



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB)

Departamento de Expresión Gráfica II (EGA II)

Programa de Doctorado: Gestión y Valoración Urbana, del Departamento de
Construcciones Arquitectónicas I (CA1)

TESIS DOCTORAL

***EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE REALIDAD AUMENTADA
MÓVIL EN ENTORNOS EDUCATIVOS DEL ÁMBITO DE LA
ARQUITECTURA Y LA EDIFICACIÓN***

Presentada por:

Alberto Sanchez Riera

Director:

Dr. Ernesto Redondo Domínguez

ABRIL 2013

A mis hijas,

Por su alegría e ingenuidad, y porque sin saberlo,
me han dado el apoyo suficiente para finalizar este trabajo.

AGRADECIMIENTOS





Al profesor Ernesto Redondo,

Director de esta tesis, por la oportunidad que me ha brindado al ofrecerme llevar a cabo esta investigación, por motivarme en la publicación de los contenidos que de ella se iban derivando, y sobre todo por sus consejos y ánimos que me han transmitido el rigor y la tranquilidad suficiente para finalizarla.

Al profesor Josep Roca Cladera,

Coordinador del programa en Gestión Y Valoración Urbana Y Arquitectónica, por introducirme en el mundo de la Realidad Aumentada, y proporcionarme la libertad de dirigir mi investigación hacia los aspectos que he considerado más relevantes dentro de este campo.

A todos los profesores del Departamento de Expresión Gráfica II, y en especial a los coordinadores de las asignaturas donde se han realizado los ensayos, Jacinto Bachs, Blanca Figueras, y Gustavo Gispert,

Por la confianza y la paciencia que me han mostrado.

A Fausto Terrado,

Estudiante del grado de Ingeniería informática, por sus aportaciones en materia de programación, y sin el que la aplicación desarrollada en el seno de esta tesis, no hubiera sido posible.

A mis familiares y amigos,

Especialmente a mis padres, por su paciencia y apoyo incondicional, y por su comprensión durante estos años.



INDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	1
INDICE DE CONTENIDOS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	19
LISTA DE ABREVIATURAS	23
RESUMEN DE LA TESIS.....	25
RESUM DE LA TESI.....	27
SUMMARY OF THE DOCTORAL THESIS	29
BLOQUE I. ASPECTOS TEÓRICOS.....	31
1 CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	33
1.1 PRESENTACIÓN.....	33
1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	41
1.3 CONTEXTO DE LA TESIS	47
1.3.1 CONTEXTO EDUCATIVO.....	49
1.3.2 CONTEXTO TECNOLÓGICO	56
1.4 LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN.....	60
1.5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA, PEDAGÓGICA Y DIDACTICA.....	67
1.5.1 MOTIVACIÓN Y TECNOLOGÍA.....	69
1.5.2 APRENDIZAJE EN ENTORNOS DE REALIDAD AUMENTADA	70
1.5.3 LOS NUEVOS ROLES DEL PROFESOR Y DEL ESTUDIANTE	74
1.6 OBJETIVOS Y RESULTADOS ESPERADOS.....	76
1.6.1 OBJETIVO PRINCIPAL.....	76
1.6.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS:.....	77

2	CAPITULO II. HIPÓTESIS, METODOLOGÍA, Y PLAN DE TRABAJO	79
2.1	INTRODUCCIÓN	79
2.2	HIPÓTESIS.....	82
2.3	PASOS COMUNES PARA LA IMPLANTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	84
2.4	EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD.....	86
2.4.1	MEDIDAS DE USABILIDAD.....	88
2.4.2	CUESTIONARIOS DE USABILIDAD	91
2.4.3	ANÁLISIS DE LOS CUESTIONARIOS DE USABILIDAD	94
2.5	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO	101
2.5.1	MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO.....	103
2.5.2	ANÁLISIS T-STUDENT.....	106
2.6	PLAN DE TRABAJO.....	111
3	CAPITULO III. MARCO GENERAL DE REALIDAD AUMENTADA	115
3.1	CONCEPTO	115
3.2	DEFINICIONES.....	118
3.3	SISTEMAS DE REALIDAD AUMENTADA	121
3.3.1	SISTEMAS SEE-THROUGH, Y PROYECTIVOS.....	121
3.3.2	SISTEMAS HMD, HHD Y ESPACIALES	124
3.3.3	SISTEMAS FIJOS O MÓVILES.....	126
3.3.4	OTRAS CLASIFICACIONES	130
3.3.5	CONCLUSIONES.....	137
3.4	RECORRIDO HISTÓRICO	139
3.4.1	ANTECEDENTES.....	139
3.4.2	PRINCIPALES HITOS RECIENTES.....	149
3.5	SOFTWARE	155
3.5.1	PRINCIPALES LIBRERÍAS Y SDK.....	156
3.5.2	APLICACIONES BASADAS EN EL RECONOCIMIENTO ÓPTICO DE IMÁGENES.....	161
3.5.3	SOFTWARE BASADO EN SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GPS	163

3.6	REALIDAD AUMENTADA EN EDUCACIÓN.....	167
BLOQUE II. ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....		175
RESUMEN.....		177
4	CAPITULO IV. EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA. LA TORRE DE GIRONELLA.	181
4.1	INTRODUCCION	181
4.2	PLANTEAMIENTO.....	182
4.3	REFERENTES	184
4.4	METODOLOGIA.....	188
4.4.1	Generación del entorno:.....	188
4.4.2	Criterios gráficos adoptados	190
4.4.3	La reconstrucción virtual de las hipótesis	192
4.5	ENSAYOS DE VISUALIZACIÓN MEDIANTE REALIDAD AUMENTADA.....	193
4.5.1	ENSAYOS MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE PATRONES PLANOS.....	193
4.5.2	ENSAYOS BASADOS EN EL RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES DEL ENTORNO REAL.....	195
4.6	CONCLUSIONES PRELIMINARES SOBRE LA VIABILIDAD DEL USO DE LA TECNOLOGÍA.....	199
5	CAPITULO V. ESTUDIOS EXPERIMENTALES MEDIANTE PLATAFORMAS EXISTENTES BASADAS EN REGISTRO OPTICO.....	203
5.1	INTRODUCCION	203
5.2	PRIMER ESTUDIO PRELIMINAR: WORKSHOP EUROPEO DE ESTUDIANTES TECNICOS. (BEST) 205	
5.2.1	PLANTEAMIENTO	206
5.2.2	MARCO EN EL QUE SE INSCRIBE EL ENSAYO	207
5.2.3	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	209
5.2.4	RESULTADOS OBTENIDOS	213
5.2.5	EVALUACION	216
5.2.6	CONCLUSIONES PRELIMINARES	219

5.3	SEGUNDO ESTUDIO PRELIMINAR. “EL ESPACIO AUMENTADO I”. CURSO PARA LA AMPLIACIÓN DE COMPETENCIAS EN DISEÑO INTERIOR. (DAC)	221
5.3.1	PLANTEAMIENTO	222
5.3.2	EL PROBLEMA A RESOLVER. LA ILUMINACIÓN DE LA ESCENA.....	224
5.3.3	MARCO EN EL QUE SE INSCRIBE EL ENSAYO	229
5.3.4	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	230
5.3.5	RESULTADOS OBTENIDOS	231
5.3.6	EVALUACION	233
5.3.7	CONCLUSIONES PRELIMINARES	237
5.4	TERCER ESTUDIO PRELIMINAR. “EL ESPACIO AUMENTADO II”. CURSO DE EXPRESIÓN GRÁFICA III. (EGIII)	239
5.4.1	PLANTEAMIENTO	240
5.4.2	MARCO EN EL QUE SE INSCRIBE EL ENSAYO	240
5.4.3	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	241
5.4.4	RESULTADOS OBTENIDOS	242
5.4.5	EVALUACION	243
5.4.6	CONCLUSIONES PRELIMINARES	247
6	CAPITULO VI. ESTUDIOS EXPERIMENTALES MEDIANTE PLATAFORMAS EXISTENTES BASADAS EN GEOLOCALIZACIÓN.	249
6.1	INTRODUCCIÓN	249
6.2	CREACIÓN DE CONTENIDOS EN UN NAVEGADOR DE REALIDAD AUMENTADA EXISTENTE BASADO EN REGISTRO GPS.....	250
6.2.1	FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN:.....	251
6.2.2	GENERACIÓN DEL CANAL DE INFORMACIÓN.....	252
6.2.3	CONFIGURACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	256
6.2.4	CREACIÓN DEL SERVICIO WEB	259
6.3	CUARTO ESTUDIO PRELIMINAR. “AUMENTADO EL ENTORNO” (TICS).....	262
6.3.1	PLANTEAMIENTO DEL EJERCICIO	263
6.3.2	MARCO EN EL QUE SE INSCRIBE EL ENSAYO	266
6.3.3	REFERENTES	270
6.3.4	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	276

6.3.5	RESULTADOS OBTENIDOS	281
6.3.6	EVALUACION	286
6.3.7	CONCLUSIONES PRELIMINARES	289
7	CAPITULO VII. EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGIA A TRAVES DE UNA APLICACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA PROPIA	291
7.1	DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA ORIENTADA A ENTORNOS EDUCATIVOS.....	291
7.1.1	INTRODUCCIÓN	291
7.1.2	JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN	292
7.1.3	MODELOS CONSULTADOS PARA EL DESARROLLO	293
7.1.4	ANALISIS DE REQUERIMIENTOS	297
7.1.5	ESPECIFICACIÓN	300
7.1.6	DISEÑO	303
7.1.7	IMPLEMENTACIÓN	305
7.1.8	CARGADOR DE MODELOS 3D.....	312
7.1.9	OPENGL	318
7.1.10	FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN.....	327
7.2	QUINTO CASO DE ESTUDIO: LA PLAZA PÚBLICA COMO AULA DIGITAL. (APF).....	335
7.2.1	PLANTEAMIENTO	336
7.2.2	MARCO EN EL QUE SE INSCRIBE EL ENSAYO	337
7.2.3	DESCRIPCION DEL ESTUDIO	342
7.2.4	EVALUACIÓN	349
7.2.5	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.....	359
7.3	SEXTO CASO DE ESTUDIO: PROCESOS DE CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO (PT II)	362
7.3.1	PLANTEAMIENTO	363
7.3.2	MARCO EN EL QUE SE INSCRIBE EL ENSAYO	367
7.3.3	DESCRIPCION DEL ESTUDIO	368
7.3.4	EVALUACIÓN	371
7.3.5	CONCLUSIONES PRELIMINARES	381
8	CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	383
8.1	EN RELACIÓN A LA USABILIDAD.....	383

8.1.1	RESULTADOS SOBRE EL NIVEL DE FORMACIÓN Y CONOCIMIENTO PREVIO	384
8.1.2	RESULTADOS SOBRE EL CURSO.....	386
8.1.3	SOBRE LA TECNOLOGIA Y EL SOFTWARE EMPLEADO	388
8.1.4	VARIABLES SIGNIFICATIVAS.....	390
8.1.5	INDICADORES DE CALIDAD.....	393
8.2	EN RELACIÓN A LA MEJORA EN EL RENDIMIENTO ACADÉMICO	403
8.3	RELACIONES ENTRE INDICADORES	405
9	CAPITULO IX. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	409
9.1	SOBRE EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN Y EL CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS.....	409
9.2	SOBRE LA EVALUACIÓN DE LOS CURSOS REALIZADOS.....	413
9.2.1	EN RELACIÓN A LA USABILIDAD DE LOS SISTEMAS EMPLEADOS.....	413
9.2.2	EN RELACIÓN A LA MEJORA EN EL RENDIMIENTO ACADÉMICO.....	414
9.3	SOBRE EL USO DE LA TECNOLOGIA EN ENTORNOS DOCENTES	416
9.4	DESARROLLOS FUTUROS.....	419
10	CAPITULO X. CONTRIBUCIONES APORTADAS.....	421
11	CAPITULO XI. DIFUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	423
11.1	ARTÍCULOS EN REVISTAS.....	423
11.2	TEXTOS EN ACTAS DE CONGRESO.....	424
11.3	CAPÍTULOS DE LIBRO	428
11.4	OTROS EVENTOS.....	429
11.5	TRABAJOS ACEPTADOS, PENDIENTES DE PUBLICACION (TEXTOS EN CONGRESOS)	429
12	BIBLIOGRAFÍA	431
ANEXO	467
A.1.	TABLAS DE RESULTADOS DE LOS CUESTIONARIOS DE USABILIDAD	469
A.2.	TABLAS DE RESULTADOS DEL CURSO PT_II.....	471

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Simulación del latido del corazón de un voluntario a partir de los datos reales extraídos mediante sensores. En Lamounier Jr. et al. (2010).....	34
Fig. 2 Secuencia de imágenes que muestran la localización de una pieza mediante RA. En S. Henderson & Steven Feiner (2011)	34
Fig. 3 Imágenes sobre el uso de la tecnología como guía de soporte en museos. En Tillon et al. (2011).....	35
Fig. 4. Usuario explorando el modelo virtual generado a partir del levantamiento de una porción real de excavación. En Benko et al. (2004).....	35
Fig. 5. Secuencia de imágenes mostrando la detección de puntos en el espacio y la superposición del modelo virtual en la escena. En J. R. Sánchez & Borro (2007).....	35
Fig. 6 Imágenes de aplicaciones en diseño interior. Izquierda: Oksman et al. (2012). Derecha: Nóbrega & Correia (2011)	35
Fig. 7 Ejemplo del uso de la tecnología en el aprendizaje de la escritura. En Shichinohe et al. (2011)	37
Fig. 8 Estudiantes utilizando una aplicación de RA para la mejora de sus habilidades espaciales. En Martin Gutierrez (2010, p 212).....	37
Fig. 9 Aplicación de la RA para el aprendizaje musical. En Peula Palacios et al. (2007)	38
Fig. 10 Esquema del contexto de la tesis	48
Fig. 11 Utilización de diferentes dispositivos para el consumo de contenidos (España). Fuente: Fundacion Telefonica (2012)	58
Fig. 12 Proceso común de evaluación de la usabilidad seguido en todos los cursos	85
Fig. 13 Esquema de los atributos que componen la aceptabilidad de un sistema. En J. Nielsen (1993).....	86
Fig. 14 Medidas de calidad de uso determinadas por el contexto. En Bevan (1995).....	87
Fig. 15 Ecuación para construir el indicador de calidad a partir de cada componente y sus “autovalores”. En W. S. Peters & Butler (1970)	100
Fig. 16 Ecuación el indicador de rendimiento a partir de las calificaciones de los estudiantes.....	103
Fig. 17 Esquema de la evaluación del rendimiento realizado en los cursos APF y PT_II	106
Fig. 18 Ejemplo de distribución T-Student.(dos colar). Zona de rechazo y zona de aceptación.	109
Fig. 19 Ejemplo grafico de los valores obtenidos.	109
Fig. 20 Representación simple del continuo de Milgram. Fuente: Milgram & Kishino (1994)	115
Fig. 21 Imágenes de ejemplos de los tipos de realidad a partir del continuo de Milgram. En Noh & Sunar (2009)	117
Fig. 22 Diagramas conceptuales de los sistemas OST (izquierda) y VST (derecha). En Azuma (1997)	122

Fig. 23 Representación esquemática del Sistema “ <i>monitor based</i> ”. En Azuma (1997).....	123
Fig. 24 Ejemplos de distintos sistemas en función de cómo se presenta la información en el visor. En (Krevelen & Poelman 2010).....	124
Fig. 25 Esquema de clasificación de los sistemas de RA en función de la posición del display respecto al usuario y al objeto real. En Bimber & Raskar (2006)	125
Fig. 26 Clasificación de los sistemas de RA de displays visuales, en función de la posición del display y de la tecnología empleada. En Krevelen & Poelman (2010)	126
Fig. 27 Ejemplos de sistemas de RA Espacial. Izquierda: Sukenobe et al. (2010); Centro Zhou et al. (2011); Derecha: Laviole & Hachet (2012)	127
Fig. 28 Imágenes de distinto dispositivos de mano (<i>hand held</i>). Izquierda: Fitzmaurice (1993). Centro: Chun & Höllerer (2013). Derecha: Uchida & Komuro (2013).....	130
Fig. 29 Sistemas basados en el reconocimiento óptico de imágenes. En Izquierda: Kaufmann & Dieter Schmalstieg 2002; Centro: Andersen et al. (2004); Derecha: Sanchez Riera et al. (2012a) .	132
Fig. 30 Fotogramas consecutivos para estimar la posición de la cámara. En Chia et al. (2002)	133
Fig. 31 Sistemas Indoor. Izquierda, Mulloni et al. (2011). Derecha: C. Kuo et al. (2012)	134
Fig. 32 Sistemas Outdoor. Izquierda: Avery et al. (2006); centro: Yetao et al. (2011); derecha: Kerr et al. (2011)	134
Fig. 33 Ejemplos de distintas configuraciones de sistemas ubicuos. Izquierda: Pasman et al. (2004); Centro: Hiyama et al. (2011); derecha: Billingham & Bruce H Thomas (2011).....	135
Fig. 34 Ejemplos de sistemas individuales de RA. Izquierda: Woods et al. (2004); Derecha: Grasset et al. (2007)	136
Fig. 35 Ejemplos de sistemas colaborativos presenciales. Izquierda: Kaufmann & Dieter Schmalstieg (2002); Broll et al. (2004); Knoerlein et al. (2007).....	136
Fig. 36 Ejemplos de sistemas colaborativos remotos. Izquierda: Bottecchia et al. (2010); Derecha: Le Ligeour et al. (2006).....	137
Fig. 37 Imágenes del primer Dispositivo tipo Cascos (HMD). En Sutherland (1968).....	141
Fig. 38 Imagen de la aplicación de la RA en un paciente, resolviendo parcialmente problemas de oclusión. En Bajura et al. (1992).	142
Fig. 39 Imágenes del prototipo “ <i>chameleon</i> ” basado en el uso de dispositivos de mano. (Hand-held). En Fitzmaurice (1993).....	142
Fig. 40 Imágenes del uso de la tecnología en tareas de mantenimiento. En Steven Feiner et al. (1993).....	142
Fig. 41 Visualización de los elementos estructurales de un edificio. En Steven Feiner et al. (1995)	143
Fig. 42 Aplicación de RA basada en el uso de las librerías ARTToolkit. En Prince et al. (2002).....	144
Fig. 43 Incorporación de información digital a los objetos. En Rekimoto et al. (1998).....	144
Fig. 44 “The virtual Showcase” en Bimber et al. (2001).....	146

Fig. 45 Vector de dirección usado por Newman para el renderizado de la información enviada por el sistema “sensible”. En Joseph Newman et al. (2001)	147
Fig. 46 Imágenes del primer navegador de RA. MARA. En http://research.nokia.com/page/219 . Febrero 2012.	148
Fig. 47 Imágenes de la superposición de un objeto virtual a partir del mapeado del entorno. En Klein & D. Murray (2007)	150
Fig. 48 Imágenes de las primeras campañas publicitarias que hacen uso de la tecnología de RA. En http://nuevosmediosytelematica.bligoo.com/realidad-aumentada-y-comunicacion (Febrero 2013)	151
Fig. 49 Imágenes de nuevos prototipos tipo HMD. En www.vuzix.com	154
Fig. 50 Ejemplo de marcadores utilizados en las librerías ArToolkit (izquierda) y Artag (derecha). En Fiala (2005).....	157
Fig. 51 Aplicaciones de las librerías Osgart con alta calidad de imagen. En Raphaël Grasset et al. (2005).....	158
Fig. 52 Dispositivos de mano (hand-held) UMPC, PDA y Smartphone, que utilizan las librerías ARToolkitPlus. UMPC En D. Wagner & Dieter Schmalstieg (2007).....	159
Fig. 53 Secuencia de detección de una imagen en distintas posiciones, condiciones de iluminación y parcialmente ocultada. En V. Lepetit et al. (2005).....	161
Fig. 54 Imágenes de BuildAr i Mr Planet.Fuente: Elaboración propia	162
Fig. 55 Esquema del interface común entre los principales navegadores de RA. En http://www.treearrow.com/adblog/wp-content/uploads/2011/10/arbrowserscheme.png	164
Fig. 56 Principales navegadores de Realidad Aumentada	164
Fig. 57 Imágenes de alumnos en el entreno de sus habilidades espaciales mediante Construct 3D. En Dünser et al. (2006b).....	168
Fig. 58 Alumnos interactuando con el sistema propuesto. En Kaufmann & B. Meyer (2008).....	169
Fig. 59 Representación en el aula mediante marcadores de la estructura en 3D de una molécula. En (Patrick et al. 2009)	169
Fig. 60 Conjunto de herramientas utilizadas en la aplicación AR-Dehaes. En (Martín Gutiérrez et al. 2010)	170
Fig. 61 Ejemplo de sistema de aprendizaje en tareas de reparación y mantenimiento Mediante RA. En Henderson & Steven Feiner (2011).....	170
Fig. 62 Sistema de Visualización de una máquina de anestesia, propuesto por Quarles et al. 2009 en procesos de aprendizaje en el campo de la medicina.	171
Fig. 63 operarios de los servicios de rescate en una práctica de un ejercicio donde se requiere coordinación y colaboración entre los distintos equipos. En Nilsson et al. (2011)	171
Fig. 64 Sistema de RA para el estudio de urbanismo y planificación territorial propuesto en Chen & Wang, 2008	172
Fig. 65 Imágenes de ejemplo del uso de libros en educación. Izquierda: Billingham et al. (2001). Centro: A. Clark et al. 2011. Derecha: Dünser et al. (2012)	173

Fig. 66 Imagen de la iglesia de San Salvador. Ename, Belgica. En Pletinckx et al. (2000).....	184
Fig. 67 Reconstrucción de la iglesia de Sta. margarita mediante técnicas de RA. En http://www.ife.no/en/ife/departments/software-engineering/products/arsubmeny/news.....	186
Fig. 68 Reconstrucción virtual del proyecto ARCHEOGUIDE en la antigua Olimpia. En Vlahakis et al. (2002).....	187
Fig. 69 Mapa de situación diseñado para la fortaleza ibérica de Els Vilars. En ALONSO et al. (2001)	187
Fig. 70 Diversas imágenes utilizadas para la generación de las reconstrucciones virtuales en el estudio de viabilidad de la tecnología.	188
Fig. 71 Levantamiento del lugar mediante laser escáner. Realizado por el LMVC.....	188
Fig. 72 Perspectiva del levantamiento realizado con Laser Escáner Una vez aplicada la textura a partir de una fotografía.....	189
Fig. 73 Imágenes de la malla de entorno utilizada para acompañar al modelo virtual	190
Fig. 74 Obtención de la textura de mampostería Opus Quadratum. (Bajo imperio) y de la textura de mampostería opus vittatum. (Época republicana)	191
Fig. 75 Levantamiento geométrico de las torres de acuerdo con las hipótesis de los investigadores	192
Fig. 76 Imágenes de las reconstrucciones virtuales definitivas correspondientes a distintas hipótesis de los historiadores. Elaboración propia mediante 3dsMax, V2009.	193
Fig. 77 Imágenes de los ensayos de visualización en espacios interiores utilizando BuidAR y Mr Planet. Fuente: Elaboración propia.	194
Fig. 78 Estudio y visualización de diversas hipótesis de reconstrucción en el lugar. Fuente elaboración propia.....	195
Fig. 79 Ejemplo de visualización, mediante un dispositivo móvil, de un modelo 3D aleatorio en un edificio real utilizando la imagen del propio edificio como marcador de posición. Fuente: elaboración propia.....	196
Fig. 80 Imagen de la página web utilizada para la creación de los canales y superposición del modelo a un entorno real utilizando imágenes reales como marcador	197
Fig. 81 Imagen de referencia que una vez reconocida descarga el video explicativo en el dispositivo móvil, y diversos puntos de visualización del modelo en su entorno mediante JUNAI0.	198
Fig. 82 Mapa con la ubicación de los grupos locales de la plataforma BEST	208
Fig. 83 Imágenes del planteamiento del primer ejercicio (BEST). “Escena colaborativa”	210
Fig. 84 Imágenes del planteamiento del segundo ejercicio (BEST). Superposición de información virtual en el entorno real.	211
Fig. 85 Imágenes del planteamiento del Tercer ejercicio (BEST). Superposición de información virtual en espacios exteriores Utilizando como marcadores la propia fachada del edificio.....	212
Fig. 86 Ejemplos de visualización de la escena colaborativa del ejercicio 1. Utilizando propuestas generadas por los alumnos durante el curso.	213

Fig. 87 Imágenes del curso BEST, que muestran el resultado de superponer propuestas de intervención en un espacio real de la escuela.....	214
Fig. 88 Imágenes del curso BEST, resultado de superponer información técnica en el entorno. Ejemplos de visualización de las propuestas en el espacio interior de la escuela.	214
Fig. 89 Imágenes del tercer ejercicio planteado. Visualización de los modelos virtuales utilizando como marcador la fachada del propio edificio de la EPSEB, y mediante dispositivos móviles.	215
Fig. 90 Ejemplo de Mapas de texturas para la incorporación de sombras en el espacio real. A la base del modelo se le asigna un mapa de luces, como textura principal, y como mapa de transparencia su inverso.	223
Fig. 91 Imágenes del planteamiento del ejercicio de "representación virtual del proyecto interior". (DAC)	223
Fig. 92 Objetos virtuales inmersos lumínicamente en la escena generada a partir de una fotografía. En Cook et al. (2003)	226
Fig. 93 Entono de trabajo que realiza el seguimiento (tracking) de la cabeza mano y lámpara (izquierda). Reflexiones y sombras en el objeto virtual desde el punto de vista del usuario (derecha). En Steinicke et al. (2005)	227
Fig. 94 Resultados de I. Sato et al. (1999). Las imágenes de la izquierda muestran la escena original. Las imágenes de la derecha muestran las sombras producidas por los objetos virtuales integrados en la escena. En Jacobs & Loscos (2006)	228
Fig. 95 Seis pasos consecutivos que muestran en detalle el proceso de integración lumínica en la escena.	231
Fig. 96 Ejemplos de visualización de las propuestas de intervención realizada por los alumnos...	232
Fig. 97 Ejemplos de propuestas integradas lumínicamente	233
Fig. 98 Imágenes del planteamiento del ejercicio EG III. Superposición de información técnica en el entorno.	241
Fig. 99 Escenas de ejemplo utilizadas en el periodo de formación del curso EG III. Mediante dispositivos móviles. Fuente: Elaboración propia.	242
Fig. 100 Ejemplos de visualización de las propuestas realizadas por los alumnos durante el curso.	243
Fig. 101 Esquema de funcionamiento de la aplicación Layar. En www.layar.com (Septiembre 2012)	251
Fig. 102 Acceso al panel de control de la cuenta particular de desarrollador.	252
Fig. 103 Diferentes menús que permiten personalizar el canal de información a través de la página web de layar.	253
Fig. 104 Filtros utilizados en la creación del canal de información en la aplicación Layar.	254
Fig. 105 imágenes desde el dispositivo móvil del canal de información creado. Izquierda: selección de filtros. Derecha: información general sobre el canal público creado.	255
Fig. 106 Ejemplo de modelos virtuales superpuestos en un entorno real sobre modelos existentes.	265

Fig. 107 Principales infraestructuras arquitectónicas previstas para el campus BKC.....	269
Fig. 108 Ejemplos de aplicaciones que vinculan contenidos multimedia a bases de datos. Izquierda: Okamoto et al. (2008). Derecha: Martin Pastor et al. (2005)	272
Fig. 109 Diversas imágenes que muestran el interface del sistema de AR y la superposición de modelos de edificios en su entorno real. En Allen et al. (2011).....	273
Fig. 110 <i>Tinmith-Metro</i> : Imágenes de implementación del sistema de captura y visualización de modelos urbanos existentes. En Piekarski & Thomas (2001).....	274
Fig. 111 Imágenes de implantación del sistema de RA Urban Sketcher. En Sareika & Schmalstieg (2007).....	274
Fig. 112 Sistema de soporte para la gestión y el mantenimiento de instalaciones e infraestructuras urbanas. En Schall et al. (2008)	275
Fig. 113 Entorno del BKC con la codificación de los modelos que los alumnos debían emplear....	277
Fig. 114 Vista de los cuatro apartados en que se divide el convertidor de modelos de Layar	278
Fig. 115 Ejemplo de visualización y obtención de coordenadas mediante el aplicativo Model Converter	278
Fig. 116 Instalación de la aplicación y acceso al canal de información para la realización del ejercicio.....	279
Fig. 117 Menú de información al canal de contenidos y selección de filtros. En el ejemplo el rango escogido es de 20Km, y se pretende visualizar edificios nuevos (propuestas de los alumnos) del grupo B.	280
Fig. 118 Visualización de contenidos “in situ” y respuestas al cuestionario planteado.	280
Fig. 119 Alumnos modelando sus propuestas en el aula en el curso de TICs (layar).	281
Fig. 120 Resultados de las propuestas arquitectónicas modeladas por los alumnos en el formato de importación a la base de datos. En el curso TICs (layar).....	281
Fig. 121 Imágenes de alumnos visualizando sus propuestas “in situ” (izquierda). Y resultados de los modelos superpuestos en el lugar. (derecha). En el curso TICs (layar)	284
Fig. 122 Cuestionario de valoración de las propuestas realizadas por los alumnos. Disponible en: https://docs.google.com/spreadsheet/viewform?formkey=dEFBVnNzZE9aLWNwaFhualV1T2V5T2c6MA#gid=0	285
Fig. 123 Ejemplo de visualización mediante RA de contenidos multimedia realizado por alumnos en el proyecto CONNECT. En (S. Sotiriou et al. 2006).....	293
Fig. 124 Imagen mostrando la ubicación de un determinado contenido en el modelo virtual de la biblioteca. En C.-M. Chen & Y.-N. Tsai (2012)	294
Fig. 125 Distintas imágenes del sistema ARSC en entornos educativos. En El Sayed et al. (2011) .	295
Fig. 126 Ejemplo de Imagen superpuesta en un ipad, donde se destaca la información relevante de la escena, mientras distorsiona los elementos secundarios. En McNamara (2011)	296
Fig. 127 Ilustración conceptual de la plataforma de ARblock. En Roberto et al. (2011)	296
Fig. 128 Diagrama Entidad-Relación de la aplicación.	299

