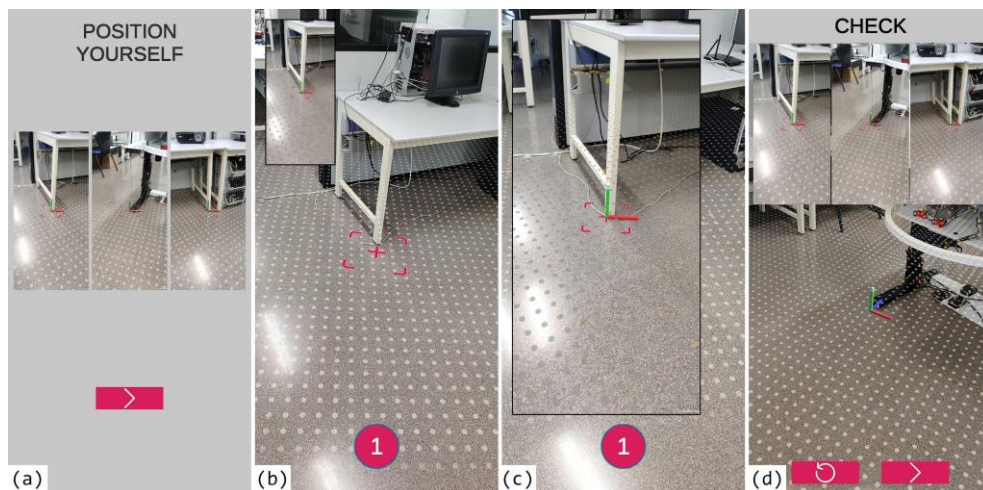


Figura 5.9. Capturas de pantalla de la aplicación durante el proceso de calibración

Para la **búsqueda de anotaciones** de Realidad Aumentada, se ha seguido un proceso secuencial, de forma que al usuario se le presentan las anotaciones una a una. Por tanto, hasta que no encuentra una anotación o informa de que no ha sido capaz de encontrarla, no puede pasar a la siguiente. Así pues, una vez calibrado el sistema, se le pide al usuario que encuentre la primera anotación. El usuario debe mover el dispositivo, que tendrá la cámara activa, para localizar la anotación en la sala. Si está utilizando la configuración de altas prestaciones, puede desplazarse por la habitación; si no, debe permanecer quieto en el lugar desde el que realizó la calibración y sólo girar sobre sí mismo, intentando mover el móvil lo mínimo posible. Una vez encuentra la anotación, pulsa en la pantalla sobre ella e informa al evaluador del objeto físico que cree que es el anotado. La Figura 5.10a muestra a un usuario pulsando sobre una anotación de Realidad Aumentada encontrada; en la Figura 5.10b puede verse el estado de la aplicación en dicho momento. El sistema guarda una captura de pantalla en el instante en que el usuario pulsa sobre la anotación y cronometra el tiempo que ha tardado en encontrarla. El evaluador

anota si se ha encontrado el objeto correcto o no. Si el usuario no encuentra la anotación, puede pasar a la siguiente pulsando el botón situado en la parte inferior derecha de la pantalla (véase Figura 5.10b). Este proceso de búsqueda de anotaciones se repite tres veces con diferentes grados de dificultad en cuanto a los objetos anotados. El sistema guarda también el tiempo total que el usuario ha necesitado para encontrar (o no) las tres anotaciones.

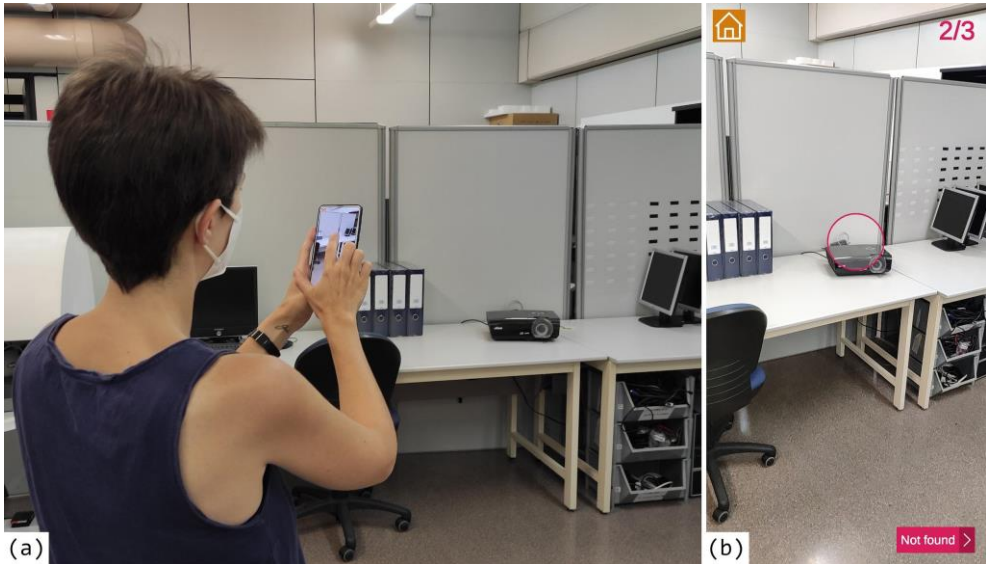


Figura 5.10. Usuario probando la aplicación (a) y captura de pantalla de la aplicación durante la búsqueda de anotaciones de Realidad Aumentada (b)

Evaluación

Una vez que los participantes terminaron de realizar las tareas con ambas configuraciones, se les pidió que completaran un cuestionario. La Tabla 5.8 muestra las preguntas que componen dicho cuestionario. Estas preguntas se han agrupado entorno a los seis factores propuestos en (Witmer & Singer, 1998) para evaluar la sensación de presencia de los usuarios y su relación con el desempeño de las tareas propuestas: factores sensoriales (SF), factores de control (FC), factores de distracción (FD), factores ergonómicos (FE), factores de realismo (RF) y otros factores (OF). Además, se han incorporado cuatro preguntas adicionales sobre pros y mejoras de la aplicación y puntuación de cada una de las configuraciones.

Pregunta	Factor
Ha sido fácil calibrar el dispositivo (marcar los tres puntos iniciales)	RF
Ha sido fácil encontrar anotaciones con la configuración de altas prestaciones	RF
Ha sido fácil encontrar anotaciones con la configuración de bajas prestaciones	RF
Ha sido fácil saber qué objetos eran los anotados con altas prestaciones	RF
Ha sido fácil saber qué objetos eran los anotados con bajas prestaciones	RF
No poder desplazarme con la conf. de bajas prestaciones NO ha supuesto ningún problema	CF
El uso de la aplicación NO requirió un gran esfuerzo mental	SF
La cantidad de información mostrada en la pantalla fue adecuada	SF
La información mostrada en la pantalla fue fácil de leer	SF
La información mostrada en la pantalla fue fácil de entender	SF
El uso de la aplicación NO requirió un gran esfuerzo físico	EF
El uso del teléfono móvil durante el experimento fue cómodo (cuello, hombros, espalda...)	EF
En ningún momento me pareció que se me iba a caer el móvil de las manos	CF
El manejo de la aplicación fue simple y sin complicaciones	CF
El manejo de la aplicación fue natural	CF
La aplicación respondió correctamente a mis acciones	CF
NO noté retrasos entre mis acciones y los resultados esperados	CF
Me acostumbré enseguida a la aplicación	CF
Me he concentrado en los contenidos dentro de la aplicación y no en el dispositivo móvil	DF
Creo que he aprendido conceptos e ideas sobre la anotación mediante Realidad Aumentada	CF
Me gustaría utilizar una aplicación similar para otros fines	OF
Al final de la experiencia me he sentido experto en el manejo de la aplicación	CF
Me he sentido motivad@ durante la experiencia	OF
Me ha gustado la experiencia	OF
¿Qué es lo que más te ha gustado del sistema de anotaciones de Realidad Aumentada?	
¿Qué mejoras o cambios nos sugerirías?	
Pon una nota (entre 1 y 10) al sistema de altas prestaciones	
Pon una nota (entre 1 y 10) al sistema de bajas prestaciones	

Tabla 5.8. Preguntas realizadas a los participantes del estudio experimental

Las preguntas que aparecen en la Tabla 5.8 siguen una escala Likert de 7 niveles, en las que 0 significa muy en desacuerdo, 1 en desacuerdo, 2 algo en desacuerdo, 3 neutro, 4 algo de acuerdo, 5 de acuerdo y 6 muy de acuerdo, excepto las dos preguntas abiertas del final y las dos últimas preguntas en las que los usuarios valoraron el sistema del 1 al 10, siendo 1 la peor puntuación y 10 la mejor.

Además de los datos recogidos a través del cuestionario, durante la realización de las tareas del experimento, se guardó información sobre el tiempo total de cada prueba, el número de intentos de calibración, el tiempo de calibración, el tiempo para encontrar cada anotación, si se encontró o no y si el objeto identificado como anotado fue el correcto u otro. Se almacenaron también fotografías del posicionamiento de cada punto de calibración y de cada anotación encontrada por los usuarios.

Las preguntas que aparecen en la Tabla 5.8 han sido diseñadas para comprobar la hipótesis 2 (la usabilidad general del sistema es satisfactoria), mientras que las medidas obtenidas durante el experimento (especialmente el registro de los objetos anotados encontrados) se han utilizado para verificar la hipótesis 1 (somos capaces de visualizar anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos independientemente del dispositivo utilizado).