Fig. 129 Diagrama de clases de la aplicación U_AR. (fase de especificación)	302
Fig. 130 Diagrama de clases. Capa de Presentación.....	304
Fig. 131 Diagrama de clases. Capa de Dominio.....	304
Fig. 132 Diagrama de la Capa de Datos de la aplicación.....	304
Fig. 133 Diagrama de módulos de QUALCOMM Augmented Reality SDK. Disponible en: http://www.treearrow.com/adblog/2011/10/26/qualcomm-augmented-reality-sdk/	306
Fig. 134 Esquema general de la arquitectura de QCAR.	307
Fig. 135 Ejemplo de definición de coordenada de textura utilizada en el formato OBJ.....	314
Fig. 136 Esquema simplificado del proceso de conversión en pixeles de OpenGL. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Pipeline_OpenGL_%28es%29.png	318
Fig. 137 Transformaciones geométricas	319
Fig. 138 Ejemplo de iluminación de una esfera a través de OpenGL	320
Fig. 139 Esquema del ámbito de corte desde el punto de vista de un observador	320
Fig. 140 Ejemplo de visualización de objetos a distintas distancias	321
Fig. 141 Ejemplo del uso de blending	322
Fig. 142 Tipos de primitivas definidas por la función glBegin	323
Fig. 143 Resultado del código introducido.....	324
Fig. 144 Ejemplo del uso de <i>occluders</i> (plano azul) en una escena. En (Sanchez Riera et al. 2012b)	325
Fig. 145 Vista general del gestor de contenidos.....	328
Fig. 146 Vista del logotipo, instalación y visualización en el dispositivo de la aplicación.....	329
Fig. 147 Diferentes modelos de un mismo canal visualizados con el mismo marcador.....	330
Fig. 148 Secuencia de imágenes que muestran el modelo original (A), el escalado del modelo (B) y su posicionamiento (C).....	330
Fig. 149 Ejemplo de visualización de un mismo modelo una vez escalado	331
Fig. 150 Estructura de ejemplo de un fichero XML que resume la estructura de cada canal de información.	333
Fig. 151 Ejemplo de Carga y Visualización del canal de información generado en el aula	334
Fig. 152 Imágenes sobre el entorno donde se realiza la primera experiencia de evaluación de la aplicación propia. Plaza Flassaders.....	338
Fig. 153 Ejemplos de modelos escultóricos curso 2010-2011 con esculturas de tamaño excesivo, proyectos que saturan el espacio y propuestas minimalistas.....	341
Fig. 154 Ejemplos de procesos del curso APF. Superior: generación de esculturas. Inferior: Escena urbana y primeras propuestas de intervención (PRE-TEST).....	343
Fig. 155 Imágenes de las propuestas realizadas por los alumnos, visualizadas “in situ” mediante sus dispositivos móviles.	345

Fig. 156 Imágenes de las propuestas finales una vez reformuladas las propuestas.	347
Fig. 157 Imágenes de muestra en la plaza del primer modelo realizado por los alumnos.	347
Fig. 158 Imágenes de muestra en la plaza del segundo modelo realizado por los alumnos.	348
Fig. 159 Imágenes de muestra en la plaza del tercer modelo realizado por los alumnos.	348
Fig. 160 Ejemplos de los trabajos finales llevados a cabo por los alumnos que participaron en los grupos experimentales y que denotan la mejor adecuación de sus propuestas a la escala de lugar.	360
Fig. 161 modelos3D que muestran el proceso constructivo seguido en un apeo mediante un terminal móvil. Contenido distribuido a los alumnos en el curso de PT II.....	364
Fig. 162 Esquema de la evaluación de la mejora en el rendimiento académico de los alumnos y la usabilidad del sistema en el curso de PT II.....	365
Fig. 163 Realización del PRE-TEST en el curso de PT II.....	369
Fig. 164 Imágenes de alumnos del grupo experimental ubicando el lugar de visualización del proceso constructivo del curso de PT II	369
Fig. 165 Izquierda: alumnos situando el marcador en distintas localizaciones fuera del aula. Derecha: Vista del proceso constructivo superpuesto en el lugar durante el curso de PT II, mediante un dispositivo móvil.	370
Fig. 166 Resumen de las calificaciones y la ganancia obtenida en las calificaciones del curso PT II	378
Fig. 167 Resultados PRE y POST por grupos del curso PT II	380
Fig. 168 Resultados de los cursos realizados en relación a la formación personal y nivel de conocimiento previo de la tecnología.....	385
Fig. 169 Resultados obtenidos por cursos en relación al contenido y material utilizado.....	387
Fig. 170 Resultados obtenidos por cursos en relación a la tecnología y el software utilizado	389
Fig. 171 Resultados medios de los cursos realizados en relación a la eficacia, eficiencia y grado de satisfacción alcanzado.....	394

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estructura de los cuestionarios de usabilidad utilizados en los cursos	93
Tabla 2 Matriz de componentes principales rotada (varimax) y normalizada sobre las cuestiones relacionadas con la Eficiencia de los cursos realizados.	98
Tabla 3 Autovalor y Porcentaje de varianza explicada de cada uno de los factores principales del indicador de Eficiencia.	98
Tabla 4 Matriz de componentes principales rotada (varimax) y normalizada sobre las cuestiones relacionadas con la Eficacia de los cursos realizados.	99
Tabla 5 Autovalor y Porcentaje de varianza explicada de cada uno de los factores principales del indicador de Eficacia	99
Tabla 6 Valor T obtenido para 24 grados de libertad y una probabilidad del 5%	108
Tabla 7 clasificación de los ensayos realizados	138
Tabla 8. Resumen de los estudios experimentales realizados	179
Tabla 9 Esquema DAFO sobre el estudio de viabilidad efectuado en relación a la tecnología RA .	201
Tabla 10 Resumen de estudio preliminares realizados mediante Software y plataformas existentes basadas en registro óptico	204
Tabla 11 Resultados del curso BEST en relación a la formación personal y nivel de conocimiento previo	216
Tabla 12 Resultados del curso BEST en relación a los contenidos docentes y material del curso..	217
Tabla 13 Resultados obtenidos en el curso BEST en relación a la tecnología y el software utilizado	218
Tabla 14 Resultados del curso DAC en relación a la formación personal y nivel de conocimiento previo	234
Tabla 15 Resultados del curso DAC en relación a los contenidos docentes y material del curso...	235
Tabla 16 Resultados obtenidos en el curso DAC en relación a la tecnología y el software utilizado	236
Tabla 17 Resultados del curso EG III en relación a la formación personal y nivel de conocimiento previo	244
Tabla 18 Resultados del curso EG III en relación a los contenidos docentes y material del curso .	245
Tabla 19 Resultados obtenidos en el curso DAC en relación a la tecnología y el software utilizado	246
Tabla 20 Comparativa entre los principales navegadores de RA en Google Play. Datos recogidos en Noviembre de 2012.	249
Tabla 21 Campos a completar en la creación de un canal de información.	252
Tabla 22 Estructura de la primera tabla de la base de datos. POI_Table	256
Tabla 23 Estructura de la segunda tabla de la base de datos. ACTION_Table	257

Tabla 24	Estructura de la primera tabla de la base de datos OBJECT_Table.....	258
Tabla 25	Estructura de la base de datos. TRANSFORM_Table.....	258
Tabla 26	Resumen de los contenidos de la tabla POI_Table que alimenta el canal de información.	282
Tabla 27	Resumen de los contenidos de las tablas OBJECT_Table i TRANSFORM_Table de la base de datos que alimenta el canal de información	283
Tabla 28	Resultados del curso Layar en relación a la formación personal y nivel de conocimiento previo	286
Tabla 29	Resultados del curso Layar en relación a los contenidos docentes y material del curso.	287
Tabla 30	Resultados obtenidos en el curso Layar en relación a la tecnología y el software utilizado	288
Tabla 31	Curso típico de eventos de creación de un canal:.....	300
Tabla 32	Curso típico de eventos para listar un canal	301
Tabla 33	Curso típico de eventos para la carga de un canal	301
Tabla 34	Ejemplo de estructura de un fichero en formato *.obj	313
Tabla 35	Ejemplo de estructura de un fichero en formato *.mtl.....	316
Tabla 36	Código ejemplo en OpenGL para el renderizado de una primitiva de cuatro vértices.	323
Tabla 37	secuencia de pasos a seguir en OpenGL.....	326
Tabla 38	Resultados del curso APF en relación a la formación personal y nivel de conocimiento previo	350
Tabla 39	Resultados del curso APF en relación a los contenidos docentes y material del curso ...	351
Tabla 40	Resultados obtenidos del curso APF en relación a la tecnología el software utilizado....	352
Tabla 41	Resultados obtenidos de las calificaciones PRE-TEST por grupos	353
Tabla 42	Análisis Anova para la verificación de la equivalencia de los grupos.	354
Tabla 43	Resultado PRE y POST por grupos y ganancia obtenida.	355
Tabla 44	Resultados de la comparación de los valores medios obtenidos en las calificaciones PRE y POST mediante el análisis T-Student para Series pareadas.	355
Tabla 45	Análisis T-Student entre los grupos No_AR y los para la calificación POST	356
Tabla 46	Análisis T-Student entre los grupos No_AR y Android para la calificación POST	357
Tabla 47	Análisis T-Student entre los grupos los y Android para la calificación POST	358
Tabla 48	Composición de los grupos en el curso de PT II	368
Tabla 49	Resultados del curso PT II en relación a la formación personal y nivel de conocimiento previo	372
Tabla 50	Resultados del curso PT II en relación a los contenidos docentes y material del curso...373	
Tabla 51	Resultados obtenidos del curso PT II en relación a la tecnología el software utilizado ..374	

Tabla 52 Valores medios de las calificaciones del PRE-TEST por grupos	375
Tabla 53 Análisis T-Student entre el grupo experimental y de control para la calificación PRE del curso PT II	376
Tabla 54 Resultados PRE y POST y la ganancia obtenida por grupos en el curso PT II	377
Tabla 55 Resultados de la comparación de los valores medios obtenidos en las calificaciones PRE y POST mediante el análisis T-Student para Series pareadas. Curso PT II	378
Tabla 56 Análisis T-Student entre grupo experimental y de control para la calificación POST del curso PT II	379
Tabla 57 Análisis ANOVA entre los cuatro grupos del curso PT II	380
Tabla 58 correlaciones existentes entre la opinión global y el resto de variables relacionadas con el curso (material, contenidos, ejercicios, etc..)	390
Tabla 59 correlaciones existentes entre la opinión global y el resto de variables relacionadas con la tecnología.....	391
Tabla 60 Valores máximos, mínimos e intermedios, de las repuestas sobre el nivel de formación	395
Tabla 61 Modelo de regresión lineal a partir de las variables del nivel de formación	396
Tabla 62 Valores máximos, mínimos e intermedios, de repuestas relacionadas con la eficiencia	397
Tabla 63 Valores máximos, mínimos e intermedios, de repuestas relacionadas con la eficacia....	398
Tabla 64 Modelo de regresión lineal a partir de las variables que forman el índice de eficacia	399
Tabla 65 Valores máximos, mínimos e intermedios, respuestas relacionadas con la satisfacción.....	399
Tabla 66 Modelo de regresión lineal a partir de variables que forman el índice de satisfacción... ..	400
Tabla 67 Valores máximos, mínimos y intermedios, del indicador de usabilidad	400
Tabla 68 resultados de cinco alumnos relacionando la media de las respuestas con sus calificaciones de usabilidad.....	401
Tabla 69 Ganancia obtenida entre grupos de control y experimental en los cursos APF y PT II	403
Tabla 70 Correlaciones entre los índices de rendimiento, usabilidad y otras variables.....	405
Tabla 71 Tabla resumen de las calificaciones entre rendimiento y usabilidad del sistema.	406



LISTA DE ABREVIATURAS

APF: Aplicaciones Informáticas

ACP: Análisis de Componentes Principales

BEST: (*Board of European Students of Technology*) Plataforma de estudiantes europeos de tecnología

DAC: Diploma de Ampliación de Competencias

EEES: Espacio Europeo de Educación Superior

EPSEB: Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona

ETSAB: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona

EGIII: Expresión Gráfica III

GPL: Licencia Pública General (*General Public License*)

HMD: (*Head Mounted Display*) Dispositivo acoplado en la cabeza

PT II: Proyectos Técnicos II

RA: Realidad Aumentada

RV: Realidad Virtual



RESUMEN DE LA TESIS

La presente tesis doctoral pretende abordar la implantación de la tecnología de Realidad Aumentada (RA) en un contexto docente mediante el uso de dispositivos móviles (*hand held*). Se han utilizado para ello ordenadores portátiles, tabletas y teléfonos de última generación bajo los dos sistemas operativos más comunes (iOS y Android). Desarrollando específicamente contenidos y metodologías de evaluación en el campo de la arquitectura y la ingeniería de la edificación, donde esta tecnología, relativamente reciente, y basada fundamentalmente en la superposición de información a un objeto o un entorno real, ofrece ventajas potenciales en el proceso de formación de futuros profesionales en este campo. Con este propósito se abordan:

- Los fundamentos teóricos que se han considerado relevantes para el entendimiento y funcionamiento de la tecnología.
- La implantación de nuevas metodologías docentes en contextos educativos, basadas en la tecnología de RA y el aprendizaje mediante dispositivos móviles. Implicando a los estudiantes en la generación de contenidos virtuales utilizando distintas aplicaciones de Realidad Aumentada existentes y una de desarrollo propio.
- La evaluación del grado de satisfacción alcanzado, así como la eficiencia y eficacia de los cursos realizados. Conceptos todos ellos relacionados con la usabilidad.
- La mejora en el rendimiento académico de los alumnos.

El trabajo se ha estructurado en dos bloques: en el primero se detalla la fundamentación pedagógica y didáctica que ha motivado la redacción de esta tesis, para continuar con la descripción de la metodología empleada en la evaluación de los cursos realizados. Finalmente, en este bloque, se establece un marco general de la tecnología, explorando distintos factores de carácter teórico que se han considerado relevantes, y que van desde la definición del concepto hasta el estado actual de los sistemas y software empleados en distintos campos; en el segundo bloque, que constituye la parte práctica de esta tesis, se

aborda, a través de distintos ensayos, la implantación de la tecnología de RA en entornos docentes. Se utilizan para ello los dos sistemas más habituales en dispositivos móviles y que son: los que basan el registro de información virtual a partir del reconocimiento óptico de imágenes; y los basados en el posicionamiento a través de GPS.

En relación a la evaluación de la tecnología se distinguen dos líneas de actuación consecutivas en el tiempo:

La evaluación de la usabilidad de los sistemas empleados, de acuerdo a la norma ISO 9241-11. Así, a partir de las respuestas a 127 cuestionarios específicos, se construyen indicadores mediante técnicas de análisis multivariante, que ilustran la situación de cada alumno por comparación con el resto, y que representan una aproximación útil al estudio de la misma, ayudando a la obtención de conclusiones de forma más objetiva.

La evaluación del rendimiento académico, que se realiza en los dos últimos cursos. Divididos en grupo experimental y grupo de control, y a partir de las calificaciones PRE-TEST y POS-TEST, se evalúan un total de 171 alumnos de los que 55 forman los dos grupos experimentales. Al tratarse de muestras reducidas, se utilizan el procedimiento estadístico conocido como t de *Student*. El valor de p o la significación estadística devuelta, nos permite establecer las probabilidades de que los grupos sean coincidentes o no en sus calificaciones antes y después de los entrenamientos.

Las experiencias docentes descritas y los resultados extraídos de los cuestionarios planteados, permiten verificar la viabilidad del uso de esta tecnología los campos mencionados. Ya sea como herramienta alternativa o complementaria a las metodologías tradicionales, y donde el estudiante se implica y participa dinámicamente de su propio proceso de aprendizaje. De igual modo, los resultados reflejan un sensible aumento en el rendimiento global de los alumnos que realizan los cursos experimentales, en contraste con los alumnos que forman los grupos de control y que no utilizan la tecnología. Finalmente, este documento plantea el desarrollo de trabajos futuros, como son las futuras mejoras de la aplicación desarrollada, y el uso de la de la tecnología enfocada a tareas de rehabilitación y mantenimiento en edificios

RESUM DE LA TESI

La present tesis doctoral tracta de abordar la implantació de la tecnologia de Realitat Augmentada en un context docent, mitjançant l'ús de dispositius mòbils (*hand Held*). S'han utilitzat ordinadors portàtils, tauletes, i telèfons de última generació sota els dos sistemes operatius més comuns (iOS i Android). Per això s'han desenvolupat específicament continguts i metodologies d'avaluació en el camp de l'Arquitectura i la enginyeria de l'edificació, a on aquesta tecnologia, relativament recent, i basada fonamentalment en la superposició de informació virtual a un objecte o entorn real, ofereix avantatges potencials en els processos de formació de futurs professionals del sector. Amb aquest propòsit, s'aborden:

- Els fonaments teòrics que s'han considerat rellevants per a l'enteniment i funcionament de la tecnologia.
- La implantació de noves metodologies docents en contextos educatius, basades en la tecnologia de RA i l'aprenentatge mitjançant dispositius mòbils. Implicant als estudiants en la generació de continguts virtuals utilitzant diferents aplicacions de Realitat Augmentada existents i una de desenvolupament propi.
- L'avaluació del grau de satisfacció assolit, així com l'eficiència i eficàcia dels cursos realitzats. Conceptes tots ells relacionats amb la usabilitat.
- La millora en el rendiment acadèmic dels alumnes.

El treball s'ha estructurat en dos blocs: en el primer es detalla la fonamentació pedagògica i didàctica que ha motivat la redacció d'aquesta tesi, per continuar amb la descripció de la metodologia emprada en l'avaluació dels cursos realitzats. Finalment, en aquest bloc, s'estableix un marc general de la tecnologia, explorant diferents factors de caràcter teòric que s'han considerat rellevants, i que van des de la definició del concepte fins a l'estat actual dels sistemes i programes emprats en diferents camps; en el segon bloc, que constitueix la part pràctica d'aquesta tesi, s'aborda, a través de diferents assajos, la implantació de la tecnologia de RA en entorns docents. S'utilitzen per a això els dos sistemes més habituals en dispositius mòbils i que són: els que basen el registre

d'informació virtual a partir del reconeixement òptic d'imatges, i els basats en el posicionament per GPS.

En relació a l'avaluació de la tecnologia es distingeixen dues línies d'actuació consecutives en el temps:

L'avaluació de la usabilitat dels sistemes empleats, d'acord amb la norma ISO 9241-11. Així, a partir de les respostes a 127 qüestionaris específics, es construeixen indicadors mitjançant tècniques d'anàlisi multivariant, que il·lustren la situació de cada alumne per comparació amb la resta, i que representen una aproximació útil a l'estudi d'aquesta, ajudant a l'obtenció de conclusions de forma més objectiva.

L'avaluació del rendiment acadèmic, que es realitza en els dos últims cursos. Dividits en grup experimental i grup de control, i a partir de les qualificacions PRE-TEST i POS-TEST, s'avaluen un total de 171 alumnes dels quals 55 formen els dos grups experimentals. Al tractar-se de mostres reduïdes, s'utilitza el procediment estadístic conegut com *t de Student*. El valor de *p*, o la significació estadística tornada, ens permet establir les probabilitats que els grups siguin coincidents o no en les seves qualificacions, abans i després dels entrenaments.

Les experiències docents descrites i els resultats extrets dels qüestionaris plantejats, permeten verificar la viabilitat de l'ús d'aquesta tecnologia als camps esmentats. Ja sigui com a eina alternativa o complementària a les metodologies tradicionals, i on l'estudiant s'implica i participa dinàmicament del seu propi procés d'aprenentatge. De la mateixa manera, els resultats reflecteixen un sensible augment en el rendiment global dels alumnes que realitzen els cursos experimentals, en contrast amb els alumnes que formen els grups de control i que no utilitzen la tecnologia.

Finalment, aquest document planteja el desenvolupament de treballs futurs, com són les futures millores de l'aplicació desenvolupada, i l'ús de la de la tecnologia enfocada a tasques de rehabilitació i manteniment en edificis

SUMMARY OF THE DOCTORAL THESIS

This thesis aims to address the implementation of Augmented Reality (AR) technology in a teaching context by using mobile devices (hand held). Laptops, tablets and mobile devices were used with the two most common operating systems (IOS and Android). Specifics contents and evaluation methodologies have been developed in the field of architecture and building engineering, where this technology which is relatively recent, and mainly based on overlapping information to an object or a real environment, offers potential advantages in the training processes of future professionals in this field. With this purpose, the following issues have been addressed:

- Those theoretical foundations considered relevant for the understanding and operation of the technology.
- The introduction of new teaching methods through mobile devices, based on AR technology in educational contexts. Involving students in the creation of virtual content using various existing Augmented Reality applications and an application own developed.
- The evaluation of the degree of satisfaction, efficiency and effectiveness of the courses. All these concepts linked to usability.
- The improvement of students' academic performance.

The essay has been structured in two blocks: The first one starts by specifying the pedagogical and educational foundation that has motivated this thesis. It then goes on to describe the methodology used in the evaluation of the courses. And finally, still in this block, a general framework of technology is established. It explores various theoretical keys that have been considered relevant, ranging from the definition of the AR concept to the current state of systems and software used in various fields. The second block, which constitutes the practical part of this thesis, addresses the implementation of AR technology in learning environments through different case studies. To this end the two most common systems in mobile devices have been used: Optical recognition and GPS based.

In regard to the evaluation of the technology there are two consecutive lines:

Systems usability assessment, according to ISO 9241-11. Thus, from the responses to 127 specific questionnaires, indicators are constructed using multivariate analysis techniques, which illustrate the situation of each student by comparison with the rest. It allowed a useful approach to the study and it helped to obtain more objective conclusions.

For the evaluation of academic performance, held in the last two courses, students were divided into experimental and control groups. Assessment was carried out from PRE-TEST and POST-TEST scores. In total, 171 students (55 from the two experimental groups) were evaluated. Due to the reduced samples a statistical procedure was used based on the Student's t distribution. Through the p value (statistical significance) returned, we established the likelihood of group's scores being coincident or not before and after workouts.

The teaching experiences described and the results extracted from the questionnaires allowed to verify the feasibility of using this technology in the fields mentioned. Either as an alternative tool or complementary to traditional methodologies, and where students get involved and participate dynamically in their own learning process. In addition, results reflect a significant improvement in the overall performance of students from experimental courses compared to students from the control groups, who did not use the technology.

Finally, this paper puts forward the development of future work, such as future improvements of the application developed and the use of this technology aimed at the rehabilitation and maintenance of buildings.

BLOQUE I. ASPECTOS TEÓRICOS





1 CAPITULO I. INTRODUCCION

1.1 PRESENTACION

La tecnología de Realidad Aumentada (RA), basada fundamentalmente en la superposición de información virtual a un objeto o un entorno real, permite, que mediante la selección y un correcto registro de imágenes, sea posible añadir capas de información virtual a la realidad de un objeto, un emplazamiento, o un paisaje, con el objetivo de explicar una intención, una hipótesis, o explicar un hecho dotándolo de mayor veracidad, en tanto que el usuario percibe esta información en el mismo lugar en que se encuentra.

Pero más allá de la mera superposición de un modelo virtual en un entorno real, las características de la tecnología de RA (combinación real-virtual, interactividad, ubicuidad, registro en tiempo real, etc....) son aprovechables en gran cantidad de campos y aplicaciones. Desde la concepción inicial de una idea hasta su finalización.

En los últimos años, son muchos los estudios que han demostrado las posibilidades que ofrece esta tecnología en campos tan distintos como: la medicina (Vidal et al. 2006; Lamounier Jr. et al. 2010; Essig et al. 2011; Shamir et al. 2011; Paiva et al. 2012; Ashab et al. 2012); en operaciones de mantenimiento y montaje (Benbelkacem et al. 2009; Hincapie et al. 2011; S. Henderson & Steven Feiner 2011); en turismo (Linaza et al. 2008; Guttentag 2010; Hsu 2011); en Museos, (Woods et al. 2004; Zimmermann & Lorenz 2008; Tillon et al. 2011); o Publicidad y Marketing (Honken et al. 2012; de Sa et al. 2011; Valjus et al. 2012) donde las empresas¹ ven la tecnología de RA como una forma de diferenciarse de la competencia dando al usuario la posibilidad de acceder a experiencias visuales sorprendentes.

En ámbito más cercano a la línea de investigación que aquí se plantea, como es el de la arqueología y el patrimonio histórico, se ha utilizado para visualizar reconstrucciones virtuales que permitieran explicar una intención, verificar hipótesis, o explicar un hecho

¹ <http://www.zugara.com/augmented-reality/software>; <http://www.tissot.ch/reality/>;

histórico fruto de las investigaciones de los historiadores (Benko et al. 2004; Haydar et al. 2008).

En el campo de la planificación y el urbanismo, puede ser utilizada para predecir el impacto que tendrá una construcción sobre el paisaje (J. R. Sánchez & Borro 2007; Allen et al. 2011), y en procesos de construcción y mantenimiento, algunos autores sugieren que es viable la introducción de Realidad Aumentada en distintas áreas como el diseño, la excavación, el replanteo, la inspección, la coordinación, o la supervisión de tareas, (Shin & Dunston 2008) o la supervisión de instalaciones (Schall et al. 2008).

En la rehabilitación de edificios, se ha ensayado igualmente como herramienta para visualizar mediante dispositivos móviles y a escala 1:1 la apariencia final de la obra, pudiendo cambiar materiales, colores y texturas (Tonn et al. 2008); y se ha testado su utilidad como herramienta para la representación de espacios interiores, donde se han realizado algunas experiencias colaborativas entre arquitectos y diseñadores de interiores (Harasaki 2001; X. Wang 2008), experimentado aplicaciones donde cualquier usuario puede crear y manipular objetos libremente sin ninguna experiencia previa (Cook et al. 2003; Hsiao et al. 2010; Nóbrega & Correia 2011; Oksman et al. 2012). Las siguientes imágenes ilustran algunas de las aplicaciones aquí mencionadas.