5.8. Resultados y discusión

En esta sección se presenta el análisis estadístico de los datos obtenidos durante el estudio experimental. El análisis se ha organizado en torno a tres ejes: objetos anotados encontrados (para validar la hipótesis primaria), satisfacción de los usuarios (para validar la hipótesis secundaria) y tiempos de ejecución (para verificar si los tiempos manejados son aceptables).

5.8.1. Anotaciones encontradas y objetos correctamente identificados

Hay que diferenciar entre encontrar una anotación de Realidad Aumentada e identificar correctamente el objeto anotado. Por ejemplo: un usuario puede calibrar mal el sistema y posteriormente encontrar una anotación, pero ésta no estará ubicada sobre el objeto físico que realmente se está anotando, por lo que su

identificación será errónea. De los 40 participantes en este estudio, sólo uno no encontró dos de las tres anotaciones de Realidad Aumentada presentes en uno de los dos sets. Esto se debió a que, durante la calibración del dispositivo, colocó un punto de calibración en una mesa equivocada. Los demás participantes encontraron todas las anotaciones con ambas configuraciones del dispositivo.

A continuación, se analiza la tasa de aciertos de los objetos anotados. La Figura 5.11 muestra el número de usuarios que acertaron 0, 1, 2 o 3 de los objetos anotados con cada una de las configuraciones del dispositivo. Tanto con el dispositivo de altas prestaciones como con el de bajas prestaciones, el 80% de los usuarios fueron capaces de identificar correctamente 2 o 3 objetos anotados de los 3 presentes en cada set. Por término medio, la mitad de los usuarios encontraron todos los objetos anotados. Sólo 8 participantes encontraron uno o ninguno de los objetos anotados en cada set.

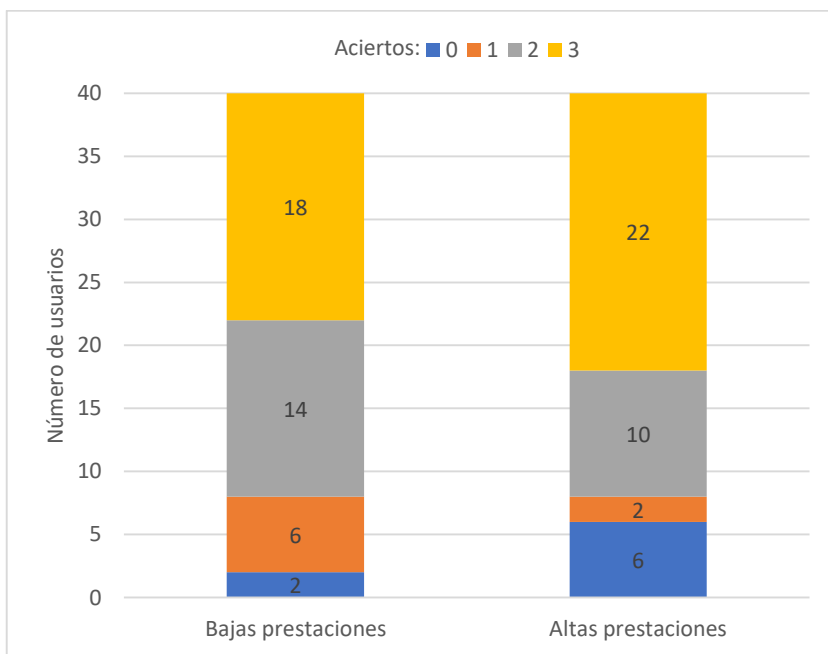


Figura 5.11. Número de objetos anotados mediante Realidad Aumentada identificados con éxito por cada usuario

El número de aciertos difiere según el tamaño de los objetos anotados y su proximidad a objetos similares. La Figura 5.12 muestra cómo el porcentaje de aciertos es mayor para los objetos medianos y grandes que para los pequeños. Aun

así, el porcentaje de aciertos es igual o superior al 60% en todos los casos. Además, los fallos se distribuyen normalmente de forma independiente a la edad y al tiempo de calibración. Los resultados obtenidos no permiten afirmar categóricamente si alguno de los dos dispositivos fue mejor que el otro a la hora de identificar correctamente los objetos anotados.

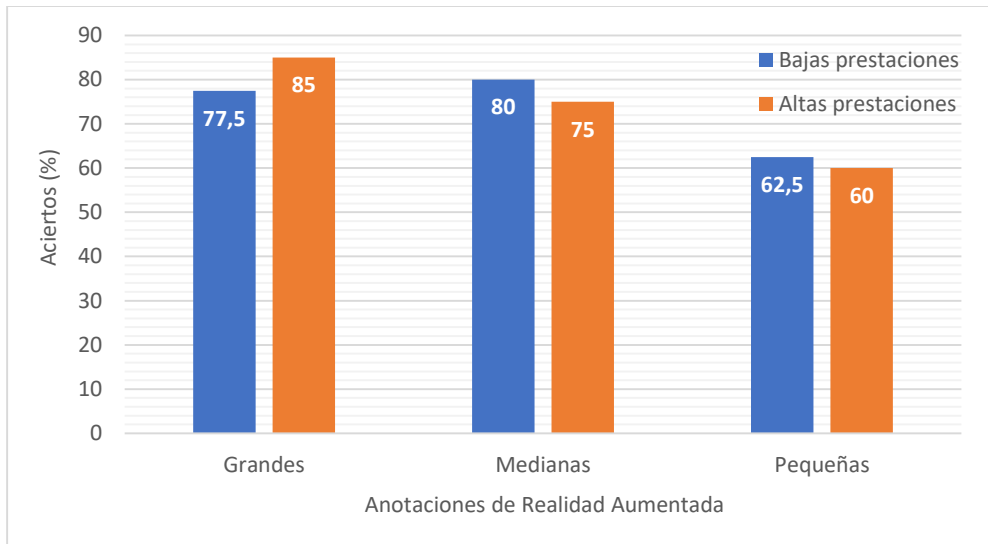


Figura 5.12. Porcentaje de aciertos para cada una de las anotaciones de Realidad Aumentada: grandes (L1 y H3), medianas (L2 y H2) y pequeñas (L3 y H1)

Hay que tener en cuenta que la precisión del posicionamiento de las anotaciones depende principalmente de la calibración previa del dispositivo llevada a cabo por el usuario. Por tanto, el esmero con que se posicione cada punto de calibración influye directamente en la correcta ubicación de la información virtual en el entorno físico. Consideramos, por tanto, que los resultados obtenidos son satisfactorios ya que, en el peor de los casos (un dispositivo con bajas prestaciones para buscar una anotación de tamaño pequeño-medio) se ha obtenido un 62,5% de aciertos. Incluso en los casos en que los usuarios identificaron erróneamente los objetos anotados, la información virtual de las anotaciones de Realidad Aumentada se mostró relativamente cerca de los objetos anotados. La Figura 5.13 muestra una superposición de todas las anotaciones encontradas durante el experimento. Como puede verse, sólo en algunos casos concretos la información virtual se muestra a más de un metro de distancia del objeto anotado.



Figura 5.13. Superposición de las anotaciones de Realidad Aumentada encontradas por los 40 participantes del estudio

Por lo tanto, en base a estos resultados, se puede afirmar que la hipótesis principal es correcta, ya que todos los usuarios, excepto uno, han visualizado todas las anotaciones de Realidad Aumentada y un porcentaje significativo de los participantes las han asociado con el objeto anotado correctamente independientemente del dispositivo utilizado.

5.8.2. Valoración subjetiva de los usuarios

Para todos los análisis que se detallan a continuación, las pruebas de significación fueron de dos colas y se realizaron al nivel de significación de 0,05. En primer lugar, se comprobó si los datos recogidos siguen una distribución normal. Como ejemplo representativo, el test de Kolmogórov-Smirnov ($D = 0,344$ y valor $p = 0,617$), el test de Anderson-Darling ($A = 0,567$ y valor $p = 0,162$) y el test de Shapiro-Wilk ($W = 0,371$ y valor $p = 0,471$) confirmaron que el conjunto de datos de puntuación para el dispositivo de altas prestaciones sigue una distribución normal. Aunque en aras de la brevedad no se detallan el resto de las pruebas de normalidad, lo mismo ocurrió en el resto de conjuntos de datos. Por lo tanto, se pueden utilizar tests paramétricos: t-test y el test de Cohen's d para datos emparejados y no emparejados, así como un estudio de correlación y la prueba ANOVA multifactorial para analizar las relaciones entre los parámetros del experimento. La Tabla 5.9 muestra la media y la desviación estándar (SD) de los resultados obtenidos de las preguntas que figuran en la Tabla 5.8. Las respuestas al cuestionario se agrupan en torno a los seis factores de Witmer. Además, se incluye la puntuación de los usuarios para cada una de las configuraciones del dispositivo.

Factor	Media \pm SD	t	p	Cohen's d
RF	5.145 \pm 1.009	-1.037	0.306	-0.505
CF	5.251 \pm 0.834	-2.046	0.048	-1.089
SF	5.35 \pm 0.681	-3.072	0.004	-0.930
EF	5.675 \pm 0.685	-1.16	0.253	-1.083
DF	5.410 \pm 0.715	0.091	0.928	-1.520
OF	5.375 \pm 0.632	-1.99	0.054	-4.349
Puntuación Altas P.	9.218 \pm 0.951	-1.594	0.119	-0.511
Puntuación Bajas P.	7.885 \pm 1.855	-1.182	0.245	-0.379

Tabla 5.9. Medias y desviaciones estándar de las respuestas al cuestionario de todos los participantes

En todos los factores se ha obtenido una puntuación media superior a 5. La puntuación máxima posible era 6, por lo que se puede afirmar que la experiencia de los usuarios con el sistema ha sido muy positiva. Si se analizan las diferencias entre los dos grupos, puede verse que sólo en las preguntas CF y SF se ha obtenido una $p < 0,05$ a favor del Grupo L, que comenzó el experimento con la configuración de bajas prestaciones. Estos usuarios puntuaron mejor en las preguntas CF "No poder moverse con la configuración de bajas prestaciones NO fue un problema" y

“Al final de la experiencia me sentí experto en el manejo de la aplicación”. Por otro lado, la pregunta SF “La cantidad de información mostrada en la pantalla era adecuada” obtuvo puntuaciones bajas (dos dos y dos tres) sólo de los usuarios del Grupo H. Además, si analizamos las consideraciones finales propuestas por los usuarios, 7 de los participantes del Grupo H se refirieron a mejoras relacionadas con la configuración de bajas prestaciones frente a tres usuarios del Grupo L. Por tanto, una posible explicación a estas diferencias entre grupos podría ser que los usuarios que probaron la configuración de bajas prestaciones en segundo lugar podrían haber tenido peores sensaciones y haber valorado peor ciertos aspectos de la aplicación.

La puntuación media global obtenida para el sistema evaluado fue superior a 9 para la configuración de altas prestaciones y casi 8 para la de bajas prestaciones. El estudio de estos conjuntos de datos mostró diferencias estadísticamente significativas entre las puntuaciones obtenidas cuando los participantes valoraron la aplicación para la configuración de bajas prestaciones y la aplicación para la configuración de altas prestaciones con $t[76] = 3,994$, $p = 0,000$ y Cohen's $d = 0,587$. Además de estas altas puntuaciones, a la pregunta “¿Qué es lo que más le ha gustado de la herramienta de anotación de realidad aumentada?”, 15 participantes respondieron que la aplicación es rápida y fácil de utilizar. Todos estos resultados permiten afirmar que la segunda hipótesis también ha sido validada.

5.8.3. Tiempos de ejecución

Aunque los datos anteriores ya han verificado las dos hipótesis planteadas para este estudio experimental, también se ha querido analizar el tiempo que tardan los usuarios en realizar las tareas, ya que esto proporcionará una idea de la eficiencia del sistema desarrollado y, en particular, del método de calibración.

El tiempo medio total para completar las tareas (calibración y búsqueda de anotaciones) fue muy similar con ambas configuraciones e inferior a 2 minutos en ambos casos, como muestra la Figura 5.14. Además, todas las anotaciones se encontraron, por término medio, en menos de 30 segundos. También hubo poca diferencia en el tiempo medio de calibración entre las configuraciones y en ambos casos se tardó menos de 1 minuto en calibrar el dispositivo, como muestra la Figura 5.15. Sólo 6 usuarios con bajas prestaciones y 8 con altas prestaciones necesitaron

más de un intento de calibración. Además, ambos grupos tardaron menos tiempo en calibrar con la segunda configuración utilizada. Por lo tanto, aunque en un principio pudiera parecer que es tedioso cargar al usuario con la tarea de calibrar el dispositivo, se ha comprobado que es un proceso rápido y sencillo con grandes ventajas, como la de utilizar el dispositivo en entornos no preparados.

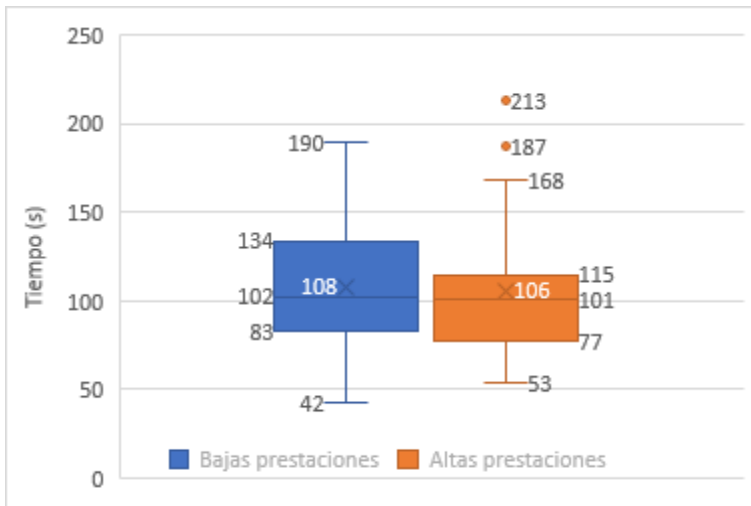


Figura 5.14. Tiempo total empleado por los participantes para completar todas las tareas (calibración y búsqueda de anotaciones)

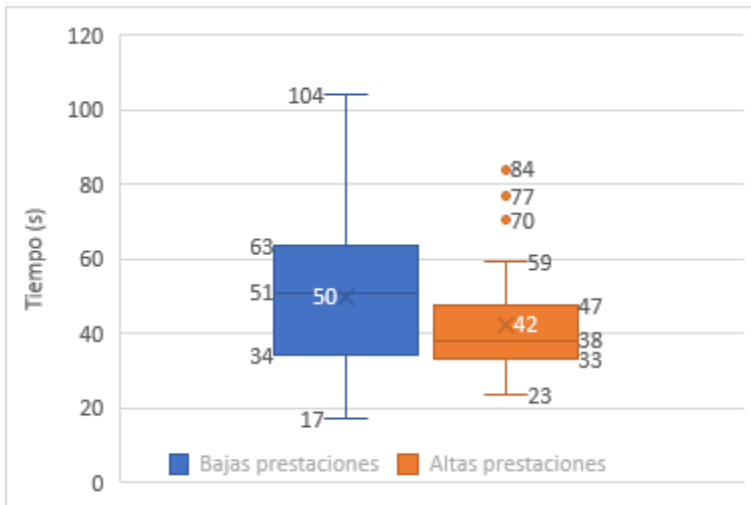


Figura 5.15. Tiempo empleado por los participantes para calibrar el dispositivo

Todos estos datos corroboran que el sistema desarrollado cumple con los objetivos de nuestra investigación: poder encontrar anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos, con diferentes tipos de dispositivos y, además, de forma sencilla.

5.9. Conclusiones y trabajo futuro

Como se ha venido estudiando a lo largo de este documento, las anotaciones de Realidad Aumentada tienen un gran potencial en contextos colaborativos asíncronos pero, en la práctica, presentan problemas tales como la necesidad de preparar previamente el entorno o la incompatibilidad tecnológica. Por ello, es importante encontrar soluciones que permitan su uso en entornos desconocidos y con diferentes tipos de dispositivos cuando creador y consumidor no están presentes al mismo tiempo. En la literatura científica, son muy pocas las publicaciones que tienen en cuenta todos estos factores. Para solventar esta carencia, en este capítulo se ha presentado un sistema que permite crear y visualizar anotaciones con diferentes dispositivos de Realidad Aumentada sin ningún tipo de marcador y sin necesidad de utilizar técnicas de reconocimiento de imágenes. Para ello, se han utilizado la caracterización y el modelo de datos de anotaciones de Realidad Aumentada propuestos en esta tesis y se ha desarrollado un método de calibración propio. Para comprobar que el sistema desarrollado cumple su función y que es fácil de utilizar por cualquier usuario, se ha realizado un estudio con 40 participantes que han utilizado la aplicación en un dispositivo móvil de altas prestaciones y en otro de bajas prestaciones.

Gracias a los resultados de este estudio experimental, se puede concluir que la hipótesis principal (“somos capaces de visualizar anotaciones de Realidad Aumentada en entornos desconocidos independientemente del dispositivo utilizado”) queda corroborada, ya que sólo un participante no fue capaz de encontrar algunas de las anotaciones y el 80% de los usuarios identificaron correctamente 2 o 3 de los 3 objetos anotados en el entorno. Además, sólo en un número insignificante de casos, el error de posicionamiento de la información virtual en el entorno físico fue superior a un metro. La hipótesis secundaria (“la usabilidad general del sistema es satisfactoria”) también ha sido corroborada por los datos experimentales, ya que todos los factores analizados fueron valorados de

media por los usuarios por encima de 5 en una escala de 6. Además, ambas configuraciones del dispositivo obtuvieron una puntuación alta: 9,2 para el de altas prestaciones y 7,9 para el de bajas prestaciones. Por último, los tiempos empleados para completar las tareas demuestran que el sistema desarrollado es eficiente. En particular, los tiempos de calibración del dispositivo corroboran que el método utilizado para anclar la información virtual en entornos desconocidos es eficaz y fácil de usar y aprender para cualquier usuario.