Fig. 1 Simulación del latido del corazón de un voluntario a partir de los datos reales extraídos mediante sensores. En Lamounier Jr. et al. (2010)



Fig. 2 Secuencia de imágenes que muestran la localización de una pieza mediante RA. En S. Henderson & Steven Feiner (2011)



Fig. 3 Imágenes sobre el uso de la tecnología como guía de soporte en museos. En Tillon et al. (2011)



Fig. 4. Usuario explorando el modelo virtual generado a partir del levantamiento de una porción real de excavación. En Benko et al. (2004)

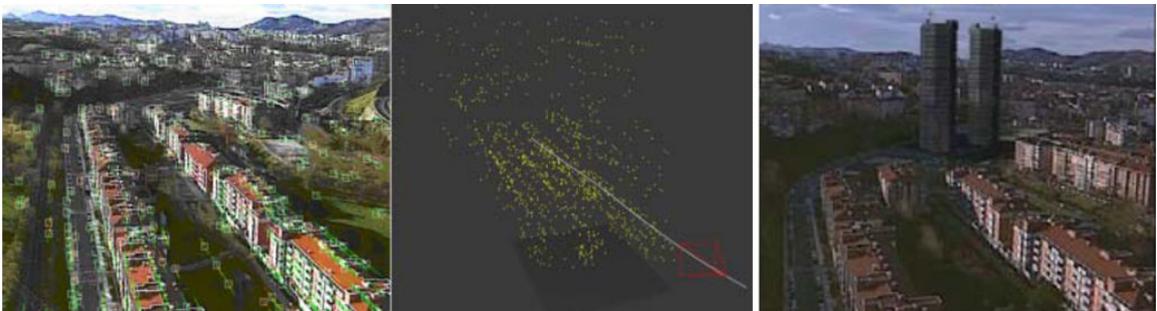


Fig. 5. Secuencia de imágenes mostrando la detección de puntos en el espacio y la superposición del modelo virtual en la escena. En J. R. Sánchez & Borro (2007)

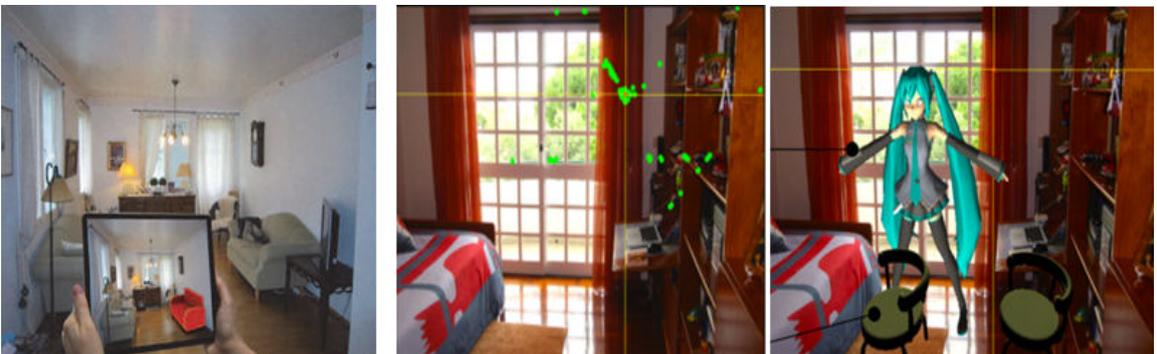


Fig. 6 Imágenes de aplicaciones en diseño interior. Izquierda: Oksman et al. (2012). Derecha: Nóbrega & Correia (2011)

Paralelamente, la vertiginosa mejora de prestaciones de los dispositivos móviles incorporando acelerómetros, brújulas, giroscopios, y sistemas de posicionamiento y localización, han convertido a estos dispositivos en herramientas útiles para el uso de la tecnología de RA, tradicionalmente ligada a ordenadores de mesa, proyectores, y dispositivos tipo Cascos (*Head Mounted Displays*, HMD. En la actualidad, los denominados *Smartphones*, dotados con cámaras cada vez más sensibles y con procesadores más rápidos y complejos, permiten manejar rutinas de procesamiento de imágenes 3D de manera ágil y efectiva. La constante actualización de sus sistemas operativos (básicamente Android o iOS) ha llevado a una creciente ampliación de sus capacidades, abriendo finalmente la posibilidad de desarrollo de aplicaciones de RA de código abierto (*open source*), gratuitas, personalizadas y cada vez más especializadas.

Aprovechando las recientes tecnologías web 2.0, y el desarrollo de la tecnología de Cloud Computing, es posible hoy acceder a una red de servicios de nueva generación, y disponer de información relevante de forma ubicua y totalmente disponible mediante estos dispositivos móviles. Permitiendo compartir aplicaciones y servicios con disponibilidad 24h/7días/365días. Y haciendo finalmente que la experiencia de “aumentar” la realidad pueda hacerse de forma ubicua y universal.

Así, el desarrollo e implantación unido al creciente uso de las denominadas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) se ha constituido como un elemento fundamental, inherente al desarrollo de muchas de nuestras actividades cotidianas, y la educación no ha escapado a ello. El uso de las nuevas tecnologías móviles aparece hoy como *“un universo ilimitado de posibilidades como recurso para el aprendizaje, con la posibilidad de expandirse a un mayor número de usuarios de diferentes escenarios y con la capacidad de socializar el conocimiento”* (Prieto Díaz et al. 2011).

De acuerdo con Fernández Alvarez (2010), este desarrollo ha supuesto un desafío para las metodologías docentes actuales, en todos los ámbitos, y en particular en el de la Expresión Gráfica hasta el punto de que probablemente nos encontremos ante un auténtico cambio de paradigma, dado que las nuevas herramientas de la Informática Gráfica posibilitan el salto desde los mecanismos tradicionales de representación, basados

en la proyección/sección, a los procedimientos digitales que operan directamente en un entorno tridimensional.

Es justamente en el campo educativo donde el avance de la tecnología ha dado lugar a numerosos estudios y aplicaciones que han demostrado su utilidad en multitud de tareas como: la mejora de la escritura, (Shichinohe et al. 2011); las matemáticas (Kondo 2006); en la mejora de la habilidades espaciales (Martín Gutiérrez 2010); o en la música (Peula Palacios et al. 2007), entre otras. Se han abordado, igualmente, metodologías con un componente de entretenimiento, bajo el término *edutainment* (education + entertainment) como Construct3D, descrita en (Kaufmann et al. 2000), y otras muchas experiencias, algunas de ellas en las siguientes referencias (Andersen et al. 2004; Cheok et al. 2004; E. F. Anderson et al. 2010). Así mismo existen webs que ofrecen a los estudiantes la compra de libros “*aumentados*” para la mejora de sus habilidades², y aunque hay autores que sostienen que de momento, la RA no ha tenido la influencia esperada en la educación, es probable que ésta desempeñe un papel más importante en los próximos años (S. Martin et al. 2011).

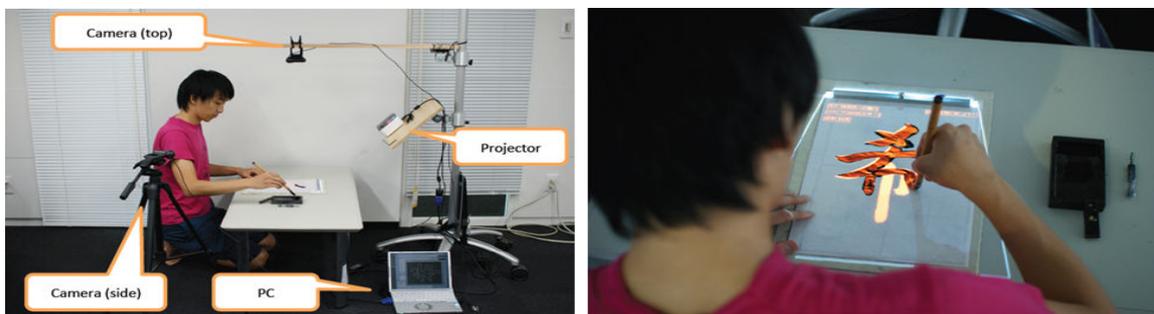


Fig. 7 Ejemplo del uso de la tecnología en el aprendizaje de la escritura. En Shichinohe et al. (2011)



Fig. 8 Estudiantes utilizando una aplicación de RA para la mejora de sus habilidades espaciales. En Martín Gutiérrez (2010, p 212)

² <http://www.ar-books.com/>

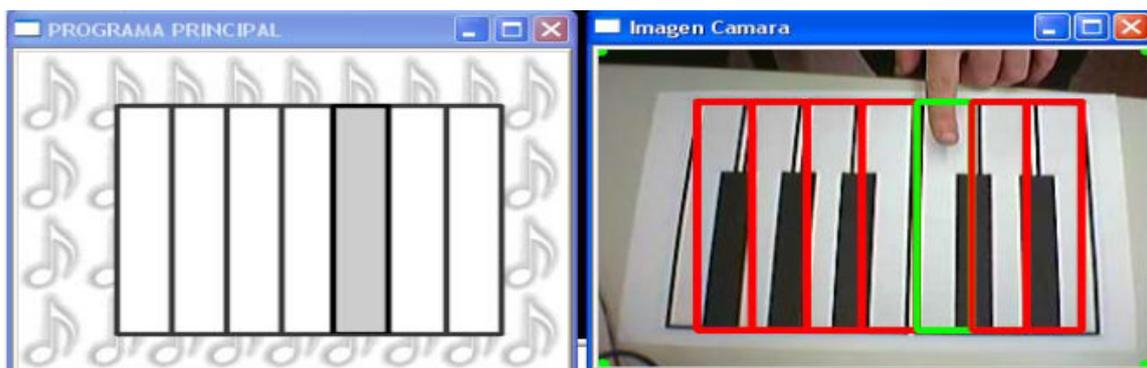


Fig. 9 Aplicación de la RA para el aprendizaje musical. En Peula Palacios et al. (2007)

En su incorporación en los procesos de aprendizaje, uno de los campos de aplicación de estos sistemas que pudiera resultar potencialmente más interesante es el de la arquitectura y la edificación, en tanto que mediante esta tecnología, es posible generar una imagen imposible de lo que no existe y superponer esta información al objeto real (registro), mostrando una realidad de ficción fruto de distintas investigaciones e hipótesis, permitiendo su verificación en el mismo lugar, y promoviendo finalmente, un mayor conocimiento y comprensión del bien estudiado.

En la enseñanza del urbanismo, interiorismo o la rehabilitación, por ejemplo, podría servir como herramienta de comprobación previa a cualquier intervención, o como instrumento de validación de propuestas arquitectónicas. Parece evidente también su utilidad en tareas de replanteo, o de inspección de instalaciones. En el campo del mantenimiento y conservación de edificios, esta tecnología facilitaría la interpretación de dibujos, documentación técnica, manuales e instrucciones de las instalaciones y otras especificaciones. Ayudaría a la verificación in situ de las tareas completadas o pendientes de revisión, en tanto que estos sistemas pueden generar una imagen superpuesta a la real en una fase determinada del proceso constructivo.

Podría considerarse por ejemplo, la necesidad de conocer el estado de cargas del edificio, su comportamiento térmico, la ubicación de determinadas instalaciones, su estado de conservación o conocer la fecha y repercusión de la última intervención realizada en él, etc. Todos ellos posibles modelos virtuales que al generarse y superponerse a su espacio

real, han de contribuir a un mayor conocimiento del entorno o edificio real, y una mayor eficiencia en procesos de rehabilitación y/o mantenimiento de edificaciones.

Desde esta perspectiva, parece clara la necesidad de introducir esta tecnología en los procesos de formación de arquitectos, técnicos e interioristas, futuros responsables de dichas tareas.

Dentro del marco descrito se presenta esta tesis doctoral cuyo título es: *“Evaluación de la tecnología de realidad aumentada móvil en entornos educativos del ámbito de la arquitectura y la edificación”*, con el objetivo de avanzar en el conocimiento de la tecnología, permitiendo, a su vez, sentar las bases para el diseño y desarrollo de contenidos de RA sobre dispositivos móviles que puedan ser útiles en entornos educativos.



1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS.

Antes de comenzar a centrar el trabajo de investigación, se esboza la estructura seguida en el presente documento, donde el lector encontrará brevemente resumida la descripción de los procesos, fases e hipótesis planteadas en el transcurso de esta tesis.

BLOQUE I

En el capítulo primero, tras una breve introducción y delimitación del ámbito de estudio, se establecen el contexto y los límites de esta investigación, donde se presenta el problema tratado y su alcance, detallando además las limitaciones y las restricciones propias de la tecnología. A continuación se establecen los fundamentos teóricos, pedagógicos y didácticos que ha motivado la realización de esta tesis, enumerando además los objetivos y resultados esperados.

En segundo lugar (capítulo II) se describen las hipótesis planteadas al inicio de la investigación, así como la metodología empleada para la implantación y evaluación de la tecnología, describiendo las fases y los pasos comunes realizados, y detallando además, los procesos seguidos en la evaluación de la misma a partir de los conceptos de usabilidad y de mejora en el rendimiento académico. Donde se han empleado técnicas de análisis multivariante para sintetizar el conjunto de respuestas obtenidas en los cuestionarios específicos y poder así relacionarlas. Este capítulo finaliza con el detalle del plan de trabajo realizado donde se resumen las etapas y se relacionan con las publicaciones realizadas para la difusión de la investigación. El siguiente capítulo (III) establece un marco general de la tecnología, donde se analiza el concepto, sus distintas definiciones, y los componentes y sistemas más comunes sobre los que se sientan las bases del término considerado en esta tesis. En siguientes apartados se presentan los antecedentes de la tecnología y su evolución histórica desde principios del siglo XX, así como diversos ejemplos de aplicaciones, experiencias y sistemas llevados a cabo por investigadores en distintos campos, relacionados con la arquitectura, el urbanismo, y la edificación. Todo ello con la finalidad de describir su utilidad y aportar una visión general de esta tecnología. Se evidencia en este capítulo su vertiginosa evolución y su auge actual en dispositivos

móviles, lejos de los tradicionales y costosos sistemas basados en el uso de dispositivos tipo cascos (Head Mounted Displays, HMD). Se ha considerado también relevante describir los distintos programas y plataformas comerciales que existen en la actualidad para la generación de escenas de RA, centrando la atención en aquellos basados en el reconocimiento óptico, por sus ventajas, la economía de los sistemas y su uso extendido. Este capítulo finaliza con la explicación de diversos proyectos educativos que utilizan la tecnología en tareas de aprendizaje, y que se han considerado ilustrativos del estado de la tecnología en este campo, y que de algún modo han servido de referencia a este trabajo.

BLOQUE II

Los ensayos aportados en el segundo de los bloques, tecnológicamente se enmarcan dentro de los temas analizados previamente, y conceptualmente tratan diversos aspectos bajo un punto de vista cercano al campo de la arquitectura y la edificación.

Así pues, en el capítulo IV, se describe la realización de un estudio de viabilidad, bajo el título “*Torre de Gironella*”, que representó un primer acercamiento sobre el uso de las nuevas tecnologías de RA, aplicadas a un caso práctico y real, que permitió desarrollar diversas estrategias de implantación de la tecnología en ambientes educativos. Consistió en la reconstrucción virtual de dos versiones de la torre romana original con el objeto de contrastar las hipótesis de los historiadores mediante la visualización “in situ” de las propuestas. Técnicamente se utilizan las librerías de ARToolKit y ordenadores portátiles dotados de cámara web, para superponer (en los restos de la torre original) las distintas opciones planteadas. Las limitaciones detectadas en los sistemas de reconocimiento óptico sirvieron para replantear estudios siguientes.

En el capítulo siguiente (V) se describen los 3 estudios experimentales realizados utilizando plataformas y software existentes basados en registro óptico. Todos ellos se realizan en la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB). En el primero de los ensayos realizados con alumnos, *Workshop BEST*, se llevan a cabo tres ejercicios que abordan genéricamente el uso de la tecnología como herramienta de aprendizaje colaborativo, y como instrumento para modificar un espacio existente interior

y exterior. Los ejercicios planteados se realizan todavía mediante ordenadores portátiles, dentro y fuera del aula, utilizando marcadores planos e imágenes del entorno real. El segundo ensayo planteado, *Espacio aumentado I*, se realiza dentro del curso para la ampliación de competencias (DAC) en diseño interior. En él se abordan los problemas de oclusión e inmersión lumínica inherentes en las escenas de RA, donde el modelo muchas veces resulta poco creíble y mal integrado en su entorno desvirtuando cualquier propuesta que pudiera presentarse mediante esta tecnología. Se utiliza en este caso técnicas de modelado y de aplicación de texturas a los modelos virtuales para integrarlos en la escena a partir de las condiciones de luz existentes en un determinado espacio, optimizando su tamaño para su visualización de dispositivos móviles. El último de los cursos realizado a través de aplicaciones existentes basadas en registro óptico, *el espacio aumentado II*, se realiza en la asignatura obligatoria de Expresión Gráfica III, (EGIII) donde se implica a la tecnología en los procesos de reconstrucción y posterior mantenimiento de edificios. Con el objetivo de revertir en un mayor conocimiento y una mayor eficiencia en la realización de estas tareas, tradicionalmente artesanales y poco tecnificadas.

En el capítulo VI se aborda la creación de contenidos por parte de los alumnos mediante una plataforma de Realidad Aumentada existente, que basa el registro de objetos en el posicionamiento mediante GPS. El estudio fue realizado con alumnos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB), en espacios exteriores del entorno del *Barcelona Knowledge Campus* (BKC), y fue llevado a cabo mediante la plataforma comercial LAYAR. Para la consecución del ejercicio, y en tanto que se pretendía crear y compartir contenidos en un navegador de RA existente, fue necesario generar un servicio web, y una base de datos pública, que albergara los modelos y la información asociada a ellos como pueden ser su localización geográfica y su posición relativa respecto a éstas, el tamaño, iconos e imágenes, nombre, código, etc... y que hiciera posible su visualización “in situ” a partir de ciertos requerimientos del usuario de manera universal. La descripción del funcionamiento de la aplicación utilizada, la base de datos y el servicio web creado, así como su estructura y el proceso de creación de este “canal” de contenidos, ocupa gran parte del capítulo que finaliza con un caso de estudio práctico que completa los cuatro

cursos realizados a través de aplicaciones comerciales existentes.

En el capítulo VII se explica, en primer lugar, el desarrollo de una aplicación propia de RA basada en el reconocimiento óptico de imágenes reales, específicamente diseñada para entornos docentes. El sistema permite la creación de canales de contenido de Realidad Aumentada y su visualización en un entorno real mediante un dispositivo móvil. Entre sus ventajas, que la diferencian del resto de aplicaciones comerciales, está el hecho de que un solo marcador contiene diversos modelos, lo cual resulta ideal en nuestro campo de estudio, al facilitar la comparación de distintos modelos, opciones, o propuestas, sin necesidad de variar la imagen de referencia. Además permite el posicionamiento de cada objeto en relación al marcador de manera independiente, factor esencial para minimizar el problema de la distancia objeto-marcador, que tantos problemas de estabilidad en la escena originó en estudios previos, y que sigue siendo una de las principales debilidades de este sistema de reconocimiento, especialmente en dispositivos móviles. Para ello previa justificación de la importancia del desarrollo de la aplicación y la relación de los modelos similares consultados para el desarrollo, se detallan los procesos seguidos en su diseño e implementación. Describiendo de forma resumida los lenguajes y formatos utilizados. Este apartado finaliza con la explicación del funcionamiento del programa, que consta de dos módulos, el gestor de contenidos, y el propio aplicativo móvil. En el siguiente apartado se detalla el quinto caso de estudio, bajo el título, *la plaza pública como aula digital*, realizado en la asignatura Aplicaciones Informáticas (APF) de la ETSAB. El tema central del curso fue el estudio de las intervenciones en el paisaje urbano de Barcelona con ayuda de las TICS. Y se realizó sobre la Plaza Flassaders donde el alumno debía evaluar el impacto visual de sus propuestas, utilizando la tecnología propuesta. El capítulo finaliza con el Sexto y último caso de estudio planteado dentro de la asignatura *Proyectos Técnicos II* (PTII) de la EPSEB, con el título *Procesos de Construcción y Mantenimiento*. El estudio, vinculado en este caso al grado de Ingeniería de la edificación, se basa igualmente en la utilización de RA en dispositivos móviles como instrumento de trabajo, y se centró en los procesos de rehabilitación y mantenimiento. Ahondando en cuestiones como el grado de comprensión y asimilación, por parte de los futuros

ingenieros, de estos procesos, y prestando especial atención al orden de ejecución de los trabajos. En concreto se trata el proceso de apertura de una pared de carga mediante recalce de la cimentación existente y colocación de una biga de apeo. Dicho proceso es visualizado por fases, en un lugar real, permitiendo comprender mejor su proceso de ejecución, interactuando “in situ” con el punto de vista, la escala y la posición de los objetos modelados.

En el capítulo VIII, se analizan los resultados obtenidos en relación a la usabilidad de los sistemas empleados y a la mejora en el rendimiento académico. En el primer caso se analizan de forma conjunta los resultados obtenidos sobre el nivel de formación y conocimiento previo de la tecnología, sobre el curso realizado y la tecnología empleada. Se identifican las variables más correlacionadas con la opinión global del curso, y se construyen los indicadores de eficiencia, eficacia y grado de satisfacción que finalmente permiten la construcción de un indicador de usabilidad que muestra, por comparación, la situación de cada alumno en relación al resto. Paralelamente se analizan los resultados obtenidos en relación a la evaluación del rendimiento académico. Comparando las calificaciones PRE y POST de los dos cursos. De dicha comparación se desprende, en primer lugar, que los grupos experimentales obtienen en todos los casos la mayor ganancia en puntuación. Y en segundo lugar, que el aumento de las calificaciones del grupo experimental, resulta estadísticamente significativo respecto al grupo de control. La probabilidad (“Sig. (2-tailed)”) de que las calificaciones fueran coincidentes se sitúa en todos los casos por debajo del 10%. Siendo razonable pensar que hay muy pocas posibilidades de que alumnos del grupo experimental que han hecho la práctica con dispositivos móviles hubieran igualmente aumentado su calificación final al hacer la práctica de manera convencional. Se relacionan entonces los índices y componentes de la usabilidad con el rendimiento académico. Los resultados sirvieron para establecer las bases de las conclusiones finales.

En el capítulo siguiente (IX), resume las conclusiones de la investigación desarrollada. En primer lugar en relación al desarrollo de la investigación y al cumplimiento de objetivos. Continúa con las conclusiones extraídas de la evaluación de los cursos realizado, y finaliza con conclusiones finales sobre el uso de esta tecnología en entornos docentes y planteando futuros trabajos en esta línea de investigación.

En el penúltimo capítulo (X), se enumeran las contribuciones aportadas. Como son: las aportaciones a la metodología de análisis de la usabilidad y el rendimiento académico; el desarrollo de contenidos didácticos, herramientas y ejercicios prácticos sobre el uso y la implantación de la tecnología de RA en entornos docentes; la experiencia aportada en los cursos de corta duración realizados mediante software y plataformas existentes basados en el registro óptico y GPS, en el ámbito de la ingeniería y la arquitectura; y el desarrollo de una versión de una aplicación de RA para dispositivos móviles para su uso educativo que permite la visualización de diversos modelos con un único marcador (imprescindible en el aprendizaje de procesos constructivos), y el posicionamiento mediante la pantalla táctil del modelo respecto al marcador.

El último capítulo (XI), se destina a resumir la difusión de la investigación efectuada durante el transcurso de la investigación. Donde la metodología empleada, los cursos realizados, las conclusiones y hallazgos han sido objeto de diversas publicaciones en actas de congreso, en artículos de revistas, o formando parte de capítulos de libros.

Finalmente este documento aporta un Anexo donde se incluyen las tablas de resultados de los cuestionarios de usabilidad (A1) y los resultados del curso PT_II donde se contrasta el rendimiento académico con la valoración de la usabilidad.

1.3 CONTEXTO DE LA TESIS

La presente tesis se enmarca en un proyecto de investigación educativa más amplio llevado a cabo por los departamentos de Expresión gráfica Arquitectónica I y II de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC), que pretende la implementación de nuevas metodologías docentes a través del uso de las nuevas tecnologías TIC, y que permitan revertir en una mejora en el rendimiento académico del alumnado. El proyecto, bajo el título “E-LEARNING 3.0 EN LA DOCENCIA DE LA ARQUITECTURA. CASOS DE ESTUDIO DE INVESTIGACION EDUCATIVA PARA UN FUTURO INMEDIATO “, presentado por la UPC-Barcelona-Tech, ha sido recientemente aceptado dentro del Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental en el marco del VI Programa Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011, Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental no Orientada (BOE de 31 diciembre de 2011).

El autor, por su parte, es profesor ayudante de la UPC, en la Escuela Politécnica de Edificación de Barcelona (EPSEB), formando parte del departamento de Expresión Gráfica II (EGA II), y ejerciendo tareas docentes en la asignatura de proyectos Técnicos II. Asignatura que engloba los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la formación como Ingeniero de la edificación, y en la que el alumno debe adquirir las siguientes competencias específicas:

- Capacidad para aplicar las herramientas avanzadas necesarias para la resolución de las partes que comporta el proyecto técnico y su gestión.
- Aptitud para redactar proyectos técnicos de obras y construcciones, que no requieran proyecto arquitectónico, así como proyectos de demolición y decoración.
- Aptitud para redactar documentos que forman parte de proyectos de ejecución elaborados en forma multidisciplinar.
- Capacidad de análisis de los proyectos de ejecución y su traslación a la ejecución de las obras.

La asignatura pretende dotar al alumno de la capacidad técnica suficiente para afrontar gráficamente las cuestiones constructivas y de ejecución que plantea la realización de un proyecto técnico. Además del enfoque técnico, la asignatura tiene un componente eminentemente gráfico, y normalmente el estudiante la desarrolla empleando sistemas de dibujo asistido por ordenador con los que plasma el resultado de los cursos. Esto implica que gran parte del trabajo se fuera del aula y que las horas de clase se utilicen para trabajar los contenidos, proponer soluciones e intercambiar datos entre miembros del grupo asesorados por el profesor tutor.

En tanto que la presente tesis se desarrolla en un entorno universitario, no debe dejarse de lado el contexto educativo en que se desarrolla, ni las últimas modificaciones legislativas en materia educativa que han resultado relevantes en los procesos de formación del alumnado, y que de alguna manera han influido en la programación de las experiencias descritas en el segundo bloque.

Por otro lado, el segundo vector importante que define el contexto en el que se desarrolla esta tesis es el tecnológico. En tanto que en ella, además de la evaluación de la tecnología de RA, se utilizan nuevas herramientas, interfaces y soluciones informáticas que el alumno deberá conocer. Muchas de ellas de uso cotidiano en las aulas, y que forman parte de nuestras rutinas diarias, y otras menos conocidas, pero que se encuentran en creciente desarrollo.

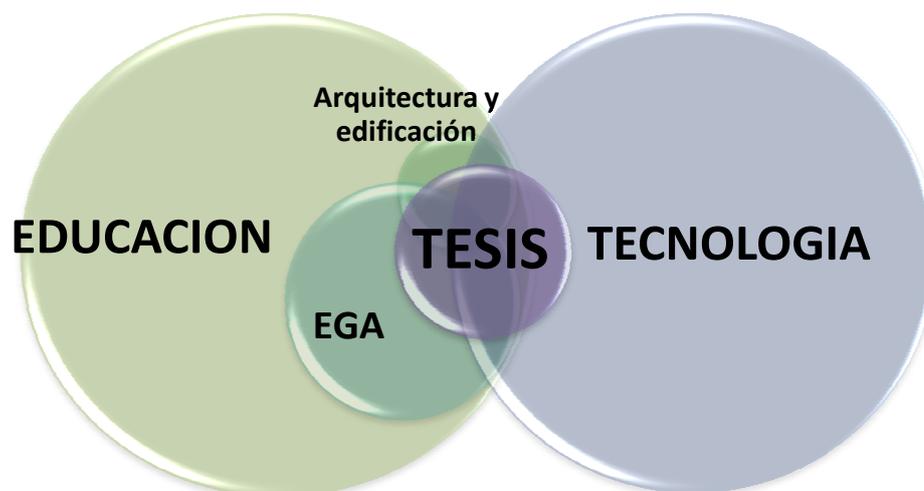


Fig. 10 Esquema del contexto de la tesis

1.3.1 CONTEXTO EDUCATIVO.

La declaración firmada en la Sorbona el 25 de mayo de 1998 por los Ministros de Educación de Francia, Alemania, Italia y Reino Unido, instando al desarrollo de un "Espacio Europeo de Educación Superior" (EEES) se considera un primer paso de un proceso político de cambio a largo plazo de la enseñanza superior en Europa. Esta primera declaración de intenciones da lugar a la Declaración de Bolonia firmada el 19 de junio de 1999 por 30 Estados europeos. Su principal objetivo fue el de la conversión del sistema Europeo de Formación Superior en un polo de atracción para estudiantes y profesores de otras partes del mundo. Y con ella se sentaron las bases para la construcción de un único Espacio de Educación Superior organizado de acuerdo a principios de calidad, movilidad, diversidad, competitividad. Dentro de los seis objetivos recogidos en esta declaración de Bolonia, destaca el establecimiento de un sistema de créditos ECTS y la adopción de un sistema fácilmente legible y comparable de titulaciones, mediante la implantación, entre otras cuestiones, de un Suplemento Europeo al título³ (RD 1044/2003) y a través de la armonización de los sistemas nacionales de titulaciones basado, esencialmente, en los dos ciclos principales de grado y postgrado.

Posteriormente en el Comunicado de Praga (2001) se introducen tres criterios adicionales: el **aprendizaje a lo largo de la vida** como elemento esencial para alcanzar una mayor competitividad europea, para mejorar la cohesión social, la igualdad de oportunidades y la calidad de vida; el **rol activo de las universidades**, de las instituciones de educación superior y de los estudiantes en el desarrollo del proceso de convergencia; y la **promoción del atractivo del Espacio Europeo de Educación Superior** mediante el desarrollo de sistemas de garantía de la calidad y de mecanismos de certificación y de acreditación.