El trabajo aquí presentado puede ser útil para futuras investigaciones sobre AR-CSCW que pretendan desarrollar soluciones lo más universales posible en una amplia variedad de campos de aplicación: industria, construcción, patrimonio, turismo, medicina, educación, entretenimiento, etc. La versatilidad del prototipo desarrollado permite seguir con la investigación en varias direcciones. En primera instancia, sería interesante continuar con la validación del modelo de datos y del método de calibración con otros dispositivos de Realidad Aumentada, en diferentes entornos y con anotaciones más complejas. Por otro lado, sería relativamente sencillo presentar en el entorno las anotaciones de Realidad Aumentada tomadas por diferentes usuarios en diferentes momentos, aunque no compartan los puntos de anclaje. Gracias a la posición GPS almacenada, se puede determinar si en un espacio hay varios grupos de anotaciones y hacer las traslaciones necesarias para mostrarlas todas con el mismo sistema de referencia. Además, gracias al modelo de datos desarrollado en esta tesis y al método de calibración que se acaba de validar, es posible almacenar las anotaciones de Realidad Aumentada de manera remota, asegurando aún más la independencia del dispositivo.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de este documento se han presentado aportaciones al proceso de anotación mediante tecnologías de Realidad Aumentada. Concretamente, se han desarrollado diversas herramientas que ayudan en la implementación de cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada sin importar el dispositivo utilizado. Estas herramientas son: una caracterización, un modelo de datos y un método de calibración. Para ello, se ha realizado un análisis exhaustivo de la situación actual de las tecnologías de Realidad Aumentada y, en concreto, de las anotaciones, se han definido y caracterizado dichos elementos virtuales, se ha desarrollado un modelo de datos que recoge toda esa información y se han validados las aportaciones a nivel teórico, práctico y experimental.

A continuación, se resumen los logros alcanzados y las principales contribuciones de esta tesis, teniendo en cuenta los objetivos expuestos en el Capítulo 1. Después, se exponen posibles líneas de trabajo futuro. Finalmente, se enumeran las publicaciones científicas derivadas de este trabajo.

6.1. Conclusiones y aportaciones

El objetivo principal marcado al inicio de esta tesis fue desarrollar herramientas que permitan implementar cualquier tipo de anotación de Realidad Aumentada con independencia del dispositivo final que se vaya a utilizar para interactuar con ella. Este objetivo ha sido el referente de todo el trabajo llevado a cabo y se ha cumplido gracias a las aportaciones más importante de esta tesis, que se describen a continuación.

Caracterización

Se ha buscado, sintetizado, interrelacionado y clasificado la información más relevante sobre anotaciones de Realidad Aumentada existente en la literatura

científica. Fruto de este proceso, se ha elaborado una caracterización de dichos elementos virtuales que se estructura en torno a cuatro ejes: contenido, ubicación, temporalidad e interacción. Este esquema permite diseñar cualquier tipo de anotación, sea cual sea su funcionalidad, su apariencia, su grado de interacción con el usuario o su modo de vincularse al entorno físico. Se trata, por tanto, de una herramienta útil en la fase de diseño del desarrollo de cualquier sistema de Realidad Aumentada que utilice anotaciones. La utilización de esta caracterización en el diseño de sistemas de diversa índole se ha demostrado útil y ha facilitado el posterior desarrollo de los mismo.

Modelo de datos

Para poder aplicar de forma práctica la caracterización propuesta, se ha visto necesario dotar a los desarrolladores de un modelo de datos que permita su implementación directa. Es por ello que se ha propuesto un documento de esquema XML que permite definir cada una de las propiedades de las anotaciones de Realidad Aumentada. El modelo de datos desarrollado tiene una estructura bien delimitada, pues especifica cada uno de los datos que debe incluir una anotación definida correctamente. Pero, a su vez, es altamente flexible, pues permite definir cualquier tipo de anotación, incorporando todas las propiedades necesarias para ello. Esta herramienta es útil, por tanto, en la fase de implementación del desarrollo de sistemas de Realidad Aumentada. La utilización de este modelo de datos en los sistemas evaluados en esta tesis doctoral ha supuesto numerosos beneficios, como son: facilitar su implementación, favorecer el intercambio de datos entre los diferentes componentes, posibilitar la incorporación de nuevos tipos de anotaciones en el futuro sin necesidad de modificar el sistema y, en definitiva, alcanzar los objetivos propuestos en cada uno de los casos.

Método de calibración

La tercera contribución viene motivada por el estudio de uno de los escenarios más complicados para el uso de las tecnologías de Realidad Aumentada: un entorno en el que no se puede realizar ningún tipo de preparación previa (colocación de marcadores, captura de nube de puntos...), en el que los usuarios no están presentes en el mismo momento (colaboración asíncrona) y en el que se utilizan diferentes dispositivos para crear e interactuar con las anotaciones de Realidad

Aumentada. Para facilitar, en estas condiciones adversas, la alineación del mundo virtual con el mundo físico y la correcta georreferenciación de las anotaciones, se ha desarrollado un método de calibración asistido por el usuario. Este método, que se adapta a la información recogida por los diferentes sensores de cada tipo de dispositivo, permite hacer transparente el proceso interno de calibración para los usuarios y posicionar de forma precisa la información virtual sobre el entorno físico. La evaluación de este método de calibración por parte de los usuarios ha demostrado que se trata de una herramienta útil, rápida de aprender y fácil de usar.

6.2. Trabajo futuro

El estudio llevado a cabo en esta tesis deja abiertas varias líneas de investigación que suponen una continuación del trabajo realizado. A continuación, se presentan estas posibles líneas de trabajo futuro.

Extensión de la validación

Como se apuntaba al final del Capítulo 5, es necesario continuar con la validación de las herramientas desarrolladas en diferentes entornos y dispositivos. En concreto, sería interesante validar el correcto funcionamiento del método de calibración en gafas de Realidad Aumentada. Una vez verificado, sería apropiado llevar a cabo diferentes procesos de anotación (utilizando las herramientas desarrolladas) en todo tipo de entornos: interiores/exteriores, grandes/pequeños, con diferentes condiciones lumínicas, con elementos móviles, etc. Todo este trabajo, que se concretaría en uno o varios estudios experimentales, ayudaría a consolidar la investigación realizada en esta tesis.

Cloud de anotaciones de Realidad Aumentada

La computación en la nube (del inglés *cloud computing*) supone el uso de servidores remotos conectados a internet para almacenar, administrar y procesar todo tipo de información (bases de datos, servidores, software, etc.). El avance en esta tecnología, o más bien conjunto de ellas, hacen factible pensar en una base de datos pública donde almacenar y recuperar todo tipo de anotaciones de Realidad Aumentada. Esta idea sería la máxima expresión del escenario presentado en el Capítulo 5: Realiza Aumentada colaborativa asíncrona multidispositivo en entornos

desconocidos. Así, cualquier persona podría utilizar su dispositivo de Realidad Aumentada, fuera cual fuera éste, para visualizar e interactuar con cualquier tipo de anotación presente en su entorno. Al mismo tiempo, podría crear sus propias anotaciones y almacenarlas en la nube, para que, posteriormente, otros usuarios (o él mismo) pudieran consumirlas cuando se encontraran en su misma ubicación. También sería posible gestionar estas anotaciones en remoto, sin necesidad de trasladarse físicamente a las coordenadas donde fueron ancladas. Para llevar esto a la práctica, se pueden aplicar las contribuciones de esta tesis, pues sería requisito indispensable utilizar un modelo de datos común para todas las anotaciones.

Combinación con el Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas (IdC) hace referencia a la interconexión digital de los objetos cotidianos mediante internet. Se trata de un concepto que apareció a finales del siglo XX y que abogaba por la identificación, localización y gestión remota de cualquier objeto incorporándoles etiquetas RFID (*Radio Frequency Identification*). Actualmente, esta expresión se vincula más a la idea de interrelacionar entre sí diferentes dispositivos de forma que puedan comunicarse. Por ejemplo: un altavoz inteligente que incorpore un asistente virtual, como Alexa (*Amazon Alexa Official Site*, s. f.), es capaz de encender la televisión cuando empiezan las noticias o apagar las luces cuando se hace de día. La combinación de las anotaciones de Realidad Aumentada con el IdC abre un amplio abanico de posibilidades. En (Kim et al., 2021), se presenta una revisión en profundidad de 23 estudios que proponen sistemas de interacción multimodal combinando el IdC y la Realidad Aumentada. En él, se plantean futuras vías de investigación y desarrollo. Una de ellas es la necesidad de estandarización de los sistemas de interacción multimodal para lograr una alta escalabilidad. La utilización de formas unificadas de estructuras de datos y protocolos de comunicación proporcionaría la capacidad de manejar la gran diversidad de dispositivos IdC existentes y facilitaría la comunicación entre ellos. Sería, por tanto, un interesante campo de estudio para seguir haciendo aportaciones al proceso de anotación en Realidad Aumentada.

Incorporación a la Industria 4.0

La denominada Industria 4.0 aboga por la incorporación masiva de las nuevas tecnologías a los procesos de producción. Entre ellas, destaca la Realidad

Aumentada, pues puede ayudar enormemente en las tareas diarias de este sector. La utilización de anotaciones de Realidad Aumentada para la identificación de objetos o la teleasistencia son sólo algunos ejemplos. Sin embargo, a pesar de los grandes avances, aún quedan muchos retos que superar antes de que la incorporación de este paradigma de interacción a la industria sea masiva y definitiva, como se documenta en (Santi et al., 2021). Existe, por tanto, mucho trabajo de investigación y desarrollo en este sector que se puede realizar partiendo de las bases establecidas en esta tesis.

6.3. Publicaciones

Fruto del trabajo llevado a cabo durante la realización de esta tesis doctoral, se han publicado los siguientes trabajos:

- García-Pereira, I., Gimeno, J., Portalés, C., Vidal-González, M., & Morillo, P. (2018, June). On the design of a mixed-reality annotations tool for the inspection of pre-fab buildings. In *Proceedings of the XXVIII Spanish Computer Graphics Conference* (pp. 75-78). Eurographics Association. [doi:10.2312/ceig.20181157](https://doi.org/10.2312/ceig.20181157)
- García-Pereira, I., Gimeno, J., Pérez, M., Portalés, C., & Casas, S. (2019, April). MIME: A Mixed-Space Collaborative System with Three Immersion Levels and Multiple Users. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* (pp. 179-183). IEEE. [doi:10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00062](https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00062)
- García-Pereira, I., Portalés, C., Gimeno, J. & Casas, S. (2020). A Collaborative Augmented Reality Annotation Tool for the Inspection of Prefabricated Buildings. *Multimedia Tools and Applications*, 79, 6483-6501. [doi:10.1007/s11042-019-08419-x](https://doi.org/10.1007/s11042-019-08419-x)
- García-Pereira, I., Gimeno, J., Morillo, P., & Casanova-Salas, P. (2020, February). A Taxonomy of Augmented Reality Annotations. In *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 1: GRAPP* (pp. 412-419). [doi:10.5220/0009193404120419](https://doi.org/10.5220/0009193404120419)

- García-Pereira, I., Casanova-Salas, P., Gimeno, J., Morillo, P., & Reiners, D. (2021). Cross-Device Augmented Reality Annotations Method for Asynchronous Collaboration in Unprepared Environments. *Information*, 12(12), 519. [doi:10.3390/info12120519](https://doi.org/10.3390/info12120519)

Bibliografía

- Abowd, G. D., Atkeson, C. G., Hong, J., Long, S., Kooper, R., & Pinkerton, M. (1997). Cyberguide: A mobile context-aware tour guide. *Wireless Networks*, 3(5), 421-433. <https://doi.org/10.1023/A:1019194325861>
- Afif, F. N., & Basori, A. H. (2013). Orientation Control for Indoor Virtual Landmarks based on Hybrid-based Markerless Augmented Reality. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 97, 648-655. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.284>
- Ahmad, N., & Junaini, S. (2020). Augmented Reality for Learning Mathematics: A Systematic Literature Review. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 15(16), 106-122.
- Ahuja, K., Paredy, S., Xiao, R., Goel, M., & Harrison, C. (2019). LightAnchors: Appropriating Point Lights for Spatially-Anchored Augmented Reality Interfaces. *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 189-196. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347884>
- Alahmadi, M., & Yang, J. (2018). Towards Efficient Mobile Augmented Reality in Indoor Environments. En M. Aiello, Y. Yang, Y. Zou, & L.-J. Zhang (Eds.), *Artificial Intelligence and Mobile Services – AIMS 2018* (pp. 106-122). Springer International Publishing.
- Althoff, T., White, R. W., & Horvitz, E. (2016). Influence of Pokémon Go on Physical Activity: Study and Implications. *Journal of Medical Internet Research*, 18(12), e315. <https://doi.org/10.2196/jmir.6759>
- Amazon Alexa Official Site*. (s. f.). Amazon (Alexa). Recuperado 26 de marzo de 2022, de <https://developer.amazon.com/es-ES/alexa.html>
- Andersen, D., Popescu, V., Cabrera, M. E., Shanghavi, A., Gomez, G., Marley, S., Mullis, B., & Wachs, J. P. (2016). Medical telementoring using an augmented reality transparent display. *Surgery*, 159(6), 1646-1653. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2015.12.016>
- ARCore*. (s. f.). Google Developers. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://developers.google.com/ar?hl=es-419>
- ARKit Overview—Augmented Reality—Apple Developer*. (s. f.). Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/>
- Artoolkit*. (s. f.). Recuperado 1 de marzo de 2022, de <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- ArtoolkitX*. (s. f.). artoolkitX. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <http://www.artoolkitx.org/>

- Aschenbrenner, D., Rojkov, M., Leutert, F., Verlinden, J., Lukosch, S., Latoschik, M. E., & Schilling, K. (2018). Comparing Different Augmented Reality Support Applications for Cooperative Repair of an Industrial Robot. *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 69-74. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00036>
- Augmented Reality—Junaio... your mobile companion.* (2013, noviembre 30). <https://web.archive.org/web/20131130164336/http://www.junaio.com/>
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Azuma, R., Weon Lee, J., Jiang, B., Park, J., You, S., & Neumann, U. (1999). Tracking in unprepared environments for augmented reality systems. *Computers & Graphics*, 23(6), 787-793. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(99\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(99)00104-1)
- Azure Spatial Anchors | Microsoft Azure.* (s. f.). Recuperado 5 de agosto de 2021, de <https://azure.microsoft.com/es-es/services/spatial-anchors/>
- Baillard, C., Fradet, M., Alleaume, V., Jouet, P., & Laurent, A. (2017). Multi-device mixed reality TV: A collaborative experience with joint use of a tablet and a headset. *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1-2. <https://doi.org/10.1145/3139131.3141196>
- Bane, R., & Hollerer, T. (2004). Interactive Tools for Virtual X-Ray Vision in Mobile Augmented Reality. *Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 231-239. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2004.36>
- Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of usability studies*, 4(3), 114-123.
- Barkhuus, L., & Rode, J. A. (2007, abril 29). From Mice to Men—24 Years of Evaluation in CHI. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI07: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, San Jose California USA. <https://doi.org/10.1145/1240624.2180963>
- Bell, B., Feiner, S., & Höllerer, T. (2001). View Management for Virtual and Augmented Reality. *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 101-110. <https://doi.org/10.1145/502348.502363>
- Bhattacharyya, P., Nath, R., Jo, Y., Jadhav, K., & Hammer, J. (2019). Brick: Toward A Model for Designing Synchronous Colocated Augmented Reality Games. En *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-9). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300553>

- Billinghamurst, M., Kato, H., & Poupyrev, I. (2008). Tangible augmented reality. *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 Courses on - SIGGRAPH Asia '08*, 1-10. <https://doi.org/10.1145/1508044.1508051>
- Billinghamurst, M., & Thomas, B. H. (2011). Mobile Collaborative Augmented Reality. En L. Alem & W. Huang (Eds.), *Recent Trends of Mobile Collaborative Augmented Reality Systems* (pp. 1-19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9845-3_1
- Billinghamurst, M., Weghorst, S., & Furness, T. (1998). Shared space: An augmented reality approach for computer supported collaborative work. *Virtual Reality*, 3(1), 25-36. <https://doi.org/10.1007/BF01409795>
- Bimber, O., & Raskar, R. (2006). Modern Approaches to Augmented Reality. *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*. <https://doi.org/10.1145/1185657.1185796>
- Boboc, R. G., Gîrbacia, F., & Butilă, E. V. (2020). The Application of Augmented Reality in the Automotive Industry: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 10(12), 4259. <https://doi.org/10.3390/app10124259>
- Bork, F., Lehner, A., Eck, U., Navab, N., Waschke, J., & Kugelmann, D. (2021). The Effectiveness of Collaborative Augmented Reality in Gross Anatomy Teaching: A Quantitative and Qualitative Pilot Study. *Anatomical Sciences Education*, 14(5), 590-604. <https://doi.org/10.1002/ase.2016>
- Bork, F., Lehner, A., Kugelmann, D., Eck, U., Waschke, J., & Navab, N. (2019). VesARlius: An Augmented Reality System for Large-Group Co-located Anatomy Learning. *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 122-123. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2019.00-66>
- Brata, K. C., & Liang, D. (2019). *An effective approach to develop location-based augmented reality information support*. 10.
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. En P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & I. L. McClelland (Eds.), *Usability Eval. Ind* (pp. 189-194). Taylor & Francis.
- Bruno, F., Barbieri, L., Marino, E., Muzzupappa, M., D'Orlando, L., & Colacino, B. (2019). An augmented reality tool to detect and annotate design variations in an Industry 4.0 approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04254-4>
- Bullen, C. V., & Johansen, R. (1988). *Groupware, a key to managing business teams?*
- Butz, A., Hollerer, T., Feiner, S., MacIntyre, B., & Beshers, C. (1999). Enveloping users and computers in a collaborative 3D augmented reality. *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, 35-44. <https://doi.org/10.1109/IWAR.1999.803804>