³ El Suplemento Europeo al Título es el documento que acompaña a cada uno de los títulos universitarios de carácter oficial y validez en todo el territorio nacional, con la información unificada, personalizada para cada titulado universitario, sobre los estudios cursados, los resultados obtenidos, las capacidades profesionales adquiridas y el nivel de su titulación en el sistema nacional de educación superior

1.3.1.1 EL SISTEMA UNIVERSITARIO ESPAÑOL EN EL ESPACIO EUROPEO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.

De acuerdo con el documento Marco de 10 de febrero de 2003 del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC 2003), el EEES ha significado retos importantes para el sistema universitario español. La introducción del crédito europeo como unidad del haber académico ha supuesto la valoración del volumen global de trabajo realizado por el alumno en sus estudios, no sólo las horas de clase. La generalización de esta unidad de medida académica para todos los estudiantes es un objetivo fundamental para la creación del espacio europeo de educación superior, de forma que el trabajo desarrollado por un estudiante en cualquiera de las universidades de los estados miembros sea fácilmente reconocible en cuanto a nivel, calidad y relevancia. El sistema ECTS (*European Credits Transfer System*) establece en 60 créditos el volumen de trabajo total de un estudiante a tiempo completo durante un curso académico. Por lo tanto, un semestre equivale a 30 créditos y un trimestre a 20 créditos. A título orientativo y considerando una actividad académica aproximada de 40 semanas/año y una carga de trabajo en torno a 40 horas/semana, se establece para el crédito europeo un volumen de trabajo entre 25 y 30 horas (1.500-1.800 horas de trabajo del estudiante/año). El diseño de los nuevos planes de estudio y las programaciones docentes se han adaptado a este nuevo sistema, y se han llevado a cabo teniendo como eje de referencia el propio aprendizaje del alumno. Así, las materias que conforman el plan de estudios de una titulación oficial han integrado en la asignación de los créditos, **las clases docentes teóricas y prácticas, la preparación y realización de exámenes, las horas de estudio que precisan, y los trabajos que los alumnos realizan para alcanzar los objetivos formativos de dichas materias.**

Por otra parte, el sistema universitario español ha tenido que adaptarse a esta nueva manera de evaluación compatible con el EEES. Con premisas como la flexibilidad y la diversidad como elementos fundamentales de la nueva ordenación de las enseñanzas oficiales, y que pretenden dar respuesta a las demandas de la sociedad en un contexto abierto y en constante transformación.

Esta nueva organización responde no solo a un cambio estructural, sino que además impulsa un cambio en las metodologías docentes, que centra el objetivo en el proceso de

aprendizaje del estudiante, en un contexto que se extiende ahora a lo largo de la vida. En el nuevo escenario dibujado por el EEES y por la introducción de las TIC, el profesor pasa de ser un mero transmisor de sus conocimientos a ser un orientador y dinamizador del proceso de aprendizaje de los estudiantes; de forma que una buena docencia ya no depende exclusivamente de los conocimientos del profesor (A. M. D. García et al. 2005, p 16).

Así, la Ley Orgánica 4/2007, de 12 de abril, por la que se modifica la Ley Orgánica 6/2001, de 21 de diciembre, de Universidades, sienta las bases precisas para realizar una profunda modernización de la Universidad española. Entre otras importantes novedades, el nuevo Título VI de la Ley establece una nueva estructuración de las enseñanzas y títulos universitarios oficiales. Asimismo, el real decreto REAL DECRETO 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, adopta una serie de medidas que, además de ser compatibles con el Espacio Europeo de Educación Superior, flexibilizan la organización de las enseñanzas universitarias, promoviendo la diversificación curricular y permitiendo que las universidades aprovechen su capacidad de innovación, sus fortalezas y oportunidades. El Real Decreto 861/2010, de 2 de julio, modifica al anterior, introduciendo, nuevas posibilidades en materia de reconocimiento de créditos por parte de las universidades y posibilitando que las universidades completen el diseño de sus títulos de grado. En este decreto, se extiende la habilitación para emitir el preceptivo informe de evaluación en el procedimiento de verificación, además de a la ANECA a otros órganos de evaluación de las comunidades autónomas y, finalmente, se revisan los procedimientos de verificación, modificación, seguimiento y renovación de la acreditación con el fin de dotar a los mismos de una mejor definición.

1.3.1.2 EXPRESIÓN GRÁFICA Y EL USO DE LA TECNOLOGIA EN LA ADQUISICIÓN DE COMPETENCIAS.

Parte del objetivo final de toda esta transformación es garantizar la adquisición de una serie de competencias genéricas (transversales) y específicas por parte de los estudiantes exigibles para otorgar el título. Este nuevo enfoque de las titulaciones universitarias por competencias, pretende adecuar los estudios realizados al tipo de trabajo a desarrollar.

En el caso del Grado, se garantizan, como mínimo las siguientes competencias básicas (RD861/2010):

- Que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio;
- Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio;
- Que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética;
- Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado;
- Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.

Las competencias específicas por su parte, se relacionan con disciplinas concretas, estando, en este sentido, más relacionadas con los conocimientos específicos de cada titulación. Ahora bien, una asignatura en particular debe contemplar tanto competencias específicas como transversales.

En cuanto al término competencia, no existe una definición precisa en los diferentes documentos (declaraciones, informes) nacionales o internacionales (A. M. D. García et al. 2005). La *Agencia per a la Qualitat del Sistema Universitari de Catalunya (AQU)* en el documento “Marco general para la integración Europa”, la define como “una combinación de saberes técnicos, metodológicos, sociales y participativos que se actualizan en una situación y en un momento particulares”. Y en conexión con este concepto, los resultados

del aprendizaje son conjuntos de competencias que reflejan lo que el estudiante conocerá y será capaz de hacer al finalizar el proceso de aprendizaje. Precisamente, los créditos europeos, como se ha señalado, constituyen el elemento que permite cuantificar los resultados de aprendizaje del estudiante en forma de consecución de las competencias.

En este enfoque por adquisición de competencias, los conocimientos siguen siendo un elemento necesario, pero no suficiente en la docencia. No se trata de adquirir conocimientos, sino saber qué se hace con ellos, e interiorizar los procedimientos que permitirán continuar aprendiendo de forma autónoma a lo largo de la vida. Entre las competencias recogidas en el documento de la AQU citado anteriormente destacan la competencia en el uso de las TIC, la responsabilidad en el propio aprendizaje, y la gestión de la información.

En el campo que nos ocupa, básicamente en las titulaciones de Arquitectura e ingeniería de la edificación, son muchas las competencias específicas que un estudiante debe adquirir a la finalización de su formación. Con el objeto de extraer aquellas que pueden resultar de interés para el desarrollo de los cursos planteados, relacionadas con la Expresión gráfica y el uso de la tecnología en estas titulaciones, se han consultado diversas las órdenes ministeriales y otras fuentes, identificando las siguientes.

La orden ECI/3856/2007, de 27 de diciembre, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Arquitecto establece que a la finalización de la formación el alumnos debe adquirir, entre otras competencias,

1. *“La Comprensión de los problemas de la concepción estructural, de construcción y de ingeniería vinculados con los proyectos de edificios”.*

Así mismo, establece que dentro del módulo de Ciencias básicas y dibujo que todo plan de estudios debe incluir, se deben adquirir entre otras, las siguientes competencias relacionadas con la expresión gráfica y el uso de la tecnología:

2. “La aptitud para: Aplicar los procedimientos gráficos a la representación de espacios y objetos; Concebir y representar los atributos visuales de los objetos y dominar la proporción y las técnicas del dibujo, incluidas las informáticas.”
3. “El conocimiento adecuado y aplicado a la arquitectura y al urbanismo de: Los sistemas de representación espacial; El análisis y teoría de la forma y las leyes de la percepción visual; La geometría métrica y proyectiva; Las técnicas de levantamiento gráfico en todas sus fases, desde el dibujo de apuntes a la restitución científica; “

De manera complementaria la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA) en su informe “Libro blanco. Estudios de grado en arquitectura” identifica 6 competencias relacionadas con esta área de las que destacamos las 4 primeras:

4. *“Aptitud o capacidad para concebir y representar gráficamente la figura, el color, la textura y la luminosidad de los objetos y dominar la proporción y las técnicas de dibujo, incluidas las informáticas.”*
5. *“Aptitud o capacidad para aplicar, tanto manual como informáticamente, los sistemas de representación gráfica, dominando los procedimientos de proyección y corte, los aspectos cuantitativos y selectivos de la escala y la relación entre el plano y la profundidad”*
6. *“Comprensión o conocimiento de las leyes de la percepción visual y de la proporción, las teorías de la forma y de la imagen, las teorías estéticas del color y los procedimientos de estudio fenomenológico y analítico de las formas arquitectónicas y urbanas.”*
7. *“Comprensión o conocimiento de los sistemas de representación espacial y su relación con los procedimientos de ideación gráfica y de expresión visual de las distintas fases del diseño arquitectónico y urbanístico.”*

En el caso de la titulación de Grado en Ingeniería de la edificación, la orden ECI/3855/2007⁴ de 27 de diciembre, por la que se establecen los requisitos para la

⁴ La citada Orden ministerial, está afectada por la sentencia de 9 de marzo de 2010, por la que se anula el punto Segundo (Denominación del Título), apartado 3 del Acuerdo del Consejo de Ministros de 14 de diciembre de 2007, así como otros apartados

verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Arquitecto Técnico, establece las siguientes competencias relacionadas con el ámbito que nos ocupa:

8. *Capacidad para aplicar los sistemas de representación espacial, el desarrollo del croquis, la proporcionalidad, el lenguaje y las técnicas de la representación gráfica de los elementos y procesos constructivos.*
9. *Capacidad para interpretar y elaborar la documentación gráfica de un proyecto, realizar toma de datos, levantamientos de planos y el control geométrico de unidades de obra.*
10. *Conocimiento de los procedimientos y métodos infográficos y cartográficos en el campo de la edificación.*

La metodología práctica que desarrolla la presente tesis doctoral, basada en la realización de cursos con dispositivos móviles a través de RA sin duda puede contribuir a la adquisición de las competencias aquí relacionadas, pues en todos los ensayos es preciso visualizar información generada por el propio alumno, que debe aprender el uso de nuevas herramientas de representación, e interiorizar una serie de conceptos como: la ideación gráfica (competencias 4, 7) , la representación espacial (2, 3, 5), el análisis de formas(7, 10) y los sistemas de representación(8, 9, 10). Las competencia 1 se ha incluido en esta relación por resultar relacionada, como se verá, con los contenidos impartidos en el último de los cursos realizado.

1.3.2 CONTEXTO TECNOLÓGICO

Las personas necesitamos adquirir nuevas habilidades y conocimientos de manera continua a lo largo de nuestra vida. El entorno cambia rápidamente y las tecnologías de la información y las comunicaciones tienen que ver mucho en ello, por lo que su influencia es doble, por un lado, son parte de la razón por la cual las personas tenemos que formarnos de manera permanente y por otro, son catalizadores esenciales para facilitar el acceso al conocimiento.

Durante los últimos 30 años el ordenador personal ha ocupado una posición central en nuestra vida digital y ha sido la puerta principal de acceso a la red. De acuerdo con el informe *“La sociedad de la Información en España”* (Fundación Telefonica, 2012) *“La miniaturización y el abaratamiento de los costes de producción hicieron posible el desarrollo y la comercialización masiva de ordenadores personales que han llegado a presentar altas cuotas de penetración en las sociedades más desarrolladas. Sin embargo, durante los últimos años otros dispositivos han ido proliferando y han ido adquiriendo un peso cada vez mayor tanto en lo que se refiere a la realización de tareas que implican la gestión de contenidos digitales como desde el punto de vista de acceso a la red.”* Sin duda, el punto de inflexión que ha marcado el inicio de este cambio ha sido el nacimiento del *Smartphone*, que de acuerdo con el citado informe, ya en el año 2011 superó por primera vez al PC como terminal inteligente más vendido en el mundo, con 107 millones de unidades frente a 85 millones. La popularización de estos nuevos dispositivos tiene que ver con la utilidad que proporcionan basada en gran parte en la nueva forma de interactuar con la tecnología que facilitan.

En la actualidad la tecnología digital nos ofrece un amplio abanico de herramientas, los interfaces digitales son diversos, y la investigación evoluciona en esa dirección con el desarrollo de aplicaciones que comunican no solo texto, audio o vídeo sino que también implementando el reconocimiento de voz y el desarrollo de superficies táctiles (tabletas, móviles, etc....) lo que permite interacciones multimodales con los entornos digitales. Los tradicionales teclados y mandos han sido sustituidos en estos dispositivos por estas

nuevas pantallas, así como por controles de movimiento y voz que hacen posible interactuar con los terminales de una manera cada vez más natural.

Así, gracias a la potencia simuladora de los procesadores es posible hoy recrear ambientes artificiales que mezclan realidad y ficción, y que en cierto modo *“modifican la relación tradicional entre el observador y lo observado, entre el significante y el significado”* (Berenguer 2002). De manera que **el espectador ya no percibe su entorno de manera subconsciente e incontrolada, si no que ejerce un cierto control sobre el mundo que percibe, y es él mismo el que determina a través de sus acciones, la información que quiere conocer.**

La tecnología de RA puede contribuir a este cambio de relación, y es objeto de un vertiginoso avance por parte de numerosos grupos de investigación internacionales de entre los cuales destaca el grupo de investigación *Interactive Media System Group*⁵, del *Institute of Software Technology and Interactive System*⁶ (Vienna University of Technology), es pionero en este campo. Muestra de este avance puede consultarse en el portal augmentedreality.org/ donde el lector puede encontrar información sobre y recursos relativos a la tecnología, grupos de investigación, proyectos, plataformas, etc...

En algunos entornos avanzados, los diseñadores pueden utilizar dispositivos HMD en combinación con aplicaciones de reconocimiento gestual para manipular modelos virtuales en tiempo real y en tres dimensiones (Fernández Alvarez 2010). Otros dispositivos como las consolas han incorporado la detección de los movimientos y los gestos como manera para recibir órdenes e instrucciones, por lo que la manera de interactuar con el dispositivo se simplifica notablemente. Podemos citar en esta línea la popular Kinect de Xbox o la tecnología Wii Remote (Wiimote) de Nintendo como ejemplos de nuevos sistemas de interfaz que permiten a los usuarios interactuar con las aplicaciones utilizando gestos, comandos de voz y con el propio cuerpo.

Este nuevo universo de recursos que permite acceder e interactuar con contenidos digitales, se complementa con dispositivos dedicados, como los e-readers o las

⁵ <http://www.ims.tuwien.ac.at/> (Agosto 2012)

⁶ <http://www.isis.tuwien.ac.at/> (Agosto 2012)

televisores conectados. De manera que el acceso multidispositivo a los contenidos digitales parece ya una realidad.

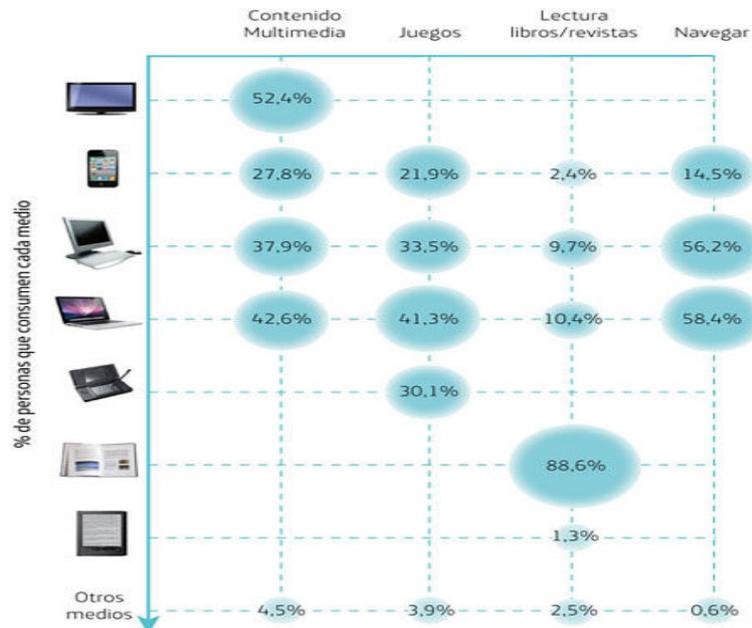


Fig. 11 Utilización de diferentes dispositivos para el consumo de contenidos (España). Fuente: Fundación Telefonica (2012)

En el ámbito de la educación, y de acuerdo con Álvarez (2008), resulta evidente que el desarrollo e implantación de las denominadas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) *“ha supuesto un desafío para las metodologías docentes en todos los ámbitos y en particular en el de la Expresión Gráfica hasta el punto de que probablemente nos encontremos ante un auténtico cambio de paradigma, dado que las nuevas herramientas de la Informática Gráfica posibilitan el salto desde los mecanismos tradicionales de representación, basados en la proyección/sección, a los procedimientos digitales que operan directamente en un entorno tridimensional.”*

Nuestro país ha sido puntero en el desarrollo e implementación de las TIC's, que ya se expanden a todos los niveles y ámbitos de la sociedad formando parte de las rutinas cotidianas. La educación no ha escapado a este desarrollo que juega su papel principal en la universalización de la educación superior. De acuerdo con Prieto Díaz et al. (2011), los impactos fundamentales de este continuo avance, se basan en su uso como fuente de información, canal de comunicación, instrumento cognitivo y de procesamiento de la

información. En nuestro campo, la aparición de estas tecnologías avanzadas o emergentes ofrece la posibilidad de desarrollar nuevos modos de representación y visualización arquitectónica que permitan superar las limitaciones (en cuanto a posibilidades y medios de producción) de las formas tradicionales de comunicación gráfica buscando una mejor comprensión de la información que se transmite en todas las fases del proceso edificatorio. La cuestión principal que debemos plantearnos es la de cómo nuestra comprensión e interpretación de la arquitectura, del paisaje, del diseño urbano, del interiorismo o de los procesos tecnológicos de la edificación pueden ser mejorados con la utilización de estas técnicas como el modelado tridimensional, las animaciones, la Realidad Virtual o, más recientemente, la Realidad Aumentada.

En resumen, estamos, ante un interesante campo de investigación en el ámbito de la Arquitectura y la Ingeniería de Edificación y particularmente dentro del área de Expresión Gráfica Arquitectónica, obligada necesariamente a replantearse sus objetivos y contenidos en función de la nueva organización académica y del impacto de las nuevas tecnologías en los procesos tradicionales de comunicación y donde la tecnología de RA puede jugar un papel importante.

1.4 LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN

La presente tesis, como se ha dicho, se enmarca en un proyecto de investigación educativa más amplio llevado a cabo por los departamentos de Expresión gráfica Arquitectónica I y II, que pretende la implementación de nuevas metodologías docentes, aplicando las nuevas tecnologías TIC. En nuestro caso únicamente se ha evaluado la tecnología de RA, y se ha hecho desde el punto de vista de la usabilidad de los sistemas empleados, y en algunos casos, complementariamente, se ha cuantificado la mejora en el rendimiento académico que el uso de esta tecnología puede significar.

Se ha delimitado su uso en dispositivos móviles (tabletas, teléfonos móviles, o incluso ordenadores portátiles), también conocidos como dispositivos de mano (*hand held devices*), por ser herramientas de uso extendido, y porque en nuestro campo de estudio existen numerosos entornos de aplicación de esta tecnología que requieren de la movilidad del usuario. Las capacidades actuales de estos dispositivos han resultado tradicionalmente insuficientes para satisfacer los altos requisitos impuestos por este tipo de aplicaciones (al tener que combinar tecnologías de posicionamiento, captura de imagen, visualización 3D y reproducción multimedia entre otras), pero a medida que sus procesadores se han vuelto más potentes, e incorporan nuevas prestaciones⁷, se han convertido en herramientas útiles para la aplicación de esta tecnología que empieza a ofrecer a los consumidores nuevas formas de mezclar información virtual y real de forma ubicua y universal.

Este tipo de dispositivos no dota al usuario de una sensación de inmersión en la escena, pues al hablar de Realidad Aumentada en dispositivos móviles, nos referiremos necesariamente a un sistema de RA basado en la visualización de la escena en un monitor (*Monitor Based*) del propio dispositivo. Dejando de lado la RA espacial o los sistemas *Optical See-through* y *Video See-Through*, tradicionalmente usados en los HMD, que si

⁷ Los dispositivos móviles más recientes incorporan entre otros sensores de movimiento (giroscopio, acelerómetro), de proximidad, y de luz ambiental, además de combinar dispositivos de localización geográfica (GPS asistido, brújula digital, Wi-Fi, ...) con la mejora de su óptica (grabación de video en HD 30fps, geoetiquetado, cámara de alta resolución, pantalla Panorámica Multi-Touch, etc...).

bien son dispositivos móviles, y pueden ofrecer más sensación de integración en la escena, resultan mucho más costosos y complejos de implementar.

El contexto en que se desarrolla esta evaluación es el educativo. Con alumnos comprendidos entre los 20 y los 27 años de edad. Todos ellos provenientes de las facultades ETSAB y EPSEB de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). El desarrollo de estas experiencias se inició con un estudio de viabilidad en Junio el año 2010 y finalizó en el primer cuatrimestre del 2012-13 con el curso en la asignatura de Proyectos Técnicos II. El vertiginoso avance de esta tecnología, y su popularización, hacen que gran parte de los sistemas empleados puedan resultar obsoletos a la finalización de este trabajo. Este hecho sin embargo, no desvirtúa el valor de la evaluación realizada, que en el ámbito que nos ocupa puede sentar las bases para el desarrollo de ejercicios y contenidos futuros. Al demostrarse en ella los beneficios que esta tecnología comporta.

Sin duda la selección y preparación del material de los ocho ejercicios realizados, divididos en seis cursos, ha sido la tarea que mayor esfuerzo a requerido, pues en muchos casos la tecnología no estaba suficientemente desarrollada para el propósito previsto, y ha requerido de un aprendizaje adicional por parte del autor, para hacer posible la visualización de contenidos. Ejemplos de este esfuerzo de personalización de las experiencias realizadas, y su adaptación al ámbito de estudio, para el que la tecnología no ha sido originalmente concebida, son la creación de un servicio Web y la gestión de una base de datos asociada que alberga la información relativa a los modelos 3D a visualizar, o el desarrollo de una aplicación propia, descrita en este documento, y testeada en los dos últimos cursos.

La selección y el planteamiento de estas experiencias se ha realizado a partir de la clasificación establecida por Ricart (2008, p 67) de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Según el entorno físico en el que se desarrollan: Se ha utilizado el registro óptico en espacios **cerrados** donde las condiciones de luz son constantes y controlables (DAC, EGIII), y sistemas basados en registro GPS en espacios **abiertos** (LAYAR), que

han resultado sensiblemente imprecisos aunque suficientes para grandes espacios urbanos.

- Según la extensión que abarcan: Se han planteado experiencias en entornos **Locales**, donde la escena aumentada se limita a un determinado espacio de intervención (BEST 2), o **ubicuos** donde el espacio abarcado (BKC, APF) es tan amplio que el usuario tiene la impresión de que todo el entorno real está ampliado.
- Según la movilidad de los dispositivos de registro: En este caso se ha restringido el uso a dispositivos **móviles**, por ser el objeto de evaluación. Descartando sistemas **espaciales** o de proyección donde los sistemas de registro están fijos en el entorno. Las primeras experiencias descritas se han realizado con ordenadores portátiles y cámaras web por ser una configuración asequible y que dota al alumnado de una cierta movilidad. Además, al inicio de la investigación, las prestaciones de los dispositivos telefónicos resultaban todavía insuficientes para algunos de los cursos planteados
- Según el número de usuarios que simultáneamente pueden interactuar: Se han realizado experiencias donde los contenidos se generan y visualizan de forma **individual**, como son los desarrollados mediante la aplicación propia (PT_II y APF), o **colaborativos** donde existe la posibilidad de participar e interactuar de forma simultánea un mínimo de dos usuarios. (LAYAR, BEST).
- Según el tipo de colaboración establecida: dentro de las experiencias colaborativas se procurado realizar ejercicios donde los contenidos se visualizan de forma **remota**, es decir el usuario (el alumno en este caso) genera contenidos y la información está presente para cualquier usuario de forma remota (BEST 3, LAYAR), o **presenciales**, donde los usuarios necesariamente necesitan estar cara a cara para reconocer el marcador y poder visualizar la escena de forma compartida (BEST 1, DAC, EGIII)

Esta voluntad de abordar distintos sistemas y aplicaciones, que permitan ilustrar de manera global las posibilidades que ofrece la tecnología de RA móvil, puede representar a

su vez la debilidad más importante a que se enfrenta el presente trabajo. Se ha preferido dar una visión general de la tecnología, y demostrar su utilidad en entornos docentes, antes que profundizar en áreas más concretas del campo de estudio, como pudieran ser la de la rehabilitación y mantenimiento de edificios, temática parcialmente abordada en el último ejercicio, y que ha de servir de punto de partida de futuras investigaciones.

En relación a las limitaciones técnicas de los componentes de los sistemas utilizados, se han utilizado exclusivamente configuraciones económicas, que resultaran a su vez ergonómicas y fácilmente utilizables por cualquier persona. Así, como sensores de entrada se han utilizado receptores GPS y cámaras web, que ya incorporan por defecto la mayoría de los dispositivos móviles. Dejando de lado sensores tradicionalmente utilizados como son los magnéticos, o inerciales, por su elevado coste y su dificultad de uso, a pesar de su precisión en el registro. Como visores (*displays*) de salida se han utilizado las pantallas de los propios dispositivos, ordenadores, teléfonos o tabletas. De manera que las cámaras integradas capturan vídeo en tiempo real del entorno, al que se le superponen elementos gráficos generados por ordenador antes de ser mostradas. Las desventajas que nos podemos encontrar en este tipo de configuración basado en el uso de visores “de mano” (*hand-held displays*, HHD), coinciden en gran parte con las relacionadas por Bimber & Raskar (2006):

- Los requerimientos exhaustivos a nivel de procesador y memoria del dispositivo para el análisis y renderizado de los componentes de la imagen. Que pueden derivar en aplicaciones excesivamente lentas e inoperativas.
- El tamaño de pantalla limitado de la mayoría de los dispositivos de mano, que restringe el ángulo de visión que puede abarcar; provocando finalmente escenas con un grado de inmersión muy bajo comparado con otras configuraciones.
- La baja calidad óptica de las lentes y sensores de estas cámaras integradas que impiden el reconocimiento de las imágenes de referencia a una cierta distancia o en condiciones de luz poco favorables.

- El hecho de que una o ambas manos permanece siempre ocupada, no permitiendo trabajar con las manos libres.

En relación a la aplicación propia desarrollada, y evaluada en los dos últimos cursos, el investigador es consciente de que debe ser objeto de sucesivas modificaciones, atendiendo a las observaciones que vayan realizando los usuarios, así como a los avances tecnológicos que seguirán produciéndose a un ritmo vertiginoso. Su limitación principal radica en la no posibilidad de modificar dinámicamente, la imagen de referencia (marcador) sobre la que se realiza en registro del modelo virtual, y que en estos momentos se ha limitado a cinco. Otra limitación importante esta en el proceso de transmisión de los modelos generados por alumnos al dispositivo móvil, que en esta primera versión se realiza mediante copia directa de los contenidos en el dispositivo. Siendo deseable su descarga *On line*.

En otro orden de cosas, y en relación a la evaluación de la usabilidad de los sistemas empleados la presente tesis se ha basado en la norma ISO 9241-11, que proporciona las directrices relativas a la usabilidad de un determinado producto, a partir de sus tres componentes principales, la efectividad, la eficiencia y la satisfacción en un contexto de uso determinado. Para ello se han diseñado preguntas específicas para cada uno de los cursos, tomando como base la experiencia de Frøkjær et al. (2000) y estudios realizados por Company et al. (2006), Martín Gutierrez (2010), y Martín Dorta (2011). Otros trabajos consultados para establecer el diseño y el análisis de las encuestas de usabilidad en la aplicación educativa basada en la RA, han sido: Kaufmann & Duenser (2007), Green et al. (2008), S. J. Henderson & Steven Feiner (2009), y Hornbak (2006), siendo el número total de cuestionarios analizados de 127. Los resultados muestran un alto grado de satisfacción en todos los cursos. Es verdad, sin embargo, que en la mayoría de los casos los alumnos han participado voluntariamente, lo cual puede alterar levemente los resultados del estudio. Su estado de ánimo, el nivel de capacidad técnica y la familiaridad con los dispositivos y la tecnología de la que son usuarios habituales, así como la cantidad de tiempo libre que tienen, y otros posibles factores, como la edad y el género, ha podido

igualmente afectar su evaluación del sistema. Limitaciones similares son planteadas en Allen et al. (2011) el cual enumera otros factores potencialmente limitantes que imponen un análisis cauteloso de los resultados, como las condiciones cambiantes del entorno, que pueden limitar el reconocimiento de las imágenes (tracking), afectando a la experiencia, el propio diseño del interface, o la complejidad en la realización de las tareas encomendadas.

Finalmente en relación al análisis de la mejora en el rendimiento, se ha asociado el concepto al reflejo de las calificaciones que los alumnos obtienen en un curso. Aunque, hay que tener siempre en cuenta que las calificaciones escolares poseen un valor relativo como medida de rendimiento, ya que no existe un criterio estandarizado para todos los centros, para todas las asignaturas, para todos los cursos y para todos los profesores. Estas notas pueden considerarse también un producto social, en cuanto que responden a lo estipulado por la legislación educativa y son un indicador de la capacidad productiva del alumno, pero pueden verse afectadas por multitud de factores externos como el entorno familiar, la inteligencia, el autoconcepto y las condiciones para motivar el aprendizaje. (Reyes Tejada 2003). Las evaluaciones efectuadas en dos cursos con un total 36 alumnos, 8 en el curso APF, y 28 en el curso PT_II, se realizaron por comparación con los grupos de control formado por 8 y 108 alumnos respectivamente. Este tamaño muestral de 160 alumnos evaluados en el total de los dos cursos (entre grupos de control y experimentales), podría extrapolarse a un tamaño de población de 400 alumnos con un intervalo de confianza del 90% y un error del 5%. Número similar al total de plazas anuales ofertadas en las dos facultades donde se realiza en estudio, aunque probablemente todavía insuficiente para elevar los resultados a definitivos. Para minimizar este efecto, se trabajó suponiendo una distribución de las calificaciones del tipo T-Student, con la cual es posible hacer estimaciones bastante precisas a partir de muestras reducidas. Las limitaciones temporales y de recursos han imposibilitado recoger un número mayor de muestras, que siempre hubiera sido deseable, aunque por otro lado los cursos intensivos de corta duración, como los que se plantean, se han revelado como sistemas viables para

el tipo de evaluación efectuada. Ejemplos recientes de ellos pueden encontrarse en Di Serio et al. (2012), Chien et al. (2010), y Jou & J. Wang (2012).

Igualmente el análisis efectuado ha sido esencialmente cuantitativo, con la voluntad de ofrecer una valoración objetiva de los resultados obtenidos. Sería conveniente, sin embargo, contrastar y ampliar las conclusiones de este estudio con aproximaciones cualitativas, con el objeto de obtener una visión más amplia basada en las apreciaciones, juicios y valores de los usuarios sobre los cursos realizados. No valorando tanto el cuanto, sino el cómo se mejora el rendimiento académico o la usabilidad de los sistemas.

A pesar de las limitaciones aquí descritas, y el vertiginoso avance que sufre la tecnología, el autor considera que las conclusiones a que ha llevado la investigación, esencialmente la relacionadas con la evaluación, y el tipo de experiencias realizadas, pueden seguir siendo válidas durante un amplio período de tiempo.

1.5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA, PEDAGÓGICA Y DIDACTICA

Aprender, por definición, es el proceso mediante el cual se construyen los recuerdos, mientras que la memoria es el resultado del aprendizaje (Squire 1987).

En los últimos años, el afán por una mejora en los procesos de aprendizaje ha llevado a una transición hacia un aula tecnológicamente mejorada, donde se han ido incorporado ordenadores, reproductores multimedia, pizarras interactivas, internet, herramientas de la web 2.0, juegos, etc... Así la aparición de la *www* revolucionó la manera de acceder, compartir y codificar la información, jugando un papel fundamental en el aprendizaje, el E-mail y los teléfonos móviles han transformado las formas de comunicación, y la lista de tecnologías que pueden ser útiles en procesos de aprendizaje es amplísima y en constante crecimiento, no siendo sencillo la definición de cuáles pueden ser aptas para el aprendizaje y cuáles no (Dror 2008). Más recientemente se han utilizado tecnologías de inmersión en mundos virtuales y de RA. En el caso de esta última, su utilidad ha sido evaluada mediante numerosos proyectos a nivel estatal e internacional, (Andersen et al. 2004; Galantay et al. 2004; Brederode et al. 2005; Pan et al. 2006; Budhiraja et al. 2010; C. Alvarez et al. 2011; C.-M. Chen & Tsai 2012) y aunque estas experiencias, que utilizan RA en el área del entretenimiento y la educación, demuestran el gran potencial que ofrece esta tecnología, en educación, esta tecnología todavía se puede considerar una herramienta novedosa, y es necesaria una mayor investigación, dirigida especialmente a la experiencia de los usuarios y en los procesos de aprendizaje (Portalés Ricart 2007). A pesar del esfuerzo continuado en su implementación, existe todavía la necesidad de sumergir a los alumnos en nuevos entornos de aprendizaje, estos a su vez, en constante evolución (Arvanitis et al. 2007).

El docente por su parte, se enfrenta al reto de actualizarse constantemente para aplicar una nueva forma de enseñanza, enfocada a la adquisición de Competencias Genéricas en el que el alumno tiene que **construir su propio conocimiento** por medio del constructivismo propuesto por Piaget (Piaget et al. 1995) y el aprendizaje significativo propuesto por (Ausubel 1968) donde el estudiante relaciona la nueva información que

recibe con la que ya posee, en oposición al aprendizaje basado en la memorización de contenidos a través de la mera exposición y la repetición de contenidos, y en el que el rol del docente se reduce en muchos casos a proporcionar la información a los alumnos. En contraste, bajo este nuevo enfoque, el profesor asume el papel de **guía y gestor en la adquisición de conocimiento del alumno**.

Para (Roussou 2004), el constructivismo ha emergido en la última década como una alternativa pedagógica íntimamente relacionada con los avances en la educación tecnológica, proporcionando los fundamentos teóricos para el desarrollo de entornos virtuales de aprendizaje (VLE, *virtual learning environments*). La idea principal que fundamenta este argumento, es que **todo conocimiento y desarrollo cognitivo es producto, en último término de la actividad constructiva del sujeto**, una actividad que es tanto física como intelectual. Desde esta postura constructivista, el aprendizaje puede facilitarse, pero cada persona reconstruye su propia experiencia interna, con lo cual puede decirse que el conocimiento es único en cada persona, en su propia reconstrucción interna y subjetiva de la realidad. Para Ausubel el aprendizaje significativo se produce cuando un estudiante relaciona la información nueva con la que ya posee, reajustando y reconstruyendo ambas informaciones en este proceso. Dicho de otro modo, la estructura de los conocimientos previos condiciona los nuevos conocimientos y experiencias, y éstos, a su vez, modifican y reestructuran aquellos. Para Behzadan et al. (2011a) el uso de la RA como herramienta de soporte al aprendizaje se integra en este paradigma constructivista. Y de manera complementaria, el proporcionar un protocolo de entrenamiento realista e interactivo puede optimizar las capacidades de adquisición de conocimientos de los alumnos, que a su vez puede disminuir el tiempo de entrenamiento. (Kirschner et al. 2006).

La razón que fundamenta la redacción de la presente tesis doctoral, por tanto, se basa en el argumento de que **se pueden crear escenas y aplicaciones de RA en las que los participantes puedan, de manera activa, construir sus propios conocimientos, probando ideas y conceptos, generando y comprobando sus hipótesis, a la vez que involucrar a otros compañeros en el diseño y construcción de objetos y modelos virtuales que**

puedan ser visualizados “in situ”, creando nuevas situaciones que puedan ser comparadas con experiencias y conocimientos personales preexistentes facilitando a su vez, su comprensión. El constructivismo se adopta como base para el desarrollo de estos entornos interactivos y participativos, donde el usuario es capaz de modificar, construir, probar ideas, e involucrarse activamente en la resolución de un problema. (Roussou 2004)

1.5.1 MOTIVACIÓN Y TECNOLOGÍA

En el aula, es frecuente detectar situaciones donde los contenidos docentes que se imparten son simplemente expuestos, presentados sin ninguna interacción por parte del estudiante, que actúa de manera pasiva, recibiendo conceptos y contenidos que debe memorizar, cayendo fácilmente en el aburrimiento, y revirtiendo en un aprendizaje mínimo. En contraste, ocurre en contadas ocasiones, que cuando los estudiantes están activos y motivados, cuando se involucran, participan, se comprometen e interactúan con los contenidos, entonces el aprendizaje se maximiza. Se activan de alguna manera los mecanismos cognitivos del aprendizaje. Ante esta situación, la pregunta siguiente que el docente debe hacerse es, ¿Puede las tecnologías del aprendizaje (TEL, Technology Enhanced Learning) modificar esta actitud? Para (Dror 2008), este cambio depende de si se utilizan como medio para promover lo que denomina las tres C's del aprendizaje, control, reto y compromiso (Control, Challenge, and Commitment).

- **Control** en el sentido de dotar a los alumnos un cierto dominio sobre su proceso de aprendizaje. Esto hecho puede ayudar, tanto en términos de consecución de los objetivos como en un mayor afecto positivo hacia la materia impartida. Incluso la mera ilusión de control (es decir, dando a los alumnos la sensación de que controlan el aprendizaje) puede ser un paso en la mejora de sus resultados.
- **Reto**, entendido como la sensación que debe sentir un estudiante al enfrentarse a un problema. No significa que éste deba ser necesariamente complicado o complejo, simplemente debe suponer una superación para el alumno. El propio material de aprendizaje puede suponer un reto si se presenta de manera interesante., que requiera que el alumno piense sobre él, reflexione y comprenda. Si el aprendizaje se

siente como un enigma, un misterio que los alumnos deben resolver, les supone un reto. Se sienten que han logrado algo, sintiéndose orgullosos y bien consigo mismo, entonces su aprendizaje resulta mucho más efectivo.

- **Compromiso**, ya que si los alumnos no están comprometidos con su aprendizaje, entonces todo el proceso se convierte en una batalla perdida. El compromiso es la base del aprendizaje, sin embargo, llegar a comprometer a los alumnos no es fácil. El control y el reto ayuda a adquirir este compromiso. Siendo muchas veces difícil de lograr y de mantener.

Estos tres conceptos son los ingredientes esenciales para un aprendizaje eficaz y eficiente, ya que maximizan la mayoría de los mecanismos cognitivos. Una exposición pasiva hacia los alumnos socava los objetivos mismos del aprendizaje, que la tecnología bien utilizada podría ayudar a promover y alcanzar. El enfoque de Dror, ilustra como la tecnología basada en estos conceptos debe ser incorporada en los procesos docentes como herramienta para su mejora. Y existe un cierto consenso en el impacto positivo de la RA en la motivación de los estudiantes, que les lleva a lograr mayores niveles de participación en actividades de aprendizaje con un menor esfuerzo cognitivo (Di Serio et al. 2012)

1.5.2 APRENDIZAJE EN ENTORNOS DE REALIDAD AUMENTADA

Entendiendo la tecnología de RA como un instrumento que, al superponer información generada digitalmente en un espacio real, puede facilitar un mayor conocimiento y una mejor interpretación de nuestro entorno, cabe pensar que sus características son aprovechables en gran cantidad de aplicaciones en el campo de la educación. En el ámbito de la representación arquitectónica, por ejemplo, puede facilitar una mayor interpretación del entorno en el que se inscriben los proyectos, ayudando a su integración y comprensión, lo cual es fundamental en este campo. Ofreciendo, además, ventajas potenciales en todas las etapas de un proceso de diseño, desde el planeamiento inicial del problema, hasta su representación y verificación en el mismo lugar donde ha de ser implantada la propuesta.

Según afirma Ricart (2008), hace unos años había una tendencia a pensar que si se instalaban ordenadores suficientes en una clase, muchos de los problemas educacionales desaparecerían. Sin embargo, hoy se cuestiona el valor real de la tecnología de la informática en la educación y si la construcción de complejos sistemas virtuales o aumentados ayuda realmente en el proceso de aprendizaje. No existe una teoría unificada sobre el aprendizaje que se pueda utilizar como base para la generación de entornos aumentados, y por ello surge la necesidad de revisar su compatibilidad con distintas metodologías y contenidos, así como evaluar los posibles tipos de implementación para asegurar los objetivos educativos (P. Johansson & Gardenfors 2005). Estas tecnologías, dotadas de nuevas herramientas gráficas y multimedia, facilitan la construcción de nuevos conocimientos a medida que se interactúa con el entorno, la creación y compartición de contenidos, y sacan provecho de la actividad del estudiante que participa en la construcción de su conocimiento, pudiendo ser útiles como método de aprendizaje y en la adquisición de nuevas competencias.

Tradicionalmente los educadores se han mostrado entusiasmados con el uso de este tipo de tecnología en el aula, esperando que sus características ayudaran a mejorar la motivación la comprensión y que fueran especialmente válidas en tareas que requirieran de una cierta experimentación como el desarrollo de las habilidades espaciales (Dalgarno & M. J. W. Lee 2010; Dunleavy et al. 2008; Martín Gutiérrez et al. 2010). Los continuos avances en la tecnología han hecho hoy viable su implementación en las aulas (Specht et al. 2011; Arvanitis et al. 2011) representado con exactitud la evaluación y las reacciones del alumno. Y a pesar de que esta tecnología no está lo suficientemente madura para ser usada masivamente en la educación, el entusiasmo que muestran los estudiantes disminuye las barreras encontradas en su implementación (Di Serio et al. 2012).

Por otro lado, comparando las características de las aplicaciones de RA con otras, tradicionalmente más utilizadas, basadas en realidad virtual (RV), (3dsMax, Sketchup, etc..) observamos que ambas comparten características comunes como la inmersión, navegación e interacción (Dunleavy et al. 2008; Bokyoung 2009). Sin embargo, destacan dos ventajas principales de las primeras respecto las segundas:

1.- Permiten una experiencia Colaborativa. Permitiendo al usuario interactuar con los objetos virtuales mientras éste permanece constantemente en contacto con el entorno real. De manera que diversos usuarios, y mediante los dispositivos apropiados, pueden colaborar con estos objetos generados por ordenador como si fueran objetos reales dentro de una misma escena, favoreciendo la interacción entre ellos en tiempo real.

Serra (2007, p 15) opina que al propiciar este tipo de aprendizaje, *“pasamos de una comunicación unidireccional (profesor-alumno) a una comunicación multidireccional en la que los alumnos se comunican entre sí, y con el/los profesores, produciéndose un conflicto sociocognitivo del que surge el progreso individual.”* Siguiendo a esta autora (Serra 2007, pp 100-101) destacamos algunas otras ventajas de este tipo de aprendizaje puede aportar:

- Los estudiantes aprenden mejor cuando se sienten seguros, es decir, cuando las metas de aprendizaje son realistas y se favorece la cooperación en el aula
- En las situaciones los estudiantes suelen atribuir el éxito a causas personales (internas) y controlables, a las capacidades y esfuerzos del grupo al que pertenecen. En cambio ante el fracaso, suelen buscar causas externas como la dificultad de la tarea o la mala suerte si bien en ocasiones también atribuyen el fracaso a la falta de esfuerzo de los miembros del grupo
- El aprendizaje colaborativo utiliza la dinámica de grupos para promover el aprendizaje y, además, la motivación intrínseca del contacto social sirve para mantener a los alumnos interesados en las actividades académicas.

2.- Interacción tangible. Mediante la superposición de los objetos generados por ordenador en un entorno real a través de marcadores, que actúan de vínculo entre el espacio real y la información virtual en él superpuesta, es posible modificar y manipular la escala, posición y lugar de los objetos virtuales. Esta interacción “tangible”, conseguida simplemente mediante la modificación de estos marcadores, su combinación, o cambio de posición, se convierte en un interface extremadamente sencillo y natural que no necesita aprendizaje previo por parte del usuario. La tecnología de RA es capaz de proporcionar un amplio rango de posibilidades para este tipo de interacción y permite la participación

activa en la formación de contenido. De este modo, se convierte en un medio adecuado para su uso no solo en escuelas, sino también en museos y centros de entretenimiento (Ricart 2008, p 231).

En esta misma línea se manifiestan Behzadan et al. (2011a) al afirmar que el uso de la tecnología de RA mejora el aprendizaje tradicional por las siguientes razones:

- Facilita el aprendizaje de conceptos e ideas a través de la interacción. Permitiendo la generación de conocimiento y habilidades que de otra forma requerirían de mucho más tiempo.
- Los errores cometidos en determinados campos, no tienen ninguna consecuencia real. Mientras que en la enseñanza tradicional, trabajar con una maquina en funcionamiento o manipular determinado material peligroso, puede acarrear problemas de seguridad y de salud.
- Admite un tipo de aprendizaje basado en el descubrimiento donde el alumno toma el control de sus propios procesos de aprendizaje. Adquiere información y la utiliza para experimentar situaciones que en muchos casos no podrían ser implementadas por restricciones de tiempo y/o espacio, en el entorno real.
- Al proporcionar a distintos estudiantes acceso múltiple, y simultáneo a escenas compartidas de RA, se involucran en equipos de trabajo y actividades de intercambio de ideas para resolver un problema, ayudando a su vez a mejorar sus habilidades de comunicación.

Finalmente para Billingham & Duenser (2012) existen algunas ideas claves que deben tenerse en cuenta en este tipo de experiencias docentes:

- La tecnología ya es suficientemente robusta para realizar actividades docentes, especialmente a través de libros o dispositivos móviles.
- Estas actividades deben completar, más que sustituir a la metodología tradicional.
- EL aprendizaje se realiza tanto durante la visualización del contenido como durante el uso de la aplicación misma.

- La tecnología es especialmente beneficiosa en la mejora de la comprensión de la lectura y de las habilidades espaciales (*spatial data*)

1.5.3 LOS NUEVOS ROLES DEL PROFESOR Y DEL ESTUDIANTE

El rol del profesor ha consistido tradicionalmente en la transmisión de conocimientos, el estudiante por su parte se ha centrado en la recepción y asimilación de éstos. De alguna forma se ha considerado a este último como un ser “dependiente” del primero, y su experiencia poco válida en comparación con el profesor. De acuerdo con (A. M. D. García et al. 2005) el aprendizaje era concebido como una mera acumulación de contenidos, donde un grupo de estudiantes debía aprender las mismas cosas y en iguales niveles.

Con el nuevo escenario que plantea el EEES y la implantación de las nuevas tecnologías en el aula, el papel del tutor cambia radicalmente. Este debe proporcionar al estudiante los criterios necesarios para saber buscar, encontrar y seleccionar la información que necesita para convertirla en conocimiento. Es decir lo importante no es memorizar información sino saber dónde encontrarla y analizarla. Promoviendo en el alumno procesos de reflexión, crítica y síntesis de esta información. Además, el profesor debe realizar funciones de motivación, dinamización y estímulo del estudio, al tiempo que debe favorecer la participación del estudiante y ofrecerle una atención más personalizada. Su papel de evaluador varía ligeramente, pasando de evaluar no tanto lo que se aprende si no como se aprende.

En nuestro caso, sin embargo, el profesorado carece casi siempre de los conocimientos en programación y modelado 3D que el uso de la tecnología de RA exige para provocar este tipo de situaciones. De manera que la falta de herramientas para la generación de contenidos y escenas de RA , que no requieran de conocimientos avanzados, se configura como el principal obstáculo a que se enfrenta la tecnología actual, evitando que este tipo de experiencias se implante en las aulas de forma general

A su vez, el estudiante adopta ahora un papel mucho más activo y autónomo, dejando de ser un mero receptor de conocimientos, para convertirse en el artífice de su propio proceso de aprendizaje, situándose, por tanto, en el centro del mismo. En otras palabras, el estudiante pasa de ser un objeto a un sujeto de aprendizaje. Marca ahora su propio ritmo de estudio, lo cual implica un esfuerzo para aprender a aprender de forma diferente. Participa, comparte información con el resto de compañeros, y toma conciencia de la pertenencia a un colectivo

1.6 OBJETIVOS Y RESULTADOS ESPERADOS

A la vista de los fundamentos pedagógicos y didácticos expuestos, y en tanto que la mejora en el aprendizaje nos preocupa, es preciso formular a continuación el objetivo principal que persigue el presente documento.

1.6.1 OBJETIVO PRINCIPAL

En anteriores apartados, se han avanzado las posibilidades que ofrece la tecnología de RA en campos tan diversos, como el de la medicina, el marketing y la comunicación, el turismo, o la arqueología y el estudio del patrimonio. Se ha evidenciado su relación con los procesos educativos, y sus ventajas potenciales, especialmente en el campo que nos ocupa. Se ha esbozado, así mismo, el contexto educativo y tecnológico en el que nos encontramos donde, por un lado, el alumno ha de asumir un papel más activo en su aprendizaje, y donde la vertiginosa mejora en las prestaciones de los dispositivos, ha supuesto un desafío para las metodologías docentes actuales, en todos los ámbitos, y en particular en el de la Expresión Gráfica.

En base a estas consideraciones, el objetivo principal de la tesis ha sido:

“Demostrar la validez y utilidad de la tecnología de Realidad Aumentada en dispositivos móviles, en los procesos de aprendizaje del ámbito de la arquitectura y la ingeniería de la edificación.”

Se ha elaborado para ello una tesis de carácter teórico-práctico que podría sintetizarse en la realización de una serie de ensayos utilizando tecnologías actuales de RA, resolviendo en cada uno de ellos cuestiones previamente planteadas, tales como: el tipo de información representada y como esta es consultada por el usuario; o la viabilidad del uso de diferentes sistemas de registro, los problemas de oclusión, visualización, renderizado, etc... Aunque gran parte del trabajo se centra en creación de contenidos didácticos para la elaboración de estas experiencias, también se ha realizado una revisión bibliográfica, extrayendo aquellos conceptos, metodologías, conclusiones, etc. que se han considerado relevantes para la aplicación de estas tecnologías en entornos educativos, y su estado

actual de desarrollo. Finalmente, en base al objetivo propuesto se evalúan los resultados obtenidos divididos en dos líneas de actuación: la evaluación de la usabilidad en los sistemas empleados, y la evaluación en la mejora del rendimiento académico de los alumnos, que permiten extraer conclusiones e identificar nuevas líneas de investigación.

1.6.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS:

La consecución de este objetivo, requirió de la formulación de una serie de objetivos secundarios, alcanzados de forma consecutiva en el tiempo, y que fueron los siguientes:

- Establecer un marco teórico de la tecnología de Realidad Aumentada en general y en dispositivos móviles en particular, de acuerdo a su estado actual y de desarrollo de los últimos años. Analizando experiencias y ejemplos aportados por diversos autores, para ofrecer una visión más cercana de los temas tratados. Así como el análisis de las restricciones y condicionantes derivados del entorno, ya sea en espacios abiertos o cerrados.
- Lograr una vinculación efectiva entre objetos 3D y un sistema de información Geográfica, que permita la interacción y consulta de datos en tiempo real.
- Participar en el desarrollo de una aplicación de Realidad Aumentada para su uso en dispositivos móviles, que supla las carencias de las aplicaciones testeadas, y pueda ser utilizada en entornos docentes.

En apartados siguientes, se detalla la consecución de estos objetivos. Se evidencian las debilidades actuales de la tecnología, como la baja calidad las escenas generadas que resultan casi siempre artificiales y poco creíbles, y se describen los retos y las dificultades encontradas en la generación de contenidos didácticos y en su adaptación a la tecnología.



2 CAPITULO II. HIPÓTESIS, METODOLOGÍA, Y PLAN DE TRABAJO

2.1 INTRODUCCIÓN

El cumplimiento del principal objetivo propuesto plantea la necesidad de utilizar una metodología de investigación basada en los casos de estudio.

Se utilizan en ellos distintos sistemas y componentes, y mediante el empleo de esta tecnología se resuelven cuestiones concretas planteadas al comienzo de cada ensayo, como: el correcto registro de las imágenes y renderizado; la integración del objeto en la escena, básicamente desde un punto de vista geométrico y lumínico; el efecto de oclusión, que permite ocultar parcialmente en la escena el objeto virtual a partir de un objeto real; o el tipo de información a proporcionar para su vinculación efectiva a una base de datos que permita compartir contenidos generados por el propio alumno.

El proceso descrito por fases, se resume a continuación:

1. Investigación bibliográfica.

Se procedió a la recopilación y análisis de la literatura científica con el fin de poder ahondar en el conocimiento del estado de la cuestión en los diferentes apartados y definir el marco de referencia, extendiendo el estudio tanto al estado actual de los sistemas y aplicaciones existentes que permitieran la modelización y transmisión de información por parte de los alumnos, como al desarrollo de contenidos específicos y su posterior consulta e integración en dispositivos móviles. Se extrajeron en esta fase aquellos conceptos, metodologías, y conclusiones consideradas relevantes para la aplicación de la tecnología en nuestro campo de estudio. Y se recopilaron datos y material procedente de experiencias similares, realizadas con anterioridad, para cada caso de estudio planteado en esta fase.

2. Preparación de contenidos.

Se refiere a la parte del trabajo previa a la realización de los cursos, y dedicada a la experimentación, a la creación de las técnicas específicas de modelado y su integración

con la tecnología así como la parte destinada al desarrollo de contenidos y recursos específicos para los cursos. En este apartado se trabajó igualmente en el diseño de dichos cursos, y en el tipo de evaluación que debía efectuarse. De manera que se incluyen en esta fase las siguientes tareas:

- El estudio de viabilidad de la tecnología a partir de una aplicación comercial existente.
- La experimentación en el tipo de objetos a representar, y de cómo éstos deben ser generados, pues no resulta sencillo la integración de estos modelos 3D de una cierta complejidad, en dispositivos móviles con prestaciones todavía muy inferiores a las que ofrece un ordenador de mesa. Se trabajó en la optimización de los modelos a partir del modelado por mallas y con texturas únicas que incorporaran las condiciones de luz del entorno, y en los formatos de exportación adecuados.
- La creación de contenidos y recursos específicos para cada uno de los cursos, como son un servicio Web y una base de datos asociada, utilizada en el curso TICS (Iayar), y un sencillo aplicativo para plataformas Android, basado en el reconocimiento óptico para el registro de las imágenes.
- El diseño y evaluación de los cursos, a partir de la creación de ejercicios prácticos y de cuestionarios específicos orientados a la evaluación de la usabilidad de los sistemas empleados, y a la mejora en el rendimiento del alumno.

3. Talleres y ensayos participativos.

Es la fase destinada al desarrollo de los ejercicios por parte de los alumnos, realizada desde septiembre del curso académico 2011/12 a Octubre del curso 2012/13. Se realizaron un total de 8 ejercicios divididos en seis cursos. Participaron en ellos un total de 127 estudiantes de diferentes orígenes y nacionalidades, aunque todos ellos estudiantes de las escuelas de Arquitectura (ETSAB) y edificación (EPSEB). En la evaluación del rendimiento participaron además, aunque sin saberlo, como grupos de control 146 alumnos más. Aportando los datos en que se basa la evaluación y el análisis efectuado.

4. Análisis y evaluación.

Esta parte del trabajo corresponde al procesamiento y al análisis de los datos obtenidos. Se utilizan para ello técnicas de análisis multivariante para la construcción de indicadores, de eficiencia, eficacia, satisfacción, usabilidad, y rendimiento, que son correlacionados entre ellos. En el caso de la evaluación del rendimiento se comparan estadísticamente los resultados de las calificaciones entre grupos mediante la distribución de *t-student*. Y finalmente se identifican variables que pueden resultar significativas, tanto en la usabilidad de la tecnología como en el rendimiento de los alumnos. El detalle de estas dos últimas fases (3 y 4) se describe en el punto 2.3. *“pasos comunes para la implantación de la tecnología”*.

2.2 HIPÓTESIS

Con el objeto de “demostrar la validez y utilidad de la tecnología de Realidad Aumentada móvil, en los procesos de aprendizaje del ámbito de la arquitectura y la ingeniería de la edificación”, se ha trabajado con las siguientes hipótesis:

Hipótesis 1:

“La vertiginosa mejora de prestaciones de los teléfonos móviles, dotados con cámaras cada vez más sensibles, con procesadores más rápidos y complejos que permiten manejar rutinas de procesamiento de imágenes 3D, así como la incorporación de acelerómetros, brújulas, giroscopios, y sistemas de posicionamiento y localización, han convertido a estos dispositivos en herramientas útiles para el uso de la tecnología de Realidad Aumentada en el ámbito de la arquitectura y la edificación”

Hipótesis 2

“En su incorporación en los procesos de aprendizaje del ámbito de la arquitectura y la edificación, esta variante de la tecnología de RA puede ayudar a la mejora en la capacidad de análisis, y en la descripción y representación de las propuestas por parte de los alumnos. Aumentando su motivación y grado de implicación, y revirtiendo, finalmente, en un mayor rendimiento académico.”