- Cao, D., & Kim, S. (2020). Augmented Reality Annotation for Real-Time Collaboration System. *Journal of Korea Multimedia Society*, 23(3), 483-489. <https://doi.org/10.9717/kmms.2020.23.3.483>
- Casas, S., Gimeno, J., Casanova-Salas, P., Riera, J. V., & Portalés, C. (2020). *Virtual and Augmented Reality for the Visualization of Summarized Information in Smart Cities: A Use Case for the City of Dubai* [Chapter]. Smart Systems Design, Applications, and Challenges; IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2112-0.ch015>
- Casas, S., Portalés, C., García-Pereira, I., & Gimeno, J. (2019). Mixing Different Realities in a Single Shared Space: Analysis of Mixed-Platform Collaborative Shared Spaces. En *Harnessing the Internet of Everything (IoE) for Accelerated Innovation Opportunities* (pp. 175-192). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7332-6.ch008>
- Caudell, T. P., & Mizell, D. W. (1992). Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, 659-669 vol.2. <https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
- Cejka, J., Zuzi, M., Agrafiotis, P., Skarlatos, D., Bruno, F., & Liarokapis, F. (2018). *Improving Marker-Based Tracking for Augmented Reality in Underwater Environments*. The Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/gch.20181337>
- Chen, K., Li, T., Kim, H.-S., Culler, D. E., & Katz, R. H. (2018). MARVEL: Enabling Mobile Augmented Reality with Low Energy and Low Latency. *Proceedings of the 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 292-304. <https://doi.org/10.1145/3274783.3274834>
- Chu, M., Matthews, J., & Love, P. E. D. (2018). Integrating mobile Building Information Modelling and Augmented Reality systems: An experimental study. *Automation in Construction*, 85, 305-316. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.032>
- Colley, A., Thebault-Spieker, J., Lin, A. Y., Degraen, D., Fischman, B., Häkkinilä, J., Kuehl, K., Nisi, V., Nunes, N. J., Wenig, N., Wenig, D., Hecht, B., & Schöning, J. (2017). The Geography of Pokémon GO: Beneficial and Problematic Effects on Places and Movement. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1179-1192. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025495>
- Comport, A. I., Marchand, E., & Chaumette, F. (2003). A real-time tracker for markerless augmented reality. *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings.*, 36-45. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2003.1240686>

- Ćuković, S., Gattullo, M., Pankratz, F., Devedžić, G., Carrabba, E., & Baizid, K. (2015). *Marker Based vs. Natural Feature Tracking Augmented Reality Visualization of the 3D Foot Phantom*. 9.
- Daiber, F., Kosmalla, F., & Krüger, A. (2013). BoulderAR: Using augmented reality to support collaborative boulder training. *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 949-954. <https://doi.org/10.1145/2468356.2468526>
- Diegmann, P., Schmidt-Kraepelin, M., Eynden, S., & Basten, D. (2015). Benefits of Augmented Reality in Educational Environments—A Systematic Literature Review. *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2015*.
- Dodig-Crnkovic, G. (2002). Scientific methods in computer science. *Proceedings of the Conference for the Promotion of Research in IT at New Universities and at University Colleges in Sweden, Skövde, Suecia*, 126-130.
- Du, P., & Bulusu, N. (2021). An automated AR-based annotation tool for indoor navigation for visually impaired people. *The 23rd International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, 1-4. <https://doi.org/10.1145/3441852.3476561>
- Egger, J., & Masood, T. (2020). Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>
- Ellis, C. A., Gibbs, S. J., & Rein, G. (1991). Groupware: Some issues and experiences. *Communications of the ACM*, 34(1), 39-58. <https://doi.org/10.1145/99977.99987>
- Ens, B., Lanir, J., Tang, A., Bateman, S., Lee, G., Piumsomboon, T., & Billingham, M. (2019). Revisiting collaboration through mixed reality: The evolution of groupware. *International Journal of Human-Computer Studies*, 131, 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2019.05.011>
- Fang, W., Zheng, L., & Wu, X. (2017). Multi-sensor based real-time 6-DoF pose tracking for wearable augmented reality. *Computers in Industry*, 92-93, 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.06.002>
- Feiner, S., MacIntyre, B., & Seligmann, D. D. (1992). *Annotating the real world with knowledge-based graphics on a see-through head-mounted display*.
- Fragoso, V., Gauglitz, S., Zamora, S., Kleban, J., & Turk, M. (2011). TranslatAR: A mobile augmented reality translator. *2011 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, 497-502. <https://doi.org/10.1109/WACV.2011.5711545>
- Furness, T. A. (1986). The Super Cockpit and its Human Factors Challenges. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 30(1), 48-52. <https://doi.org/10.1177/154193128603000112>

- Furness, T. A., & Kollin, J. S. (1995). *Virtual retinal display* (United States Patent N.º US5467104A).
- Fuvattanasilp, V., Fujimoto, Y., Plopski, A., Taketomi, T., Sandor, C., Kanbara, M., & Kato, H. (2021). SlidAR+: Gravity-aware 3D object manipulation for handheld augmented reality. *Computers & Graphics*, *95*, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.01.005>
- García-Pereira, I., Gimeno, J., Pérez, M., Portalés, C., & Casas, S. (2018). MIME: A Mixed-Space Collaborative System with Three Immersion Levels and Multiple Users. *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 179-183. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00062>
- García-Pereira, I., Portalés, C., Casas, S., Vidal-González, M., Gimeno, J. (2019). *Augmented Reality-Based Training Systems for Teaching Health and Safety Procedures in Construction*. In K. Becnel (Ed.), *Emerging Technologies in Virtual Learning Environments* (pp. 216-237). Hershey, PA: IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7987-8.ch011>
- García-Pereira, I., Portalés, C., Gimeno, J., & Casas, S. (2020). A collaborative augmented reality annotation tool for the inspection of prefabricated buildings. *Multimedia Tools and Applications*, *79*(9), 6483-6501. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08419-x>
- García-Pereira, I., Vera, L., Aixendri, M. P., Portalés, C., & Casas, S. (2020). *Multisensory Experiences in Virtual Reality and Augmented Reality Interaction Paradigms*. In *Smart Systems Design, Applications, and Challenges* (pp. 279-298). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2112-0.ch014>
- Gauglitz, S., Nuernberger, B., Turk, M., & Höllerer, T. (2014a). In Touch with the Remote World: Remote Collaboration with Augmented Reality Drawings and Virtual Navigation. *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 197-205. <https://doi.org/10.1145/2671015.2671016>
- Gauglitz, S., Nuernberger, B., Turk, M., & Höllerer, T. (2014b). World-stabilized Annotations and Virtual Scene Navigation for Remote Collaboration. *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 449-459. <https://doi.org/10.1145/2642918.2647372>
- Gimeno Sancho, J. (2015). *Aportaciones al proceso de creación de contenidos de realidad aumentada, orientados a formación, industria y construcción*.
- Google Académico*. (s. f.). Recuperado 2 de marzo de 2022, de <https://scholar.google.es/>
- Grundhöfer, A., & Iwai, D. (2018). Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications. *Computer Graphics Forum*, *37*(2), 653-675. <https://doi.org/10.1111/cgf.13387>

- Guo, A., Canberk, I., Murphy, H., Monroy-Hernández, A., & Vaish, R. (2019). Blocks: Collaborative and Persistent Augmented Reality Experiences. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 3(3), 83:1-83:24. <https://doi.org/10.1145/3351241>
- Hansen, F. A. (2006). Ubiquitous Annotation Systems: Technologies and Challenges. *Proceedings of the Seventeenth Conference on Hypertext and Hypermedia*, 121-132. <https://doi.org/10.1145/1149941.1149967>
- Hattab, A., & Taubin, G. (2019). Rough Carving of 3D Models with Spatial Augmented Reality. *Proceedings of the ACM Symposium on Computational Fabrication*, 4:1-4:10. <https://doi.org/10.1145/3328939.3328998>
- Höllerer, T., Wither, J., & DiVerdi, S. (2007). "Anywhere Augmentation": Towards Mobile Augmented Reality in Unprepared Environments. En G. Gartner, W. Cartwright, & M. P. Peterson (Eds.), *Location Based Services and TeleCartography* (pp. 393-416). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36728-4_29
- Hoppe, A. H., Westerkamp, K., Maier, S., van de Camp, F., & Stiefelhagen, R. (2018). Multi-user Collaboration on Complex Data in Virtual and Augmented Reality. En C. Stephanidis (Ed.), *HCI International 2018 – Posters' Extended Abstracts* (pp. 258-265). Springer International Publishing.
- Hornbæk, K. (2013). Some Whys and Hows of Experiments in Human–Computer Interaction. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, 5(4), 299-373. <https://doi.org/10.1561/1100000043>
- Huang, F., Zhou, Y., Yu, Y., Wang, Z., & Du, S. (2011). Piano AR: A Markerless Augmented Reality Based Piano Teaching System. *2011 Third International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2, 47-52. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2011.82>
- Huynh, B., Orlosky, J., & Höllerer, T. (2019). *In-Situ Labeling for Augmented Reality Language Learning*. 6.
- Ideal Modeling & Diagramming Tool for Agile Team Collaboration*. (s. f.). Recuperado 6 de marzo de 2022, de <https://www.visual-paradigm.com/>
- Ingress Prime*. (s. f.). Ingress Prime. Recuperado 5 de mayo de 2021, de <https://ingress.com/en/>
- Ioannidi, A., Gavalas, D., & Kasapakis, V. (2017). Flaneur: Augmented exploration of the architectural urban landscape. *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 529-533. <https://doi.org/10.1109/ISCC.2017.8024582>