En relación a la primera hipótesis planteada, cabe señalar que en el ámbito que nos ocupa, los requerimientos de la tecnología suelen ser más exigentes que en otros casos, como pueden ser el marketing o el turismo, de carácter más informativo, pues requiere el procesamiento de modelos complejos y precisos, y en muchos casos, el análisis de distintas opciones e hipótesis de forma simultánea. Se requiere además de la generación de escenas con un alto grado de realismo e integración de los modelos virtuales, pues de

otro modo, se invalidaría cualquier juicio que sobre ellas pudiera hacerse. Este punto resulta crítico en nuestro campo de estudio, y especialmente en entornos docentes, donde es habitual por ejemplo, visualizar propuestas arquitectónicas integradas en su entorno, con el objeto de evaluar su impacto o poder ser comparadas con otras, como paso previo a la intervención. Con este objetivo se ha utilizado tradicionalmente la técnica del fotomontaje, de larga tradición durante el siglo XX, entendemos que la RA podría ser utilizada como herramienta sustitutiva de esta técnica (Redondo Dominguez et al. 2012, p 30). Es habitual igualmente en este campo, encontrarse con la necesidad de visualizar información técnica, integrada en un determinado espacio, y donde la inconsistencia geométrica del modelo virtual en relación a su entorno real puede inducir a errores. No está claro tampoco, que el bajo grado de inmersión que proporcionan estos dispositivos sea suficiente para el campo de estudio que nos ocupa, ni que la interacción con el tamaño reducido de sus pantallas resulte suficiente para lograr un cierto grado de satisfacción, eficacia y eficiencia del sistema. Para confirmar esta primera hipótesis se evalúa la usabilidad de los sistemas empleados de acuerdo con la metodología que se detalla en el apartado siguiente.

En relación a la segunda hipótesis planteada, si bien es verdad que la tecnología ha sido testeada con éxito en diversos campos de la educación como la escritura, la música o el desarrollo de habilidades espaciales, (Pan et al. 2006; Shichinohe et al. 2011; Kaufmann & B. Meyer 2008; Dünser et al. 2006a) los ejemplos en el ámbito que nos ocupa son escasos, más aún mediante dispositivos móviles, en espacios abiertos, y de forma ubicua, como algunos de los casos desarrollados.

Para la validación de esta hipótesis se evalúa la mejora en el rendimiento de los alumnos, divididos en grupos aleatorios que realizaran la experiencia (experimentales) y que no la realizaran (control) a partir de la comparación de resultados PRE y POST la realización de los cursos.

2.3 PASOS COMUNES PARA LA IMPLANTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA.

La metodología que se describe a continuación se refiere a las dos últimas fases de la metodología general resumida en la introducción de este apartado: a los talleres y ensayos participativos, y al análisis y evaluación efectuados. De manera que se detallan aquí, los pasos comunes para la realización de los ejercicios, la evaluación de la usabilidad de los sistemas empleados, y la evaluación del rendimiento académico de los estudiantes.

1. Formación sobre la tecnología a aplicar. En cada caso se procedió a la realización de clases teóricas con información sobre la tecnología a aplicar, software, sistemas, dispositivos, etc....

2. Elaboración de los modelos. Generación de contenidos. Previa introducción de la actividad a realizar, cada participante debía generar contenido propio que poder superponer a la escena utilizando para ello programas gratuitos o con licencia educacional. El conocimiento del modelado de objetos virtuales se supuso ya adquirido durante su formación como ingenieros o arquitectos en las asignaturas cursadas relacionadas con el uso herramientas infográficas para representar y manipular imágenes y modelos virtuales.

3. Registro y presentación de la información: Una vez resueltos y debatidos en cada caso específico los problemas de modelado, registro, texturizado, iluminación y oclusión, inherentes a esta tecnología, se procedió al “registro” (posicionamiento) del modelo en su ubicación real (aula, espacio interior de la escuela o espacio exterior) utilizando sistemas de reconocimiento óptico y GPS. La duración de cada ejercicio varía en cada caso en función de la complejidad del sistema empleado y del tipo de información virtual que el alumno debía generar.

4. Evaluación y análisis de resultados: Con el objeto de validar el grado de satisfacción, la motivación, y la eficiencia y eficacia de los ejercicios se diseñaron encuestas de usabilidad para cada uno de los cursos.

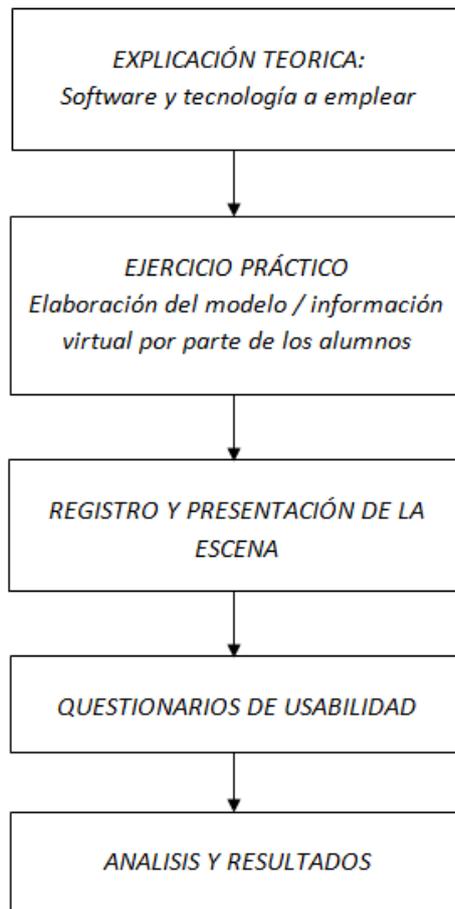


Fig. 12 Proceso común de evaluación de la usabilidad seguido en todos los cursos

En los dos últimos ejercicios, donde los contenidos son visualizados a partir de una aplicación de desarrollo propio, se realizaron además estudios para evaluar la mejora en el rendimiento académico de los alumnos. Divididos en grupo experimental y grupo de control, se estimó la probabilidad de que los grupos fueran coincidentes antes y después (PRE-TEST y POS-TEST) de la realización del curso. Utilizando para ello el procedimiento estadístico desarrollado por Gosset y conocido como t de Student, con el cual es posible hacer estimaciones bastantes precisas a partir de los datos de las muestras obtenidas. El detalle de la evaluación de la usabilidad y el rendimiento se describe a continuación.

2.4 EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD.

La usabilidad no es una cualidad que existe en un sentido real o absoluto. Quizás podría ser resumida como una cualidad general que indica la idoneidad para un determinado propósito de un determinado artefacto (*appropriateness to a purpose*) (Brooke 1996).

El termino tiene relación con el desarrollo de interacciones con productos (pueden ser sistemas, tecnologías, herramientas, aplicaciones, o dispositivos) que sean fáciles de aprender, efectivos y de uso agradable desde la perspectiva del usuario. Pero hasta cierto punto, la usabilidad puede considerarse como un componente más, dentro de un proceso más amplio que es el de la aceptabilidad (*acceptability*) de un sistema. Es decir el proceso de evaluación de si un sistema es lo suficientemente bueno para satisfacer todas las necesidades y requerimientos de usuarios, clientes o gestores (J. Nielsen 1993).

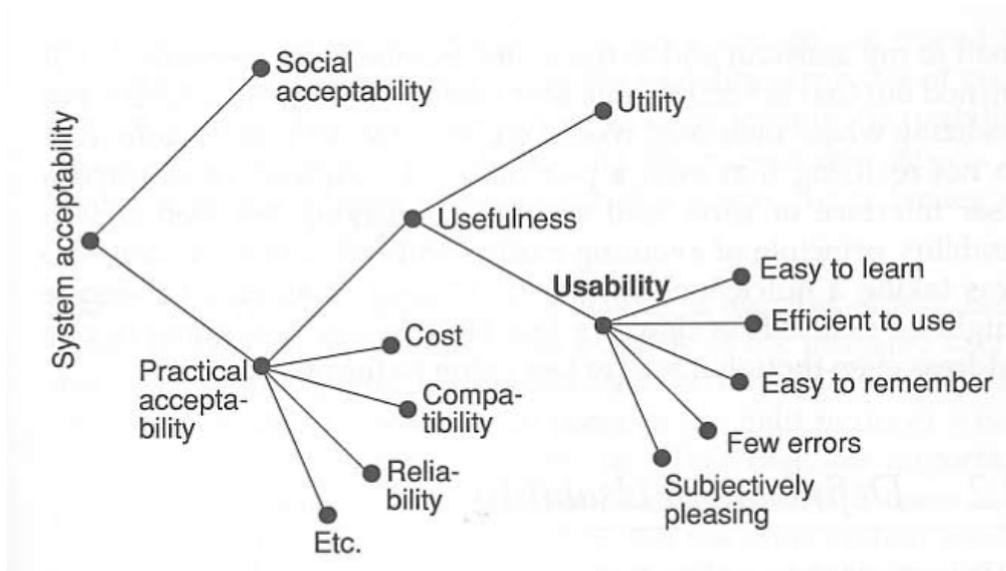


Fig. 13 Esquema de los atributos que componen la aceptabilidad de un sistema. En J. Nielsen (1993)

La norma ISO/IEC 9126 define usabilidad como la “*capacidad de un producto de software de ser entendido, aprendido, usado y atractivo para el usuario, cuando es usado bajo unas condiciones específicas.*” Pero la usabilidad no se limita a sistemas informáticos exclusivamente, sino que es un concepto aplicable a cualquier elemento en el cual se va a producir una interacción entre un humano y un dispositivo.

La norma ISO 9241-11, por su parte, proporciona las directrices relativas a la usabilidad de un determinado producto, definiéndola como “ *El grado en el cual un producto puede ser usado por unos usuarios específicos para alcanzar ciertas metas especificadas con efectividad, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso determinado*”. Esta guía ha servido de modelo en este trabajo. En este documento la efectividad de un sistema está relacionada con sus objetivos (metas), la eficiencia está relacionada con el rendimiento de los recursos empleados para alcanzar esas metas, y la satisfacción se relaciona con aceptabilidad y comodidad (Martin Gutierrez 2010). Esta definición se basa en el concepto de calidad en el uso (*Quality in Use*), y se refiere a cómo el usuario realiza tareas concretas en escenarios específicos de manera efectiva (Bevan 1995). Para este autor la calidad de uso, medida en términos de eficiencia, eficacia, y satisfacción, no viene determinada tan solo por el producto si no que también por el contexto en el que se usa, (tipo de usuarios, las tareas que realizan, el entorno físico). Así la usabilidad entendida como la calidad en el uso de un producto es el resultado de la interacción entre un usuario y un producto mientras se está llevando a cabo una tarea en un entorno técnico, físico, social y organizacional concreto.

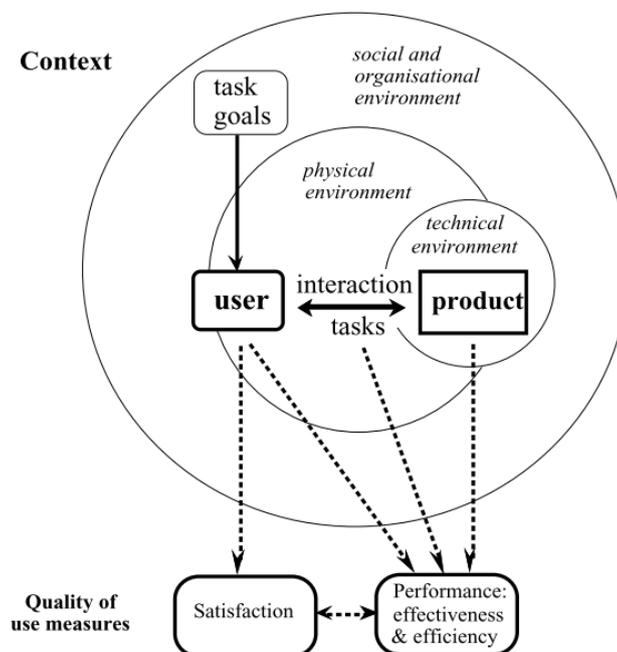


Fig. 14 Medidas de calidad de uso determinadas por el contexto. En Bevan (1995)

En el trabajo desarrollado en esta tesis es importante conocer el grado de satisfacción y opinión que los estudiantes tienen sobre los cursos que han realizado así como la eficiencia y eficacia de los materiales didácticos y metodologías empleadas. Se pretende así realizar un estudio formal basado en estos tres conceptos o medidas de usabilidad, que permita validar la implantación de la tecnología en entornos docentes. Además los resultados permitirán incorporar mejoras en cursos venideros, la mejora de los materiales didácticos aportados, las herramientas utilizadas, etc... para finalmente incrementar la satisfacción de los estudiantes, manteniendo su motivación y participación. Para ello es necesario identificar los factores más relevantes que pueden influir en la valoración de los ejercicios por parte de los estudiantes. Su valoración final extraída a partir de encuestas, permitió cuantificar una vez correlacionada con el resto de variables, la eficiencia y la eficacia de los cursos, así como su opinión, y valoración final.

2.4.1 MEDIDAS DE USABILIDAD.

Es difícil establecer formas de probar, medir, evaluar y comparar resultados cuantificables sobre la experiencia del usuario. Históricamente se han establecido diferentes medidas cuantitativas que permiten conocer el grado de aceptación y uso de un producto. Entendiendo la usabilidad como capacidad de una aplicación o producto para “dejarse usar” con facilidad y de forma intuitiva, ésta no tiene un único componente, y se ha relacionado tradicionalmente con cinco atributos o medidas (J. Nielsen 1993):

- **Facilidad de aprendizaje** (*learnability*): el sistema debe ser fácil de aprender para que el usuario pueda empezar a trabajar con él lo más rápido posible. El término se refiere a la facilidad con que los nuevos usuarios alcanzan un nivel razonable del funcionamiento.
- **Eficiencia de uso** (*efficiency*): El sistema debe ser eficiente en su uso, de manera que una vez el usuario ha aprendido a utilizarlo pueda adquirir un grado alto de productividad. El término se refiere a la facilidad con que el usuario logra este nivel de productividad.

- **Facilidad para Recordar** (*memorability*): El sistema debe ser fácil de recordar, de manera que una vez el usuario ha aprendido como funciona, sea capaz de volver a usarlo después de un periodo de inactividad, sin tener que volver a aprender todo de nuevo.
- **Errores** (*errors*): entendido como los errores que un usuario comete al utilizar el sistema. El ratio de errores debe ser bajo y si se comenten ha de ser fácil la recuperación.
- **Grado de satisfacción** (*satisfaction*): Entendido como la percepción subjetiva del usuario respecto al sistema. En relación a cómo de agradable les resulta su uso.

Cato (2001) en relación al diseño web centrado en el usuario, sugiere además los siguientes atributos:

- **Control:** en el sentido de que los usuarios deben sentir que controlan la aplicación y no que la aplicación los domina.
- **Habilidades:** El sistema apoya y complementa sus habilidades y experiencia
- **Privacidad:** El sistema ayuda a los usuarios a proteger su información o la de sus clientes.

Shackel (2009), por su parte, en línea con J. Nielsen (1993) se refiere a usabilidad como un componente más para llegar a la aceptación de un sistema. Considera que la usabilidad es un factor que influye en la aceptación del producto final por parte de un usuario, junto con otras variables como el coste, la utilidad (*utility*) o lo agradable que le resulta (*likeability*). Define la usabilidad de un sistema como la capacidad de ser utilizado por los seres humanos fácilmente y con eficacia por un determinado tipo de usuarios para conseguir un determinado tipo de tareas. *“The capability in human functional terms to be used easily and effectively by the specified range of users, given specified training and user support, to fulfil the specified range of tasks, within the specified range of environmental scenarios.”* Este autor sugiere como criterios para medir la usabilidad:

- **Eficacia**, desempeño en relación con el cumplimiento de las tareas durante la interacción en términos de rapidez y de los errores.
- **Aprendizaje**, considerando el tiempo que requiere un usuario principiante para aprender a utilizar el sistema con un entrenamiento específico.
- **Flexibilidad**. Facilidad de adaptación de las tareas a situaciones distintas.
- **Actitud**, se refiere a la obtención de niveles aceptables de costes humanos en términos de cansancio, molestia, frustración y esfuerzo personal.

Ahora bien, las medidas de la usabilidad no dependen solo del producto sino también del usuario, de forma que un producto tendrá la capacidad de ser usado en un contexto particular y por usuarios particulares. La usabilidad no puede ser valorada estudiando un producto de manera aislada en un contexto, aunque sea considerado como el más común, ya que muchas de sus características como Accesibilidad, capacidad de aprendizaje, universalidad, o riesgo, pueden medirse en contextos menos comunes (Bevan 2006). En Bevan (1995) en consonancia con la norma ISO, se definen las componentes de usabilidad de la siguiente forma:

- **Eficacia** (*effectiveness*): Entendida como “exactitud e integridad”. Las tareas que se llevan a cabo en el uso de un producto están libres de error. Un producto es eficaz según el grado de exactitud con que se realizan las tareas y cumple los objetivos para los que está diseñado.
- **Eficiencia** (*efficiency*): En relación a "los recursos asignados." La rapidez con que un usuario puede realizar un trabajo es fundamental para la productividad. Un producto es eficiente cuanto más rápido puede realizar las tareas para las que ha sido diseñado.
- **Satisfacción** (*satisfaction*): Relativo al “cumplimiento de las expectativas”. La satisfacción es un factor subjetivo clave para el éxito para cualquier producto. Es fundamental para mantener la motivación del usuario.

Finalmente, en (Hornbak 2006) se revisa la practica actual en las medidas de usabilidad, a partir de la categorización y discusión de más de 180 estudios publicados en las

principales revistas científicas y actas de congresos relativos al HCI (*human Computer interaction*). El autor considera que la usabilidad no puede medirse directamente como tal, aunque sí ciertos aspectos. Planteando el dilema de si lo que se mide es un indicador válido de usabilidad.

2.4.2 CUESTIONARIOS DE USABILIDAD

El estudio de usabilidad se ha llevado a cabo en cada uno de los cursos realizados. Se ha utilizado un cuestionario en formato digital para ser respondido “*on line*”, como herramienta ubicua y ágil, que permite recoger datos referentes a los tres componentes principales de la usabilidad (eficacia, eficiencia y satisfacción).

El uso de cuestionarios ha sido ampliamente recurrente para evaluar interfaces de usuario (Root & Draper 1983; Chin et al. 1988), igualmente lo han sido los cuestionarios digitales (Perlman 1995). Una muestra de cuestionarios específicamente diseñados para evaluar distintos aspectos de la usabilidad, cuya validez y fiabilidad ha sido demostrada puede encontrarse en el capítulo 6 de Tullis & Albert (2008).

Ahora bien, en el diseño de un cuestionario sobre usabilidad la primera pregunta que uno debe hacerse es: ¿cómo medir cada uno de sus componentes?. Frøkjær et al.(2000) plantea medir la eficiencia como el tiempo necesario para realizar una determinada tarea, y la eficacia medida como la calidad en la solución conseguida (*quality of the solution*) expresada en una escala del 1 al 5. En consonancia, Bevan (2006) argumenta que la medida de la eficacia es el valor medio de las respuestas de los participantes (utilizando una escala numérica-graduada) y respecto a eficiencia y satisfacción, será un valor en una escala cualitativa que permitan una reflexión-conclusión en función de cómo se hayan formulado las preguntas.

En nuestro caso, se han diseñado preguntas específicas para cada uno de los cursos, tomando como base la experiencia de Frøkjær et al. (2000) y estudios realizados por Company et al. (2006), Martín Gutiérrez (2010), y MARTÍN DORTA (2011). Otros trabajos consultados para establecer el diseño y el análisis de las encuestas de usabilidad en la

aplicación educacional basada en RA, han sido: Kaufmann & Duenser (2007), Green et al. (2008), S. J. Henderson & Steven Feiner (2009), y (Hornbak 2006)

De manera que, las preguntas de eficacia y eficiencia se han creado utilizando una escala tipo Likert, según la cual, a la pregunta el encuestado le asignará una valoración numérica. El valor asignado indica el grado de acuerdo o desacuerdo con respecto a la pregunta en una escala de 5 puntos, de forma que se responde el cuestionario valorando con precisión el grado de acuerdo sobre las afirmaciones (Brooke 1996). Esta escala es la más utilizada en la investigación de los medios masivos, donde cada opción es valorada y las respuestas de cada encuestado son sumadas para obtener una puntuación única sobre un tema. Las preguntas relativas al grado de satisfacción alcanzado han sido formuladas utilizando igualmente mediante la escala de Likert.

El cuestionario se presenta en formato digital. El acceso a él se realiza a través de la herramienta de la empresa google, que ha desarrollado una herramienta que permite el diseño y la implementación de cuestionarios “*on line*”. Un ejemplo de los cuestionarios utilizados puede encontrarse en:

<https://docs.google.com/spreadsheet/viewform?formkey=df8wTXNMWG0waExSTWNLbXhxVW5GeEE6MA#gid=0>

Los resultados se analizan en cada uno de los cursos realizados y posteriormente se tratan conjuntamente. De manera que cada cuestionario se dividió en 4 apartados A, B, C, D, de acuerdo con la siguiente descripción:

- A: Cuestiones personales relativas al sexo, edad, nombre, estudios etc...
- B: Cuestiones relativas al conocimiento previo de la tecnología. Que fueron cuestiones útiles para valorar el perfil técnico de los alumnos.
- C: Opinión sobre el curso y el material didáctico empleado
- D: Opinión sobre la tecnología de RA y el modelado de objetos en 3D.

Tabla 1 Estructura de los cuestionarios de usabilidad utilizados en los cursos

	Indicador	¿Que mide?
A	Sexo	Datos personales
	Nombre	
	Apellidos	
	Edad	
	¿Has asistido al curso por completo?	
	¿Que asignaturas estas cursando este cuatrimestre?	
	¿Cuántas horas diarias utilizas el ordenador?	
B	[Sistema operativo LINUX-UNIX]	Conocimiento previo
	[Sistema operativo Windows]	
	[Sistema operativo Macintosh]	
	[Procesadores de texto]	
	[Hojas de cálculo]	
	[Bases de datos]	
	[Sistemas de información geográficos (SIG)]	
	[Edición gráfica (fotografía)]	
	[Diseño Asistido por Ordenador (CAD)]	
	[Aplicaciones multimedia]	
	[Navegadores y buscadores de internet]	
[Correo electrónico]		
C	Aplicaciones de Realidad Aumentada	Valoración del curso y del material didáctico
	[Los contenidos teóricos impartidos han sido claros y representativos]	
	[El material del curso tiene una buena y cuidada presentación]	
	[Los ejercicios propuestos han resultado representativos]	
	[El software utilizado es adecuado para el ejercicio propuesto]	
	[El curso realizado cumple la finalidad para la que ha sido diseñado.]	
	[¿Podrías haber aprendido estos contenidos de forma autónoma? (sin necesidad de profesor)]	
	[¿El número de ejercicios propuestos te han parecido suficientes por las horas propuestas de trabajo?]	
	[He sido capaz de resolver los ejercicios propuestos.]	
[Opinión global del curso]		
D	[¿Tenias conocimientos previos sobre el uso del programa de modelado?]	Conocimiento previo
	[¿Tenias conocimientos previos sobre el uso del programa de RA?]	Conocimiento previo
	[¿Te ha resultado complicado entender cómo funciona el programa?]	Eficacia
	[¿Crees que el uso de este programa te será útil en tu futuro como estudiante?]	Satisfacción
	[¿Crees que el uso de este programa te será útil en tu futuro como Ingeniero?]	Satisfacción
	[¿Crees que el uso de esta tecnología te será útil en tu futuro como estudiante?]	Satisfacción
	[¿Crees que el uso de esta tecnología te será útil en tu futuro como Ingeniero?]	Satisfacción
	[¿Crees que esta tecnología podría ser útil en los campos de la ingeniería y la arquitectura?]	Satisfacción
	[¿El hecho de que los modelos incorporen las sombras del entorno real es importante para hacer la escena más realista?]	Eficacia
	[¿Crees que utilizar objetos como <i>occluders</i> ayuda a integrar el modelo en la escena?]	Eficiencia
	Valoración final	Satisfacción

Como se puede ver, a cada una de las preguntas de los apartados C y D se le asigna una de las tres medidas de usabilidad de acuerdo con la definición descrita anteriormente (eficiencia, eficacia, y satisfacción). Así, por ejemplo, a la pregunta sobre el curso, relativa a si los ejercicios han resultado representativos, se le asigna la medida de Eficacia, en tanto que se relaciona con a la integridad de los contenidos. A la pregunta sobre si ¿El número de ejercicios propuestos te han parecido suficientes por las horas propuestas de trabajo? , se le asigna la medida de Eficiencia en tanto que se relaciona con los recursos y la productividad. Tiene que ver pues, con la rapidez con que el usuario realiza el un trabajo. Y finalmente preguntas sobre la utilidad futura del curso, la opinión global, etc.. Se le asigna la medida de Satisfacción, en tanto que se relaciona con la opinión subjetiva del cumplimiento de las expectativas generadas.

2.4.3 ANALISIS DE LOS CUESTIONARIOS DE USABILIDAD

Una de las formas de analizar la información proporcionada por las estadísticas y los cuestionarios realizados, es presentar una batería de indicadores que expresen sintéticamente una situación determinada. Los indicadores son parámetros que proporcionan información y/o tendencias sobre las condiciones y los fenómenos bajo los cuales se han obtenido unos resultados. Pero de manera independiente su interpretación es compleja. Es precisa su agrupación para obtener indicadores de calidad o índices construidos a partir de éstos, con el objeto de proporcionar una interpretación más clara y para que la información pueda presentarse de manera más breve y concisa, de forma que pueda ser entendida y usada fácilmente.

Así por ejemplo al seleccionar una serie de indicadores simples como si los contenidos teóricos han resultado representativos, o si al alumno le ha resultado complicado entender el ejercicio, de manera individual tan solo aportan información cuantitativa, seguramente insuficiente para el análisis del curso. Sin embargo seguramente estos, junto a otros indicadores del cuestionario realizado, están explicando una parte de un valor que no puede medirse con unidades concretas, una variable latente que en este caso podría ser el nivel de Eficacia del curso. Parece necesario pues, la construcción de estos

indicadores de calidad para simplificar mediante la utilización de un modelo, los valores individuales de las variables e indicadores simples obtenidos. Estos indicadores, en nuestro caso el nivel de formación, la eficacia, la eficiencia y la satisfacción, no ofrecen una explicación total de la variable latente, pero bien contruidos, permiten la comparación con el resto de los alumnos, y representan una aproximación útil al estudio de la misma, ayudando a la obtención de conclusiones de una manera más objetiva. Del mismo modo estos indicadores de “calidad” nos ayudaran a obtener un indicador de Usabilidad para cada uno de los alumnos, identificando las variables más significativas para su construcción. Este indicador de calidad que no puede medirse con unidades, pero sí que permiten la comparación entre los alumnos de varios cursos.

Para alcanzar este tipo de resultado se ha actuado afrontando tres etapas:

- En primer lugar se han seleccionado los indicadores determinantes para cada unos de los índices que se pretenden construir. En nuestro caso se han utilizado todas las preguntas del cuestionario.
- En segundo lugar establecer una relación de estos indicadores simples con la variable latente que explican, a partir de una determinada escala cuantitativa permita su construcción. En nuestro caso la relación se establece a partir de un análisis de componentes principales para construir el indicador, del que se hablará más adelante.
- Finalmente y con el objeto de poder determinar en qué medida influye cada una de las preguntas del cuestionario en la construcción del indicador se realiza un análisis de regresión lineal utilizando como variable dependiente el indicador construido y como variables independientes el resto de indicadores simples.

2.4.3.1 ESTÁNDAR DE CALIDAD

Cuando se habla de criterios e indicadores es necesario hablar de estándares de calidad.

Un estándar se define como el grado de cumplimiento exigible a un criterio de calidad. Dicho en otros términos, define el rango en el que resulta aceptable el nivel de calidad

que se alcanza en un determinado proceso.

Los estándares de calidad determinan el nivel mínimo y máximo aceptable para un indicador. Si el valor del indicador se encuentra dentro del rango significa que estamos cumpliendo con el criterio de calidad que habíamos definido y que las cosas transcurren conforme a lo previsto. Estamos cumpliendo con nuestro objetivo de calidad. Si, por el contrario, estamos por debajo o encima del rango significa que no cumplimos nuestro compromiso de calidad y deberemos actuar en consecuencia.