- Irizarry, J., Gheisari, M., Williams, G., & Walker, B. N. (2013). InfoSPOT: A mobile Augmented Reality method for accessing building information through a situation awareness approach. *Automation in Construction*, 33, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.002>
- Irlitti, A., Smith, R. T., Itzstein, S. V., Billinghamurst, M., & Thomas, B. H. (2016). Challenges for Asynchronous Collaboration in Augmented Reality. *2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)*, 31-35. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2016.0032>
- Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, 234-241. <https://doi.org/10.1145/258549.258715>
- Jalo, H., Pirkkalainen, H., Torro, O., Kärkkäinen, H., Puhto, J., & Kankaanpää, T. (2018). How Can Collaborative Augmented Reality Support Operative Work in the Facility Management Industry?: *Proceedings of the 10th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 41-51. <https://doi.org/10.5220/0006889800410051>
- Kahan, J., & Koivunen, M.-R. (2001). Annotea: An Open RDF Infrastructure for Shared Web Annotations. *Proceedings of the 10th International Conference on World Wide Web*, 623-632. <https://doi.org/10.1145/371920.372166>
- Kajastila, R., Holsti, L., & Hämäläinen, P. (2016). The Augmented Climbing Wall: High-Exertion Proximity Interaction on a Wall-Sized Interactive Surface. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 758-769. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858450>
- Kalkofen, D., Tatzgern, M., & Schmalstieg, D. (2009). Explosion Diagrams in Augmented Reality. *2009 IEEE Virtual Reality Conference*, 71-78. <https://doi.org/10.1109/VR.2009.4811001>
- Kato, H., & Billinghamurst, M. (1999). Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, 85-94. <https://doi.org/10.1109/IWAR.1999.803809>
- Kato, H., Billinghamurst, M., Poupyrev, I., Imamoto, K., & Tachibana, K. (2000). Virtual object manipulation on a table-top AR environment. *Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000)*, 111-119. <https://doi.org/10.1109/ISAR.2000.880934>

- Keil, J., Schmitt, F., Engelke, T., Graf, H., & Olbrich, M. (2018). Augmented Reality Views: Discussing the Utility of Visual Elements by Mediation Means in Industrial AR from a Design Perspective. En J. Y. C. Chen & G. Fragomeni (Eds.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality: Applications in Health, Cultural Heritage, and Industry* (pp. 298-312). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91584-5_24
- Kim, J. C., Laine, T. H., & Åhlund, C. (2021). Multimodal Interaction Systems Based on Internet of Things and Augmented Reality: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 11(4), 1738. <https://doi.org/10.3390/app11041738>
- Kim, K., Billinghamurst, M., Bruder, G., Duh, H. B., & Welch, G. F. (2018). Revisiting Trends in Augmented Reality Research: A Review of the 2nd Decade of ISMAR (2008–2017). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(11), 2947-2962. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2868591>
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33(2004), 1-26.
- Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 51(1), 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>
- Klein, G., & Murray, D. (2007). Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 1-10. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538852>
- Langlotz, T., Regenbrecht, H., Zollmann, S., & Schmalstieg, D. (2013). Audio Stickies: Visually-guided Spatial Audio Annotations on a Mobile Augmented Reality Platform. *Proceedings of the 25th Australian Computer-Human Interaction Conference: Augmentation, Application, Innovation, Collaboration*, 545-554. <https://doi.org/10.1145/2541016.2541022>
- Langlotz, T., Wagner, D., Mulloni, A., & Schmalstieg, D. (2012). Online Creation of Panoramic Augmented Reality Annotations on Mobile Phones. *IEEE Pervasive Computing*, 11(2), 56-63. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2010.69>
- Lanir, J., Stone, R., Cohen, B., & Gurevich, P. (2013). Ownership and Control of Point of View in Remote Assistance. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2243-2252. <https://doi.org/10.1145/2470654.2481309>
- Lee, J., & Bovik, A. (2009). CHAPTER 19—Video Surveillance. En A. Bovik (Ed.), *The Essential Guide to Video Processing* (pp. 619-651). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374456-2.00022-0>

- Lee, T., & Hollerer, T. (2008). Hybrid Feature Tracking and User Interaction for Markerless Augmented Reality. *2008 IEEE Virtual Reality Conference*, 145-152. <https://doi.org/10.1109/VR.2008.4480766>
- Lehmann, S., & Murray, M. M. (2005). The role of multisensory memories in unisensory object discrimination. *Cognitive Brain Research*, *24*(2), 326-334. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.02.005>
- Lien, K., Nuernberger, B., Höllerer, T., & Turk, M. (2016). PPV: Pixel-Point-Volume Segmentation for Object Referencing in Collaborative Augmented Reality. *2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 77-83. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2016.21>
- Lien, K., Nuernberger, B., Turk, M., & Höllerer, T. (2015). [POSTER] 2D-3D Co-segmentation for AR-based Remote Collaboration. *2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 184-185. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2015.56>
- Luria, A. R. (1987). *The mind of a mnemonist: A little book about a vast memory* (pp. xxv, 160). Harvard University Press.
- Mackay, W. E. (1998). Augmented Reality: Linking Real and Virtual Worlds: A New Paradigm for Interacting with Computers. *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, 13-21. <https://doi.org/10.1145/948496.948498>
- MacWilliams, A., Sandor, C., Wagner, M., Bauer, M., Klinker, G., & Bruegge, B. (2003). Herding sheep: Live system for distributed augmented reality. *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings.*, 123-132. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2003.1240695>
- Makita, K., Kanbara, M., & Yokoya, N. (2009). View management of annotations for wearable augmented reality. *2009 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 982-985. <https://doi.org/10.1109/ICME.2009.5202661>
- Marino, E., Barbieri, L., Colacino, B., Fleri, A. K., & Bruno, F. (2021). An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments. *Computers in Industry*, *127*, 103412. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103412>
- Martínez, B., Casas, S., Vidal-González, M., Vera, L., & García-Pereira, I. (2018). TinajAR: An Edutainment Augmented Reality Mirror for the Dissemination and Reinterpretation of Cultural Heritage. *Multimodal Technologies and Interaction*, *2*(2), 33. <https://doi.org/10.3390/mti2020033>
- Martín-Gutiérrez, J., Fabiani, P., Benesova, W., Meneses, M. D., & Mora, C. E. (2015). Augmented reality to promote collaborative and autonomous learning in higher education. *Computers in Human Behavior*, *51*, 752-761. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.11.093>

- Milgram, P., & Colquhoun, H. (1999). A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. En Y. Ohta & H. Tamura (Eds.), *Mixed Reality* (pp. 5-30). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87512-0_1
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*.
- Mine, M. R. (1995). *Virtual Environment Interaction Techniques*.
- Mongoose ODM. (s. f.). Recuperado 11 de marzo de 2022, de <https://mongoosejs.com/>
- Mooser, J., You, S., & Neumann, U. (2007). Real-Time Object Tracking for Augmented Reality Combining Graph Cuts and Optical Flow. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 145-152. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538839>
- Morschheuser, B., Riari, M., Hamari, J., & Maedche, A. (2017). How games induce cooperation? A study on the relationship between game features and we-intentions in an augmented reality game. *Computers in Human Behavior*, 77, 169-183. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.08.026>
- Morse, J. M. (2000). Determining Sample Size. *Qualitative Health Research*, 10(1), 3-5. <https://doi.org/10.1177/104973200129118183>
- Mourtzis, D., Zogopoulos, V., & Vlachou, E. (2017). Augmented Reality Application to Support Remote Maintenance as a Service in the Robotics Industry. *Procedia CIRP*, 63, 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.154>
- Müller, T. (2019). Challenges in representing information with augmented reality to support manual procedural tasks. *ElectrEng 2019, Vol. 3, Pages 71-97*. <https://doi.org/10.3934/ElectrEng.2019.1.71>
- Nava, I. J. R., & Carrera, I. B. (2004). *Transformación UML-XML-BDOR-UML*.
- Ni, T., Karlson, A. K., & Wigdor, D. (2011). AnatOnMe: Facilitating doctor-patient communication using a projection-based handheld device. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 3333-3342. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979437>
- Nuernberger, B., Lien, K., Höllerer, T., & Turk, M. (2016). Interpreting 2D gesture annotations in 3D augmented reality. *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 149-158. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2016.7460046>
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>

- Pidel, C., & Ackermann, P. (2020). Collaboration in Virtual and Augmented Reality: A Systematic Overview. En L. T. De Paolis & P. Bourdot (Eds.), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (pp. 141-156). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58465-8_10
- Pokémon GO*. (s. f.). Pokémon GO. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://pokemongolive.com/>
- Polvi, J., Taketomi, T., Yamamoto, G., Dey, A., Sandor, C., & Kato, H. (2016). SlidAR: A 3D positioning method for SLAM-based handheld augmented reality. *Computers & Graphics*, *55*, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.10.013>
- Poretski, L. P., Lanir, J., Margalit, R., & Arazy, O. (2021). Physicality As an Anchor for Coordination: Examining Collocated Collaboration in Physical and Mobile Augmented Reality Settings. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, *5*(CSCW2), 470:1-470:29. <https://doi.org/10.1145/3479857>
- Portalés, C., Casas, S., Gimeno, J., Fernández, M., & Poza, M. (2018). From the Paper to the Tablet: On the Design of an AR-Based Tool for the Inspection of Pre-Fab Buildings. Preliminary Results of the SIRAE Project. *Sensors*, *18*(4), 1262. <https://doi.org/10.3390/s18041262>
- Portalés Ricart, C. (2008). Entornos multimedia de realidad aumentada en el campo del arte. *Riunet*. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/3402>
- Porzi, L., Buló, S. R., Valigi, P., Lanz, O., & Ricci, E. (2014). Learning Contours for Automatic Annotations of Mountains Pictures on a Smartphone. *Proceedings of the International Conference on Distributed Smart Cameras*, 13:1-13:6. <https://doi.org/10.1145/2659021.2659046>
- Pryor, H. L., Furness, T. A., & Viirre, E. (1998). The Virtual Retinal Display: A new Display Technology using Scanned Laser Light. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *42*(22), 1570-1574. <https://doi.org/10.1177/154193129804202208>
- Rabbi, I., & Ullah, S. (2013). *A Survey on Augmented Reality Challenges and Tracking*.
- Raskar, R., van Baar, J., Beardsley, P., Willwacher, T., Rao, S., & Forlines, C. (2006). iLamps: Geometrically aware and self-configuring projectors. *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, 7-es. <https://doi.org/10.1145/1185657.1185802>
- Rauschnabel, P. A., Rossmann, A., & tom Dieck, M. C. (2017). An adoption framework for mobile augmented reality games: The case of Pokémon Go. *Computers in Human Behavior*, *76*, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.07.030>