En el presente estudio, en tanto que los valores obtenidos no son índices que se puedan cuantificar, el estándar de calidad se basa en el valor de la desviación estándar del conjunto de respuestas obtenidas. Así un valor que se encuentra dentro del rango de esta desviación debe ser considerado por comparación con el resto del alumnado como normal.

2.4.3.2 EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Dado que gran parte del interés de esta tesis es calificar y organizar los tres componentes de la usabilidad, para su ponderación y comparación posterior, se hace necesaria la utilización de técnicas de análisis multivariante para sintetizar el conjunto de respuestas obtenidas para cada pregunta y poder así relacionarlas y construir cada uno de los indicadores que nos ocupan. En nuestro caso, como se ha dicho, nivel de formación, la eficacia, la eficiencia y la satisfacción. Los tres últimos igualmente servirán para la construcción del indicador de usabilidad final.

En nuestro caso se ha utilizado el Análisis de Componentes Principales (ACP). Brevemente, se trata de una técnica estadística ampliamente utilizada (T. W. Anderson 1984; Hair et al. 1999; Jolliffe 1986; JOHNSON 1999) de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables) de una determinada base de datos. Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible y obteniendo el “autovalor” de cada componente en la construcción del indicador. Los componentes principales o factores

serán una combinación lineal de las variables originales (preguntas del cuestionario), y además serán independientes entre sí.

Un aspecto clave en ACP es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales (habrá, pues, que estudiar tanto el signo como la magnitud de las correlaciones).

En general se divide en las siguientes fases:

- Análisis de la matriz de correlaciones

Un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y, por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

- Selección de los factores

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.

- Análisis de la matriz factorial

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de ésta representa los coeficientes factoriales de las variables (las correlaciones entre las variables y los componentes principales). La matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables.

A modo de ejemplo, se muestra a continuación la matriz de correlaciones resultante del análisis de componentes principales realizado sobre las preguntas relacionadas con la eficiencia y la eficacia del curso.

Tabla 2 Matriz de componentes principales rotada (varimax) y normalizada sobre las cuestiones relacionadas con la Eficiencia de los cursos realizados.

Preguntas (variables)	Componentes		
	1	2	3
W_learn_indep (¿Podrías haber aprendido estos contenidos de forma autónoma? (sin necesidad de profesor))	0.1057	0.002	0.9565
W_num_exercises (¿El número de ejercicios propuestos te han parecido suficientes por las horas propuestas de trabajo?)	0.6977	0.157	0.3009
W_solve (He sido capaz de resolver los ejercicios propuestos)	0.8754	-0.091	0.1167
W_Global_opinion (Opinión global del curso)	0.7629	0.3811	-0.293
T_occluders (¿Crees que utilizar objetos como <i>occluders</i> ayudan a integrar el modelo en la escena?)	0.096	0.9762	0.0209

Como se puede observar el componente 1 tiene que ver con el hecho de haber sido capaz de resolver los ejercicios y con su opinión general sobre el curso realizado. El componente 2, básicamente se relaciona con el uso de objetos que comportan como *occluders* para ayudar a integrar el modelo en la escena (hacerla más fácil de entender, más eficiente) y el componente 3 se relaciona con el hecho de que el alumno haya sido capaz de resolver los ejercicios de forma independiente. Con estos tres factores se explica el 81% de la varianza, representada por cada uno de ellos con distintos porcentajes, con lo que cada componente tiene un “autovalor” (*Eigenvalues*) distinto, que se utilizará para la construcción del indicador de Eficiencia final.

Tabla 3 Autovalor y Porcentaje de varianza explicada de cada uno de los factores principales del indicador de Eficiencia.

	Componentes		
	1	2	3
autovalor	1.855	1.131	1.105
Porcentaje de Varianza explicada	37.107	22.621	22.110

Se muestra a continuación el análisis de componentes de las variables relacionadas con la eficacia.

Tabla 4 Matriz de componentes principales rotada (varimax) y normalizada sobre las cuestiones relacionadas con la Eficacia de los cursos realizados.

Preguntas (Variables)	Componentes		
	1	2	3
W_contents (¿Los contenidos teóricos impartidos han sido claros y representativos?)	0.8066	0.1415	0.0023
W_material (El material del curso tiene una buena y cuidada presentación)	0.9072	0.1064	0.0399
W_exercises (Los ejercicios propuestos han resultado representativos)	0.8859	0.1189	-0.059
W_software (El software utilizado es adecuado para el ejercicio propuesto)	0.7352	0.3652	-0.112
T_hard_program (¿Te ha resultado complicado entender cómo funciona el programa?)	-0.036	0.0486	0.9948
T_shadows (¿El hecho de que los modelos incorporen las sombras del entorno real es importante para hacer la escena más realista?)	0.2185	0.9605	0.065

En este caso, el componente 1 tiene que ver con el hecho de considerar el material, los contenidos teóricos y los ejercicios empleados, claros y representativos. Y en menor medida con el software empleado. El componente 2, básicamente se relaciona la importancia de la integración lumínica en la escena, y el componente 3 se relaciona con el hecho de que al alumno le haya sido difícil entender el funcionamiento del programa.

En este caso sin embargo, el tercer componente debe invertirse, ya que cuanto mayor sea la ponderación del alumno a esta respuesta (más complicado), menos eficaz resultará el curso. Los tres factores explicaron el 83% de la varianza de acuerdo con los siguientes porcentajes:

Tabla 5 Autovalor y Porcentaje de varianza explicada de cada uno de los factores principales del indicador de Eficacia

	Componentes		
	1	2	3
autovalor	2.848	1.104	1.011
Porcentaje de Varianza explicada	47.467	18.395	16.856

2.4.3.3 CONSTRUCCIÓN DEL INDICADOR DE CALIDAD

Una vez estimados los componentes principales y las tasas de contribución de los mismos se procede a calificar a cada uno de los alumnos de acuerdo al índice que se está derivando, a partir de una expresión general que pondera las puntuaciones alcanzadas para cada componente principal, por la raíz cuadrada de su varianza (W. S. Peters & Butler 1970a).

$$I_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^r Z_{rj} \cdot \sqrt{\lambda_r}}{\sum_{i=1}^r \sqrt{\lambda_r}}$$

Fig. 15 Ecuación para construir el indicador de calidad a partir de cada componente y sus “autovalores”. En W. S. Peters & Butler (1970)

Donde: **I_{mj}** representa el indicador compuesto que se quiere obtener (Eficiencia, Satisfacción, Eficacia, etc...) para cada alumno j -ésimo; **Z_{rj}** es la puntuación del componente r -ésimo (factor) para el alumno j -ésimo ; y **$\sqrt{\lambda_r}$** , la raíz cuadrada del “autovalor” para dicho componente, garantizando así que los componentes con una mayor varianza explicada tengan una mayor ponderación en la calificación del índice⁸.

El índice obtenido para cada indicador de calidad, ilustra la situación de cada alumno en comparación con el resto. Una vez normalizados, se comparan y correlacionan entre sí. Finalmente el indicador de usabilidad obtenido también es comparado con el rendimiento de los alumnos.

El detalle y el análisis de los resultados obtenidos se describen en el capítulo VIII, “análisis de Resultados”.

⁸Azqueta Oyarzun & Delacamara Andrés (2004)) emplean esta técnica en la búsqueda de un indicador global de calidad ambiental.

2.5 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ACADEMICO

Previa a la descripción de la evaluación del rendimiento académico es preciso delimitar el concepto, que dado el carácter multidimensional del término, resulta complicado. En ocasiones se le denomina aptitud escolar, desempeño académico o rendimiento escolar, pero generalmente las diferencias de concepto sólo se explican por cuestiones semánticas ya que se utilizan como sinónimos. (Serra 2007)

Tradicionalmente se ha considerado al “Rendimiento Académico” como una función de la inteligencia, aunque es aceptado que muchos otros factores como la personalidad, el estilo cognoscitivo (la percepción, la memoria) o la clase social, pueden influir en él. Uno de los factores principales que afectan al rendimiento es el del autoconcepto (Marsh 1990). Purkey (1970) lo define como “un sistema complejo y dinámico de creencias que un individuo considera verdaderas respecto a sí mismo teniendo cada creencia un valor correspondiente”. Epstein (1981), por su parte completa esta definición al definirlo como “un conjunto de teorías o representaciones acerca de sí mismo y del mundo, que incluyen imágenes y juicios, no solo conceptos, y que sirven al individuo para manejar la realidad y hacerle frente”. El autoconcepto pues, comporta juicios evaluativos o de autovaloración que constituyen lo que llamamos autoestima, formando ésta parte de él. Pero el término engloba otros aspectos corporales, psicológicos, sociales y morales. Las múltiples investigaciones que lo abordan coinciden en relacionarlo en más o menos grado, con las experiencias y/o logros escolares de los alumnos y en general, los datos disponibles parecen ofrecer más apoyo a la hipótesis de la supremacía de la influencia del autoconcepto sobre el rendimiento del alumno, que al contrario (González-pienda et al. 1997)

Son muchos los autores que han propuesto definiciones sobre el rendimiento académico que encierran multitud de variables y factores que pueden influir en él. Siguiendo a Alvaro Page et al. (1990) se muestran algunos conceptos o enfoques que han intentado acotar el concepto:

- La concepción del rendimiento basada en la voluntad. Según la cual el que un alumno rindiese o no dependía de su buena o mala voluntad. Olvidando factores individuales y sociales que inciden en el éxito o fracaso escolar, como son el nivel intelectual, las aptitudes, actitudes y ciertas condiciones de vida de los alumnos.

- El rendimiento desde el punto de vista de la capacidad. Se pueden hacer críticas similares. Según esta perspectiva si un niño no rinde es porque no tiene capacidad suficiente. Se suele esperar de un estudiante que tiene buena capacidad un alto nivel de rendimiento. Pero ésta es sólo una verdad a medias. Hay que tener en cuenta que en el rendimiento influyen otros elementos como pueden ser la aplicación o esfuerzo del estudiante, así como condiciones temperamentales y situacionales del mismo.

- Rendimiento como el resultado del trabajo escolar. Donde lo realmente necesario es que el alumno llegue a sentirse capaz de llevar a la práctica sus conocimientos, que pueda aplicar la información adquirida a través de nuevas coyunturas y problemas. Se trata de ver en qué medida el alumno utiliza lo que ha aprendido para aplicarlo a nuevas situaciones. De esta forma el rendimiento se entiende como resultado de una conducta.

En nuestro caso, desde el punto de vista didáctico, el rendimiento se manifiesta y se valora a partir del aprendizaje escolar, controlado por medio de los exámenes, pruebas objetivas, observación del profesor, etc.(Alvaro Page et al. 1990). Indudablemente las calificaciones escolares están sujetas a factores subjetivos del profesor como valoraciones, atribuciones y expectativas, y además se ven influenciadas por otros factores como el tipo de centro educativo, lo que no confiere a este tipo de medidas un nivel suficiente de fiabilidad y validez. Pero en general todos los autores están de acuerdo en que, a pesar de las dificultades que traen consigo, las notas escolares son las mejores medidas con que podemos contar, siempre y cuando esas calificaciones no reflejen el concepto tradicional que de ellas se ha tenido como reflejo de una concepción “bancaria” de la educación en la que se impone el saber al educando, que permanece pasivo. (Serra 2007).

De esta forma, en la evaluación efectuada en la presente tesis se ha asociado el concepto de rendimiento académico al reflejo de las calificaciones que los alumnos obtienen en un curso. Aunque, hay que tener siempre en cuenta que las calificaciones escolares poseen un valor relativo como medida de rendimiento, ya que no existe un criterio estandarizado para todos los centros, para todas las asignaturas, para todos los cursos y para todos los profesores. Estas notas son también producto social, en cuanto que responden a lo estipulado por la legislación educativa y son un indicador de la capacidad productiva del alumno. Esta productividad, en ocasiones aún potencial, va a configurar las posibilidades sociales y profesionales del alumno.

2.5.1 MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO.

Dado que el aprovechamiento escolar no es observable ni cuantificable de forma directa, se hace necesario definirlo mediante una serie de mediciones operativas que nos permitan averiguar lo que sabe y no sabe el alumno. Dichas mediciones, a pesar de lo que pudiera considerarse, son bastante sencillas y como afirma Castejón Costa (1996) gran parte de los estudios sobre el tema, como en nuestro caso, toman como indicadores del rendimiento académico las calificaciones escolares y las pruebas objetivas. En nuestro caso se toma esta medida para analizar la mejora del rendimiento utilizando un Índice Relativo (IR); cuya fórmula es:

Fig. 16 Ecuación el indicador de rendimiento a partir de las calificaciones de los estudiantes

- = calificación relativa del estudiante en la asignatura i.
- = calificación (base 10) obtenida por el estudiante en la asignatura.
- = calificación mínima (base 10) de la asignatura i en la sección j.
- = calificación máxima (base 100) de la asignatura i en la sección j.

El índice por alumno así obtenido servirá para compararlo con el índice de usabilidad extraído de acuerdo a la metodología anterior, y otras variables que pueden resultar de interés.

Ahora bien, en esta tesis, es importante, no solo establecer un indicador de rendimiento para los alumnos que utilizan la tecnología, si no que se pretende evaluar si éstos obtienen mejores calificaciones en comparación con el resto (que no la utilizan). Para ello es necesario comparar sus calificaciones en un test preliminar (PRE-TEST) i contrastarlas con los resultados de sus calificaciones obtenidas después de hacer el curso (POST-TEST). Para ello, en los cursos donde se evalúa el rendimiento (los dos últimos, APF y PT_II) los alumnos se dividieron en dos grupos, grupo experimental, que realiza la práctica con RA, y uno o más grupos de control, que realizan el curso de manera convencional.

Al tratarse de grupos reducidos, no podemos basarnos estrictamente en las medias de cada grupo, sino que debe estimarse la probabilidad de que los grupos sean coincidentes antes y después de la realización del curso (PRE-TEST y POS-TEST). Se utiliza para ello el procedimiento estadístico desarrollado por Gosset (1908) y conocido como t de Student, con el cual es posible hacer estimaciones bastantes precisas a partir de los datos de las muestras obtenidas a pesar de ser escasas, y del que se habla más adelante.

De manera que previo a la realización del curso, los alumnos son divididos aleatoriamente en uno o más grupos de control (que no realizaran el curso de RA), y un grupo experimental (que realizara la práctica con RA).

Con el objeto de verificar que los grupos son inicialmente similares, es decir que la variación en las calificaciones (PRE) entre los diferentes grupos no resulta significativamente mayor que la variación existente dentro de los grupos, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA), que permitió contrastar esta hipótesis nula (h_0) de que las calificaciones de distintos grupos coinciden (no existen diferencias). En lugar de utilizar la distribución t-Student que en nuestro caso representaría contrastar tres o más hipótesis pues los grupos siempre fueron más de dos.

Por ejemplo, en el caso de existir tres grupos, dos de control 1 y 2 y un grupo experimental (3) Supondría establecer tres hipótesis

$$H01: \mu 1 = \mu 2; H02: \mu 2 = \mu 3; \text{ y } H03: \mu 1 = \mu 3$$

Si lo hiciéramos así, rechazar cualquiera de las 3 hipótesis nulas implicaría rechazar la hipótesis nula inicial de que las tres medias coinciden. Por el contrario, si no rechazásemos ninguna de las 3 hipótesis, tampoco rechazaríamos la hipótesis inicial. Pero el problema de este método es doble: por un lado, se requiere de un mayor esfuerzo computacional, y por otro, al hacer un mayor número de contrastes aumenta la probabilidad de rechazar la hipótesis nula siendo ésta cierta. El uso de las técnicas ANOVA nos permiten eludir ambos problemas. El análisis de varianza (ANOVA) para las medidas de las calificaciones "PRE" en los grupos, nos permite establecer si hay diferencias significativas entre los grupos en cuanto a sus calificaciones antes de realizar el entrenamiento, aceptando o rechazando la hipótesis nula (no existen diferencias) de que todos los grupos son estadísticamente iguales en su calificación antes de realizar este curso. El intervalo de confianza se estableció en 0.05. De manera que si el p-valor de vuelta es igual o superior a 0.05 se acepta la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas entre grupos.

Al terminar el curso propuesto los alumnos entregan sus propuestas que se valoran según la metodología descrita en cada ensayo. Se comparan los resultados entre grupos y debe verificarse que el aumento o decremento en las calificaciones sea estadísticamente significativo. Para ello se considera como hipótesis nula (H_0), el hecho de que los valores medios de las calificaciones no varían al término del entrenamiento propuesto, es decir, no varían. Se comparan entonces, los valores medios obtenidos en el PRE y POST-TEST para cada curso utilizando la prueba t de Student para series pareadas. Y a continuación se comparan los grupos entre sí. El valor de p o la significación estadística devuelta, nos permite establecer las probabilidades de que los grupos sean coincidentes en sus calificaciones. Aceptando o rechazando las hipótesis nulas iniciales.

El esquema seguido para la evaluación del rendimiento se muestra a continuación.

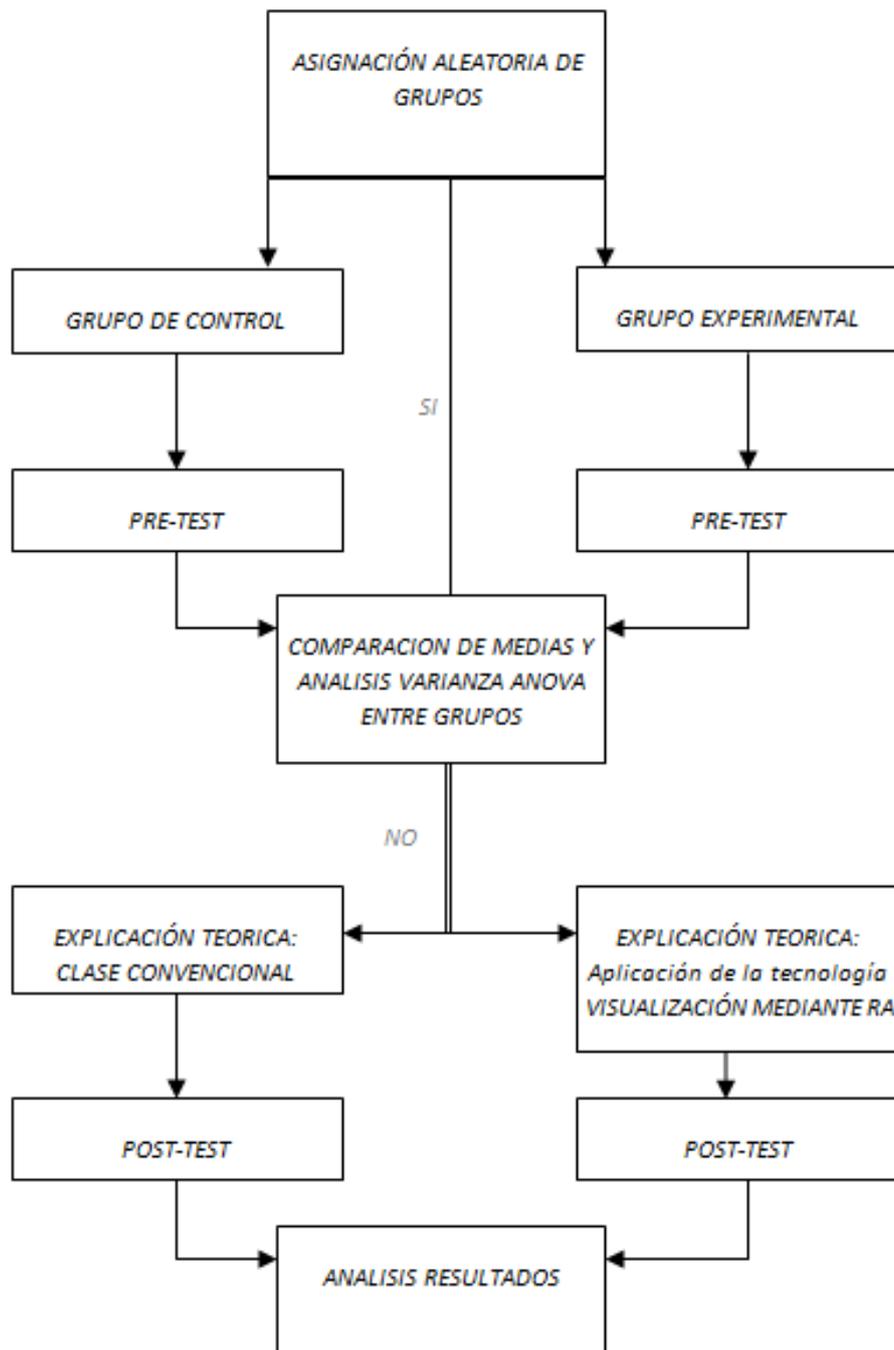


Fig. 17 Esquema de la evaluación del rendimiento realizado en los cursos APF y PT_II

2.5.2 ANALISIS T-STUDENT

En estadística, una prueba t-Student, o Test-T es cualquier prueba en la que el estadístico muestral utilizado tiene una distribución t de Student si la hipótesis nula es cierta. Esta

distribución de probabilidad, es una función que asigna a cada suceso definido sobre una variable aleatoria la probabilidad de que dicho suceso ocurra. Y está completamente especificada por la función de distribución, cuyo valor en cada x real es la probabilidad de que la variable aleatoria sea menor o igual que x .

Se aplica cuando la población estudiada sigue una distribución normal pero el tamaño de la muestra obtenido es demasiado pequeño como para que el estadístico en el que está basada la inferencia esté normalmente distribuido, utilizándose una estimación de la desviación estándar en lugar del valor real.

EJEMPLO

Queremos estimar la probabilidad de las calificaciones PRE y POST de un grupo formado por 25 alumnos sean coincidentes, utilizando para ello el procedimiento estadístico basado en la distribución t-student. El grupo obtiene las siguientes calificaciones.

Grupo experimental	nota_pre	nota_post	ganancia
Media	6,1988	7,1780	,9792
Desviación Estándar	1,9056	1,5992	2,5245

Nos proponemos comparar el valor de las medias aritméticas obtenidas para nota_pre () y nota_post () de la muestra para confirmar que las diferencias sean estadísticamente significativas. Es decir que existan muy pocas posibilidades (menos del 5%) de que las medias puedan considerarse iguales. Establecemos como Hipótesis nula (H_0) que las dos medias son iguales (no existen diferencias significativas.) El contraste estadístico se realiza por “comparación de medias en poblaciones pareadas”, ya que el numero de muestras es el mismo antes y después.

En este caso el estadístico t-Student la diferencia entre las dos medias se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{s_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \text{ y se rechaza la hipótesis nula (H}_0\text{) si}$$

Donde, $t_{\alpha/2, n-1}$ es un valor que se busca en tablas de distribución t-student. En nuestro caso:

$$t_{0.05/2, 24} = 2.064$$

Consultando la tabla de T-Student (dos colas) observamos que para 24 (N-1) grados de libertad y una probabilidad del 5% (0,05) obtenemos $t = 2,064$.

Tabla 6 Valor T obtenido para 24 grados de libertad y una probabilidad del 5%

df	.20	.10	.05	.02	.01
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
...
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
....
χ	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

Puesto que nuestro valor (1,9393) es menor que el valor t de la tabla no podemos rechazar la hipótesis nula. Al aceptarla afirmamos que no existen diferencias significativas entre los grupos, pues la probabilidad de que las medias de los grupos sean significativamente iguales es algo mayor del 5%, valor establecido inicialmente como límite. Si la desviación estándar de la ganancia hubiera sido un poco menor (ej: 2,16), el valor T obtenido sería:

$$t = 2.16$$

Valor en este caso mayor al valor de referencia y hubiéramos rechazado entonces H_0 , afirmando en su lugar, que las diferencias son significativas.

Gráficamente se explica así:

$$t = 2.16$$

$$t = 2.16$$

$$t = 2.16$$

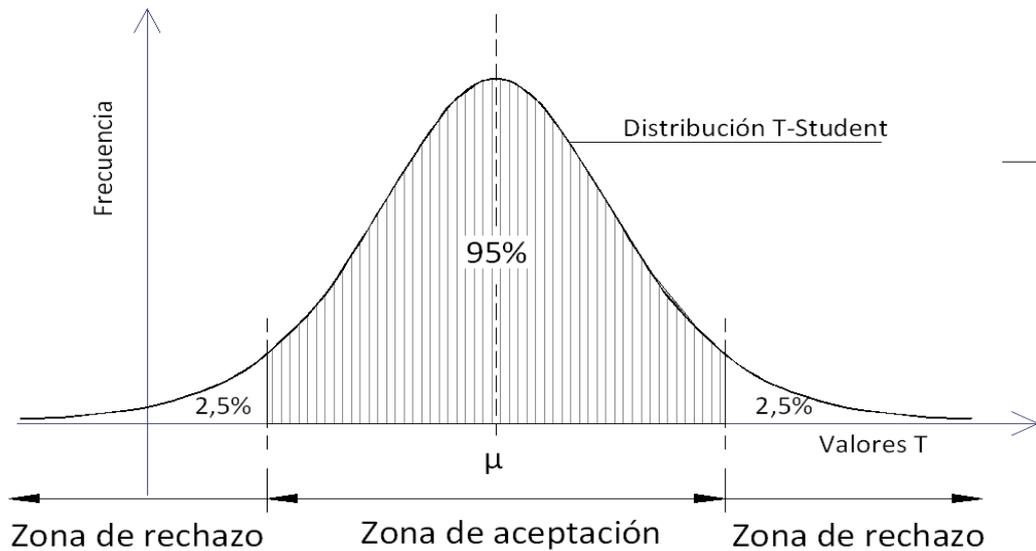


Fig. 18 Ejemplo de distribución T-Student.(dos colar). Zona de rechazo y zona de aceptación.

En una serie de resultados que siguen una distribución T-Student, los valores más frecuentes se concentrarían en la zona central de la curva de distribución. Si establecemos un intervalo de confianza del 95%, habrá un determinado valor por encima del cual debe rechazarse la hipótesis nula por existir muy pocas probabilidades de que se cumpla. Este valor T es el que puede consultarse en la Tabla referida, y que varía en función de los grados de libertad y el intervalo que se quiera establecer para aceptar o rechazar la hipótesis. En nuestro caso 24 y 95%, respectivamente. Si centramos la atención en el extremo:

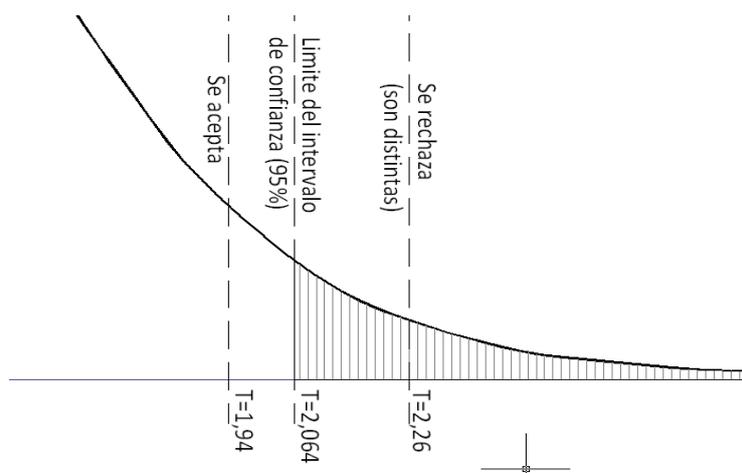


Fig. 19 Ejemplo grafico de los valores obtenidos.

Esta búsqueda del valor t a partir de tablas se ha planteado para comprender mejor el razonamiento estadístico, sin embargo, las tablas y resultados que se muestran en los casos de estudio que se analizan, han sido procesados con el software estadístico SPSS, el cual nos permite identificar si las diferencias son o no significativas directamente pues nos entrega el valor de la probabilidad "Sig. (2-tailed)" (dos colas) para el valor t obtenido. Así si valor de p o la significación estadística es mayor a 0,05, significa que existe alguna probabilidad (mayor de 5%) de que los grupos sean coincidentes en sus calificaciones y por tanto debe aceptarse la hipótesis nula de que no existen diferencias. Si el valor, en cambio se sitúa por debajo de 0,05 se rechazará la hipótesis nula (son iguales), afirmando entonces, con muy pocas probabilidades de equivocarnos, que los grupos son distintos.

2.6 PLAN DE TRABAJO

Se ilustra a continuación el plan de trabajo seguido. En él se reflejan cronológicamente los hitos más importantes, los ensayos realizados, y publicaciones efectuadas, o admitidas y pendientes de publicación, ya sean como ponencias en congresos o publicaciones en revistas y libros.