- Reardon, C., Lee, K., Rogers, J. G., & Fink, J. (2019). Communicating via Augmented Reality for Human-Robot Teaming in Field Environments. *2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 94-101. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2019.8848971>
- Reitmayr, G., Eade, E., & Drummond, T. W. (2007). Semi-automatic Annotations in Unknown Environments. *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538827>
- Reitmayr, G., Langlotz, T., Wagner, D., Mulloni, A., Schall, G., Schmalstieg, D., & Pan, Q. (2010). Simultaneous Localization and Mapping for Augmented Reality. *2010 International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality*, 5-8. <https://doi.org/10.1109/ISUVR.2010.12>
- Rekimoto, J. (1996). Transvision: A hand-held augmented reality system for collaborative design. *Proceedings of Virtual Systems and Multi-Media (VSMM '96)*.
- Rekimoto, J., & Nagao, K. (1995). The World Through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments. *Proceedings of the 8th Annual ACM Symposium on User Interface and Software Technology*, 29-36. <https://doi.org/10.1145/215585.215639>
- Rijnsburger, W., & Kratz, S. (2017). Personalized presentation annotations using optical HMDs. *Multimedia Tools and Applications*, 76(4), 5607-5629. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-4064-0>
- Rolland, J. P., Biocca, F., Hamza-Lup, F., Ha, Y., & Martins, R. (2005). Development of Head-Mounted Projection Displays for Distributed, Collaborative, Augmented Reality Applications. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(5), 528-549. <https://doi.org/10.1162/105474605774918741>
- Santi, G. M., Ceruti, A., Liverani, A., & Osti, F. (2021). Augmented Reality in Industry 4.0 and Future Innovation Programs. *Technologies*, 9(2), 33. <https://doi.org/10.3390/technologies9020033>
- Schall, G., Grabner, H., Grabner, M., Wohlhart, P., Schmalstieg, D., & Bischof, H. (2008). 3D tracking in unknown environments using on-line keypoint learning for mobile augmented reality. *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2008.4563134>
- Scherrer, C., Pilet, J., Lepetit, V., & Fua, P. (2009). Souvenirs du monde des montagnes. *ACM SIGGRAPH 2009 Art Gallery*, 1-6. <https://doi.org/10.1145/1667265.1667273>

- Schmandt, C. (1983). Spatial Input/Display Correspondence in a Stereoscopic Computer Graphic Work Station. *Proceedings of the 10th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 253-261. <https://doi.org/10.1145/800059.801156>
- Schnabel, M. A., Wang, X., Seichter, H., & Kvan, T. (2007). From Virtuality to Reality and Back. *The Hong Kong Polytechnic University*.
- Schoenfelder, R., & Schmalstieg, D. (2008). Augmented Reality for Industrial Building Acceptance. *2008 IEEE Virtual Reality Conference*, 83-90. <https://doi.org/10.1109/VR.2008.4480755>
- Scopus. (s. f.). Recuperado 17 de marzo de 2022, de <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>
- Sereno, M., Wang, X., Besancon, L., Mcguffin, M. J., & Isenberg, T. (2020). Collaborative Work in Augmented Reality: A Survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3032761>
- Sevilla, J., Vera, L., Herrera, G., & Fernández, M. (2018). FORHHSS-TEA, support to the individual work system for people with autism spectrum disorder using virtual and augmented reality. *Proceedings of the XXVIII Spanish Computer Graphics Conference*, 55-64. <https://doi.org/10.2312/ceig.20181155>
- Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2002). *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*. Elsevier.
- Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2018). *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*. Morgan Kaufmann.
- SIRAE. (s. f.). Recuperado 9 de marzo de 2022, de <https://links.uv.es/ingarpe4/SIRAE>
- Speicher, M., Cao, J., Yu, A., Zhang, H., & Nebeling, M. (2018). 360Anywhere: Mobile Ad-hoc Collaboration in Any Environment Using 360 Video and Augmented Reality. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 2(EICS), 9:1-9:20. <https://doi.org/10.1145/3229091>
- Speicher, M., Hall, B. D., Yu, A., Zhang, B., Zhang, H., Nebeling, J., & Nebeling, M. (2018). XD-AR: Challenges and Opportunities in Cross-Device Augmented Reality Application Development. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 2(EICS), 7:1-7:24. <https://doi.org/10.1145/3229089>
- Stetten, G., Chib, V., Hildebrand, D., & Bursee, J. (2001). Real time tomographic reflection: Phantoms for calibration and biopsy. *Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*, 11-19. <https://doi.org/10.1109/ISAR.2001.970511>

- Sutherland, I. E. (1968). A Head-mounted Three Dimensional Display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, 757-764. <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>
- Szalavári, Z., Schmalstieg, D., Fuhrmann, A., & Gervautz, M. (1998). «Studierstube»: An environment for collaboration in augmented reality. *Virtual Reality*, 3(1), 37-48. <https://doi.org/10.1007/BF01409796>
- Tateno, M., Skokauskas, N., Kato, T. A., Teo, A. R., & Guerrero, A. P. S. (2016). New game software (Pokémon Go) may help youth with severe social withdrawal, hikikomori. *Psychiatry research*, 246, 848-849. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2016.10.038>
- Tatzgern, M., Kalkofen, D., & Schmalstieg, D. (2013). Dynamic compact visualizations for augmented reality. *2013 IEEE Virtual Reality (VR)*, 3-6. <https://doi.org/10.1109/VR.2013.6549347>
- Tomlein, M., & Grønbaek, K. (2018). Augmented Reality Supported Modeling of Industrial Systems to Infer Software Configuration. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 2(EICS), 5:1-5:17. <https://doi.org/10.1145/3229087>
- Tong, L. (2018, mayo). *ConNect: Exploring Augmented Reality Service using Image Localization and Neural Network Object Detection*.
- Tönnis, M., Plecher, D. A., & Klinker, G. (2013). Representing information – Classifying the Augmented Reality presentation space. *Computers & Graphics*, 37(8), 997-1011. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2013.09.002>
- Tregel, T., Dutz, T., Hock, P., Müller, P. N., Achenbach, P., & Göbel, S. (2020). StreetConqAR: Augmented Reality Anchoring in Pervasive Games. En M. Ma, B. Fletcher, S. Göbel, J. Baalsrud Hauge, & T. Marsh (Eds.), *Serious Games* (pp. 3-16). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61814-8_1
- Tseng, P. Y., Haraldsson, H., & Belongie, S. (2019). *Annotate All! A Perspective Preserved Asynchronous Annotation System for Collaborative Augmented Reality*. 3.
- Turaga, P., Chellappa, R., & Veeraraghavan, A. (2010). Advances in Video-Based Human Activity Analysis: Challenges and Approaches. En M. V. Zelkowitz (Ed.), *Advances in Computers* (Vol. 80, pp. 237-290). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(10\)80007-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(10)80007-5)
- Unity Real-Time Development Platform*. (s.f.). Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://unity.com/>
- Unreal Engine*. (s.f.). Unreal Engine. Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.unrealengine.com/en-US/>

- Vuforia Enterprise Augmented Reality Software. (s. f.). Recuperado 1 de marzo de 2022, de <https://www.ptc.com/en/products/vuforia>
- W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures. (s. f.). Recuperado 6 de marzo de 2022, de <https://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/>
- W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 2: Datatypes. (s. f.). Recuperado 6 de marzo de 2022, de <https://www.w3.org/TR/xmlschema11-2/>
- Wang, Z., Nguyen, C., Asente, P., & Dorsey, J. (2021). DistanciAR: Authoring Site-Specific Augmented Reality Experiences for Remote Environments. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-12. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445552>
- Web of Science. (s. f.). Recuperado 17 de marzo de 2022, de <https://www.webofscience.com/>
- Wither, J., DiVerdi, S., & Höllerer, T. (2009). Annotation in outdoor augmented reality. *Computers & Graphics*, 33(6), 679-689. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2009.06.001>
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Wojciechowski, R. (2017). Versatile Augmented Reality Scenes for Tangible Interaction in Real-World Environments. En L. T. De Paolis, P. Bourdot, & A. Mongelli (Eds.), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (pp. 490-500). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60928-7_41
- XML Schema Reference. (s. f.). Recuperado 6 de marzo de 2022, de https://www.w3schools.com/xml/schema_elements_ref.asp
- Yang, X., Guo, J., Xue, T., & Cheng, K.-T. (Tim). (2018). Robust and real-time pose tracking for augmented reality on mobile devices. *Multimedia Tools and Applications*, 77(6), 6607-6628. <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4575-3>
- Zhou, F., Duh, H. B.-L., & Billinghurst, M. (2008). Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. *2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 193-202. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637362>
- Zillner, J., Mendez, E., & Wagner, D. (2018). Augmented Reality Remote Collaboration with Dense Reconstruction. *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 38-39. <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00028>