CALENDARIO	HITOS		E N S A Y O S		DIFUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN		
	Tareas para la redacción de la tesis		Estudio de viabilidad / Ensayos en plataformas existentes / U-AR		REVISTA / LIBROS	CONGRESOS	
2010	JUN	Investigación del estado del arte de la tecnología. Marco teórico y fundamentación pedagógica y didáctica	Preparación y desarrollo hipótesis y modelos del caso de estudio				
	JUL						
	AGO						
	SEPT		Visita al lugar. Ensayos de visualización sobre el lugar mediante ordenadores portátiles.				
	OCT						
	NOV	Redacción propuesta de Tesis	Análisis de resultados, conclusiones y redacción ensayo.				
	DIC						
	2011	ENE	Presentación Propuesta Tesis doctoral				
		FEB					
		MAR	Investigación sobre los dos sistemas de registro más comunes en dispositivos móviles (GPS y reconocimiento óptico), software y tecnología existente	Selección y desarrollo de material didáctico y de los ejercicios a llevar a cabo en los estudios preliminares.			IX International Forum Le Vie dei Mercanti S.A.V.E. "Gironella tower in Gerunda, teaching roman architecture, using 3D modeling and augmented reality. A case study". Texto completo en actas de congreso
ABR							
MAY							
JUN		Planteamiento de los cursos a realizar. Evaluación de la tecnología y Estudio procesos de evaluación usabilidad y mejora en el rendimiento académico	Workshop BEST		DICTAP2011 - International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications. "Visual interfaces and user experience: augmented reality for architectural education: one study case and work in progress". Texto completo en actas de congreso		
JUL							
AGO							
SEPT							
2012		OCT	Desarrollo aplicación propia de realidad aumentada U-AR para ser evaluada en entornos docentes.	Evaluación y conclusiones del ensayo. Preparación contenidos cursos siguientes		7th VCT International Conference on Virtual Cities and Territories. "La ciudad como aula digital: enseñando urbanismo y arquitectura romana mediante el mobile learning. Un estudio de viabilidad". Texto completo en actas de congreso	
	NOV	Curso DAC (interiorismo)					
	DIC	Curso EG III					
	ENE	Evaluación y conclusiones del ensayo					
2012	FEB	Creación estructura de base de datos LAYAR, basada en registro GPS	Preparación contenidos, modelos y material del curso. LAYAR. BKC		JITAE. Journal of Information Technology and Application in Education. Vol1. Is. 1. "Augmented Reality in Architecture Degree. New Approaches in Scene Illumination and User Evaluation".		
	MAR						
	ABR	Curso LAYAR.	Preparación de contenidos curso de APF. ESCULTURAS en Plaza pública mediante U-AR	UbiCC Journal. Special Issue on Visual Interfaces and User Experience. "AR on architectural and building engineering learning processes. Two study cases"			
	MAY		Evaluación de resultados y actualización de contenidos				

(continua)

2012	JUN	Recopilación y análisis estadístico de resultados mediante SPSS. Establecimiento de conclusiones	Curso APF. ESCULTURAS	ACE@ AÑO 7, núm. 19. "la ciudad como aula digital. Enseñando urbanismo y arquitectura mediante mobile learning y la realidad aumentada. un estudio de viabilidad y de caso"	CISTI'2012 - 7ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información. "Teaching evaluation using Augmented Reality in Architecture. Methodological proposal". Texto completo en las actas del Congreso
	JUL		Análisis de resultados	Capítulo del libro " Social Media and the New Academic Environment " . Con el título "Implementation of Augmented Reality in "3.0 Learning" Methodology: Case Studies with Students of Architecture Degree". Publicado por IGI global 2013..	CISTI'2012 - 7ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información. "Lighting simulation in augmented reality scenes. Teaching experience in interior design" Texto completo en actas de congresos.
	JUL		Preparación caso de estudio en tareas de rehabilitación. Ing. de la Edificación mediante U-AR		
	AGO	Redacción del documento de TESIS DOCTORAL	Curso PT_II.		
	SEPT		Análisis de resultados		WCLTA 2012. 3rd world Conference on Learning, teaching and Educational Leadership. Oct. 2012. Bruselas. "Visualization methods in architecture education using 3D virtual models and augmented reality in mobile and social networks". Ponencia realizada 27/10/2012
	OCT				ACM conference. Nara. 2012, Japon. UXeLATE'12 "Workshop on User Experience in e-Learning and Augmented Technologies in Education". Título: "Developing an Augmented Reality application in the framework of Architecture Degree".. Ponencia realizada 2/11/2012
	NOV				
	DIC	Revisiones y correcciones del documento de TESIS		CHB. Computers in Human Behavior. "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models." Aceptado. Ref: CHB-D-13-00099R1	
	ENE				
	FEB				
	MAR				WCISTI'13. Algarbe. "Construction processes using mobile augmented reality. A study case in Building Engineering degree." Ponencia realizada el 27/03/2013



3 CAPITULO III. MARCO GENERAL DE REALIDAD AUMENTADA

3.1 CONCEPTO

A principios de los años 90 el término de Realidad Aumentada “*Augmented Reality*” empezó a aparecer en la literatura con relativa frecuencia, sin embargo no existía todavía una definición consistente y clara que delimitara el marco de referencia tecnológico. El concepto fue definido por Milgram & Kishino (1994)⁹ que revisa el alcance del término (AR), en relación con un concepto de carácter más amplio conocido como “*Mixed Reality*” (MR). Para Milgram & Kishino (1994) existe entre los extremos (Real-Virtual), un espacio intermedio, de *realidad mezclada*, donde en función de la cantidad de entorno generado por ordenador, se puede establecer una clasificación. Que va desde el entorno completamente real al completamente virtual, pasando por los estados intermedios de Realidad Aumentada (Augmented Reality, AR) y Virtualidad Aumentada (Augmented Virtuality, VA). Esta transición de espacios intermedio entre realidad-virtualidad, será conocido comúnmente como el “continuo de Milgram”

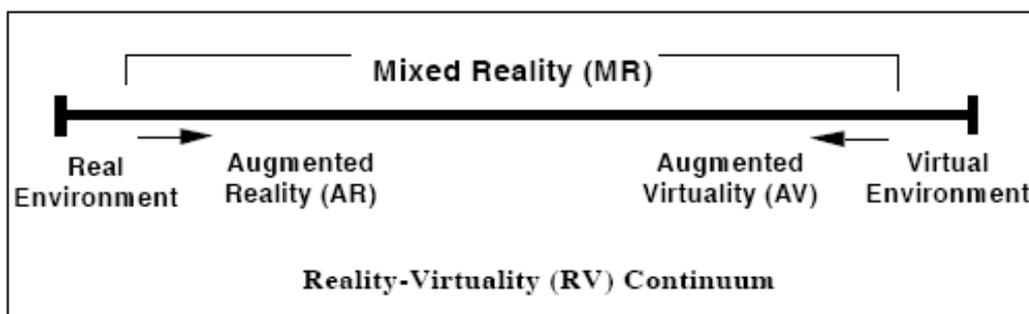


Fig. 20 Representación simple del continuo de Milgram. Fuente: Milgram & Kishino (1994)

Sin embargo, “*la transición entre un mundo puramente virtual y la virtualidad aumentada, o entre la virtualidad aumentada y la realidad aumentada puede ser muy sutil, dándose el caso de que algunas aplicaciones rocen el límite entre una categoría u otra.*” (Portales, 2008, 61)

⁹ Milgram describe los dos sistemas principales: *see-through and monitor-based video AR displays*, y propone un sistema de clasificación de los diversos sistemas de visualización (siete tipos) en base a tres ejes (o factores esenciales).

En términos generales podemos decir que en un entorno virtual en el que no existe ninguna conexión o enlace (generalmente visual) con el mundo real, es un entorno de realidad virtual; si el entorno creado es esencialmente virtual pero existe alguna representación (como una imagen o vídeo) del mundo real, hablaríamos de virtualidad aumentada; si el entorno es principalmente real y existen algunos elementos virtuales, nos referiremos a la Realidad Aumentada. De manera que parece existir una relación directa entre la cantidad de información digital generada en la escena y el tipo de tecnología al que nos referimos.

Así, mientras las técnicas de realidad virtual sumergen al usuario en un entorno completamente artificial y éste no es capaz de percibir su entorno real, las técnicas de RA se basan en la combinación de la información de un escenario real con información virtual superpuesta. De manera que el usuario percibe un **escenario mixto** donde la Realidad Aumentada **completa** la percepción e interacción del usuario con su mundo real, proporcionando información adicional en lugar de remplazarlo completamente (R. T. Azuma 1997).

De manera que, debemos entenderla como una tecnología versátil y de aplicación en numerosos campos de forma que podemos encontrar aplicaciones de esta tecnología en áreas como medicina, ingeniería, cultura, educación, marketing y publicidad, etc... En una aplicación de realidad virtual, el usuario se sumerge en un mundo totalmente sintético en el que es posible interactuar y obtener respuesta permaneciendo aislado del mundo real. Sin embargo, en una aplicación de RA el usuario interactúa con el mundo físico y real que le rodea, sobre el que se añaden objetos virtuales generados por ordenador. La percepción visual que el usuario tiene sobre los objetos reales y virtuales es la misma.

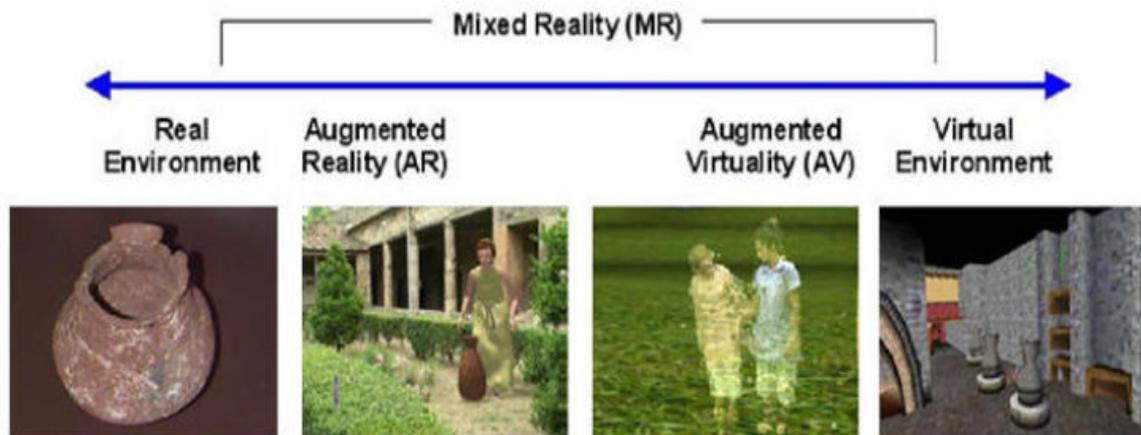


Fig. 21 Imágenes de ejemplos de los tipos de realidad a partir del continuo de Milgram. En Noh & Sunar (2009)

Desde el punto de vista conceptual, como se verá, *“la idea de proporcionar datos adicionales a un entorno real, ni es novedosa, ni surge con los sistemas digitales actuales de realidad aumentada”* (Ricart 2008, p 70). Claro ejemplo de ello supone el fotomontaje arquitectónico de larga tradición durante el siglo XX (Ernest Redondo, Sanchez Riera, et al. 2012). Además para acotar la investigación, si bien es cierto que la realidad puede *“aumentarse”* de muchas formas (no exclusivamente mediante la tecnología), el término de *“realidad aumentada”*, aparecido con cierta frecuencia en los primeros años de la década de los 90, siempre aparece ligado a la utilización de unas determinadas técnicas y procesos digitales utilizados para añadir información virtual al mundo real, y es al uso de esta tecnología al que nos referiremos al hablar de Realidad Aumentada. Y dentro de este *“aumento”* de información, nos referiremos al que se produce de forma visual, dejando de lado otros interfaces táctiles (hápticos), sonoros, olfativos, o gustativos, que si bien pueden darnos información adicional sobre nuestro entorno, también a través de la tecnología, no son objeto de esta tesis.

3.2 DEFINICIONES

La Realidad Aumentada (RA), como hemos comentado, es una disciplina relativamente nueva. Las primeras referencias que podemos encontrar restringían la RA a aquellos sistemas que utilizan dispositivos tipo “cascos” o *Head Mounted Displays* (HMD) (Caudell & Mizell 1992; Janin et al. 1993), que dotados de un sensor de posición y orientación, software y una serie de dispositivos electrónicos de soporte permitían al usuario ver su entorno como una superposición de gráficos generados por ordenador. Pero esta definición apuntaba un carácter exclusivamente visual. Definiciones posteriores extienden el concepto de RA, abriendo el campo a otros dispositivos y a contenidos multimedia no necesariamente visuales como pueden ser el oído, el tacto o el olfato. (Krevelen & Poelman 2010) aunque no serán tratadas en esta investigación. Siguiendo a Ricart (2008, p 62) extraemos algunas definiciones consecutivas en el tiempo, que enmarcan esta tecnología, complementadas por las aportadas por otros autores que se han convertido ya en habituales al hablar de ella:

Para Beaudouin-Lafon (1994), el mundo real no puede ser reproducido de forma fidedigna en un ordenador. Por lo que la RA lo que hace es reproducir “el mundo real aumentándolo con capacidades computacionales”. A continuación hace una comparativa con la RV: “*en lugar de insertar al usuario en un mundo generado por ordenador, la RA recubre el mundo real con el mundo virtual, o incrusta/fusiona ambos mundos*”.

Barfield & Furness (1995) entienden el concepto de RA como “la **ampliación** del mundo real con imágenes sintéticas, por lo que no se requiere que la escena esté completamente generada por ordenador, sino que la imagen sintética se utiliza como **complemento** de la escena del mundo real”. Y añade que “*la RA no debe entenderse como exclusivamente visual, sino que debe incluir también información táctil/tangible y auditiva*”.

Azuma (1997) comparte esta definición entendiendo la RA como una variación de la realidad Virtual VR, sostiene que mientras que esta última sumerge completamente al usuario en un entorno sintético, sin permitir por tanto, al usuario ver el mundo real que lo

rodea, la RA permite la visión del mundo real, y simplemente **la complementa** con objetos virtuales superpuestos o integrados con el mundo real. Así introduce como característica principal de esta tecnología, el concepto de completar la realidad vs el reemplazo de ésta, como lo harían los sistemas de realidad virtual. Con el objeto de no limitar la RA al uso de HMDs, define las características que un sistema de RA debe tener y que son las siguientes:

- **Combinación de lo real y Virtual.** La información digital es combinada con la realidad.
- **Interactividad en tiempo real.** La combinación entre lo real y lo virtual se realiza en tiempo real.
- **Registro en 3D (tridimensional).** La información virtual debe ser registrada (posicionada) en el espacio.

Según Sherman & Craig (2003, p 517), en la RA el mundo ya existe, y sólo es necesario añadir una pequeña cantidad de información. Así pues, para la RA el reto consiste en producir sistemas independientes, transportables, y que sean capaces de registrar y/o ubicar de forma precisa el entorno virtual en el entorno real. Mientras que en la RV el objetivo es la visualización de suficientes polígonos para que el entorno creado sea creíble, y normalmente se permite al usuario moverse de forma virtual por el espacio, en la RA el desplazamiento físico del usuario es generalmente el único método aceptado para viajar.

Seguidamente Bimber & Raskar (2005, p 2) complementan esta definición al subrayar además, que existe un fuerte vínculo entre ambos mundos establecido principalmente mediante una relación espacial. *“The augmented information has to have a much stronger link to the real environment. This link is mostly a spatial relation between the augmentations and the real environment. We call this link registration.”*

Esta última reflexión aporta un dato fundamental: la relación espacial que se establece entre el entorno real y el mundo virtual generado por ordenador. Este hecho implica directamente la necesidad de que exista algún tipo de sensor(es) que establezca(n) dicha

relación. Considerando el entorno real como un espacio de tres dimensiones (3D), el problema queda resuelto mediante el cálculo de seis parámetros, que son tres traslaciones y tres rotaciones. (6DOF)

Para Manovich (2006) el término de Realidad Aumentada es opuesto al de Realidad Virtual, ya que mientras que el objetivo del primero **es ayudar** al usuario aumentando el espacio real con información adicional, en el uso de técnicas de realidad virtual, el espacio físico es innecesario y su percepción está completamente bloqueada. Sostiene además, que independientemente de la tecnología y conceptos empleados, el resultado del uso de los sistemas de RA es siempre el mismo y consistente en la superposición de capas de información sobre el espacio físico real. Un espacio transformado con información adicional al que llamaré “espacio aumentado”. Y donde la RA es equiparable en cierto modo a los servicios de localización *Wireless*. La idea de Manovich es que a medida que un usuario se acerca a un determinado objeto, edificios o personas, la información de estos es enviada al usuario y superpuesta en su campo visual.

Por último, en los últimos años el concepto aparece ligado a una nueva forma de superposición de contenidos digitales en el contexto real, que está afectando a la industria de las **comunicaciones móviles al ofrecer un cambio radical en la interacción persona-ordenador** (X. Wang 2012), el término se limita a menudo a la tecnología que permite el registro de información gráfica sobre el campo visual de un usuario (Bruce H. Thomas 2012).

Como hemos visto, la definición de RA puede resultar en algunos casos ambigua. Es por ello que se hace necesario el adoptar unas características generales que la definan y distingan de otras tecnologías próximas. En este sentido, en la tesis que se propone se seguirá el trabajo presentado por Azuma (1997) donde se define la RA como los sistemas que contienen simultáneamente las tres antes citadas, y de las que el lector puede hallar amplia información en Ricart (2008, pp 64-67).

3.3 SISTEMAS DE REALIDAD AUMENTADA

Un sistema de RA consiste en crear una interfaz formada por un conjunto de componentes conectados y que operan en tiempo real. (Martín Gutiérrez 2010, p 311). Para su diseño resulta esencial decidir cómo se realiza la combinación entre el lo real y lo virtual. Existen varias formas de configurar estos sistemas, y cada uno de ellos proporcionará una sensación distinta de inmersión en el ambiente virtual creado.

De manera que, no existe una única o clara clasificación de los sistemas de RA. En un primer acercamiento, y en tanto que la realidad puede aumentarse de muchas formas (no exclusivamente visual), esta clasificación podría plantearse a partir de cada uno de los sentidos con los que el ser humano percibe su entorno. De entre ellos los sistemas visuales son, con diferencia, los más desarrollados, quedando los sistemas que afectan al oído (*aural*) y al tacto (*haptic*) en un segundo plano, mientras que los sistemas que pueden aumentar la realidad mediante el olfato (smell) o el gusto (taste) son inexistentes o prácticamente no se han desarrollado (Krevelen & Poelman 2010). En (Portalés Ricart 2008) se puede encontrar una clara catalogación y una extensa bibliografía de este tipo de sistemas visuales con trabajos y referencias de diversos autores al respecto, y que son en los que se basa la presente tesis. El resto de sistemas no se trataran en este documento.

3.3.1 SISTEMAS SEE-THROUGH, Y PROYECTIVOS

Dentro de estos sistemas visuales, la primera clasificación que podemos establecer es **en función de cómo la información virtual es presentada en el visor** (*visual display*). Tradicionalmente se han dividido los sistemas en dos categorías: los sistemas “**see-through**” (visión a través) y los sistemas **proyectivos** (*o projective AR*).

Los sistemas “see-through” han estado tradicionalmente ligados a los dispositivos tipo cascos (HMD), aunque pueden utilizarse en dispositivos de mano y espaciales, de los que se hablara más adelante. Estos sistemas se dividen a su vez en dos, en función del grado de visión directa que se tiene del entorno. Básicamente un sistema donde el usuario visualiza el mundo real directamente, o a través de un elemento con un cierto grado de

transparencia, y donde se proyecta información virtual, es un sistema **óptico** (*optical see-through, OST*). Si esta información es renderizada, y visualizada a través de una pantalla de video donde se superponen la información real captada por la cámara con la información real estamos hablando de un sistema de **video** (*video see-through, VST*). La diferencia entre ellos radica en que en el primer caso la pantalla del dispositivo es transparente y la superposición digital se proyecta directamente sobre la visión directa del usuario, mientras que en los dispositivos VST la visión del dispositivo consiste en una fuente de vídeo en tiempo real capturada por una cámara situada en el dispositivo y renderizada a continuación en las pantallas instaladas en el dispositivo de visualización. En este caso, y aunque la imagen se corresponde en escala, posición y perspectiva con la visión del mundo real, el usuario del sistema queda de alguna forma desconectado físicamente del contexto real inmediato produciéndose la visión de forma indirecta y condicionada por la aplicación.

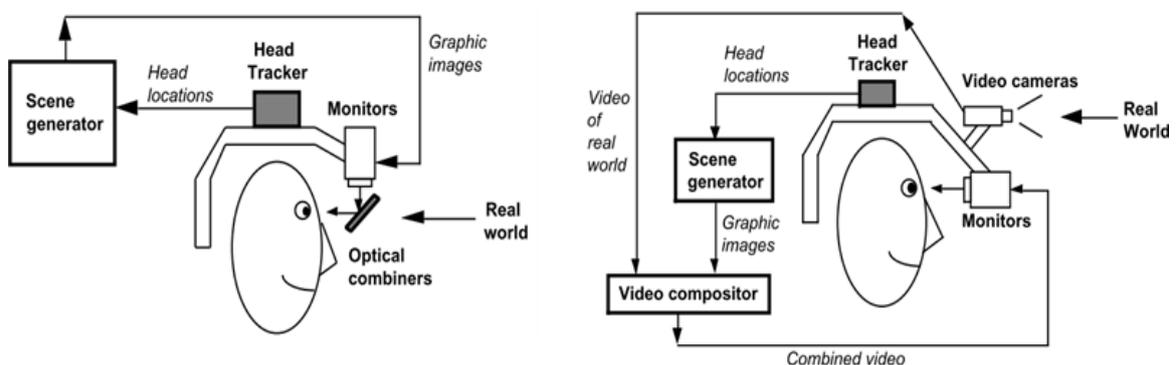


Fig. 22 Diagramas conceptuales de los sistemas OST (izquierda) y VST (derecha). En Azuma (1997)

En el sistema OST, se utilizan pantallas parcialmente transparentes y reflectoras permitiendo la visión directa del entorno real y la superposición de imágenes virtuales.

En el sistema VST, una o varias video cámaras aportan la visión del mundo real. Esta información se combina con información gráfica generada por un dispositivo que genera la escena y el resultado es enviado a un monitor (gafas en el caso de HMD) manteniendo siempre la misma distancia entre éste y el espectador.

Otra opción introducida por Azuma (1997) son los sistemas basados en la proyección en un pantalla convencional (*Monitor Based AR*) que podemos considerar una variante de la VST, pero sin necesidad de dispositivos HMD por lo que resulta de gran interés en aplicaciones relacionadas con la enseñanza. (Fernández Alvarez 2010).

Mientras que los dos primeros son sistemas inmersivos, que actúan en el campo visual del usuario, y por ello deben mantener la distancia entre el monitor y los ojos del espectador, el tercero se reduce a la superposición digital de información adicional a la real en una pantalla, con lo que la escena se visualiza parcialmente a medida que el usuario mueve el dispositivo.

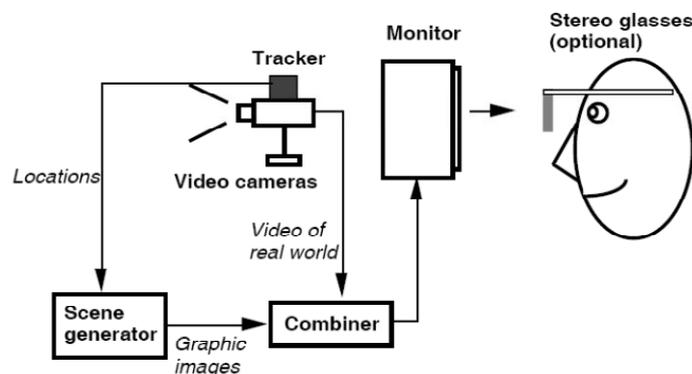


Figure 15: Monitor-based AR conceptual diagram

Fig. 23 Representación esquemática del Sistema “monitor based”. En Azuma (1997)

Al hablar de Realidad Aumentada en dispositivos móviles que no se acoplan a la cabeza (*head worn*), nos referiremos necesariamente a este tipo de esquema, correspondiente a los dispositivos de mano (*hand held devices*). Donde tanto las cámaras, como los dispositivos de posicionamiento y movimiento, así como el software de generación de la escena y el monitor, se encuentran integrados en mismo dispositivo, y la escena se reproduce en un monitor.

En los sistemas proyectivos por el contrario, la información real y la virtual se superponen en el entorno (no en el campo visual del usuario) mediante algún tipo de sistema de proyección. Este tipo de configuración da lugar a la denominada Realidad Aumentada Espacial (*Spatial Augmented Reality*) también denominada Proyectiva (*Projective AR*) y que supone un campo de representación aparte, que no se trata en la presente tesis.

Estos sistemas basan la visualización de la escena en la proyección de imágenes digitales sobre el propio objeto o entorno real, de manera que el aumento ya no se produce entre el usuario y el entorno, si no que se produce en el propio objeto físico. Son en general sistemas fijos. El referente en este tipo de RA es (Bimber & Ramesh Raskar 2005, p 83). Y son numerosos los ejemplos que utilizan este tipo de RA en campos tan diversos como la representación artística (Sukenobe et al. 2010; Laviolle & Hachet 2012), arquitectónica (R. Raskar & Welch 1999; Tonn et al. 2008), o en operaciones de inspección y mantenimiento (J. Zhou et al. 2011).

Otros ejemplos de unos y otros pueden encontrarse en (Krevelen & Poelman 2010).



Fig. 24 Ejemplos de distintos sistemas en función de cómo se presenta la información en el visor. En (Krevelen & Poelman 2010)

3.3.2 SISTEMAS HMD, HHD Y ESPACIALES

De acuerdo con lo expuesto anteriormente se deduce que la posición del *display* en relación al usuario y su entorno condiciona la configuración del sistema de RA. De acuerdo con este criterio pueden establecerse entonces tres categorías (Bimber & Ramesh Raskar 2006; Krevelen & Poelman 2010): **dispositivos ligados a la cabeza** (*head-worn*), **dispositivos de mano** (*hand-held*), y **sistemas espaciales** (*spatial*).

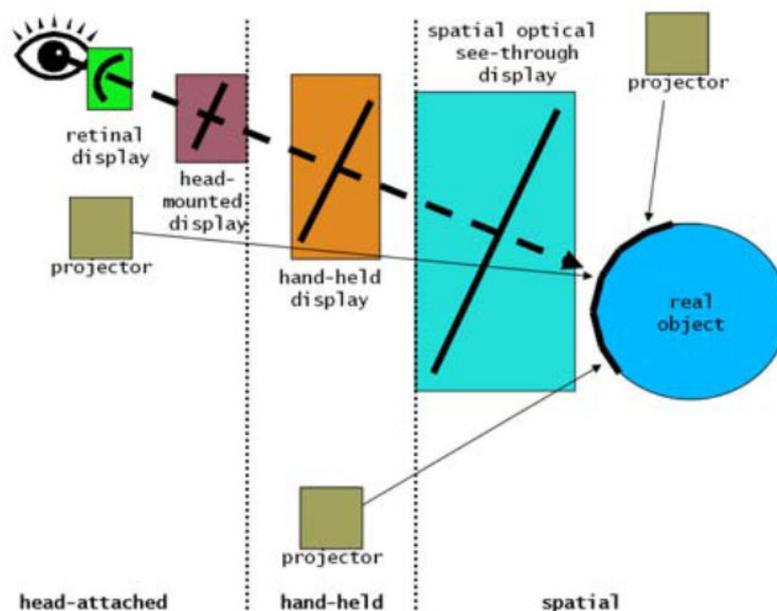


Fig. 25 Esquema de clasificación de los sistemas de RA en función de la posición del display respecto al usuario y al objeto real. En Bimler & Raskar (2006)

Según esta clasificación los sistemas ligados a la cabeza se dividirían en los clásicos dispositivos tipo cascos (*Head Mounted Displays, HMD*), y los dispositivos retinianos, (*retinal scanning displays, RSDs*) basados en un sistema de visión óptico y todavía en fase de desarrollo por parte de algunas empresas como *MicroVision*¹⁰, y sistemas proyectivos, siendo estos últimos los menos frecuentes, pues la mayoría se basan en sistemas de visión VST o VST, aunque también pueden ser proyectivos. Los dispositivos de mano se basan en su mayoría en la variante de VST basada en la visualización en un monitor (*monitor based*), como pueden ser tabletas, teléfonos móviles, incluso ordenadores portátiles. Este es el tipo de configuración utilizada en todos los cursos planteados por resultar la más asequible, aunque esta categoría puede incluir también sistemas OST, e incluso sistemas proyectivos (Ramesh Raskar et al. 2003).

Por último los sistemas espaciales, al contrario que los dos anteriores, son sistemas fijos. Se basan en la proyección de la información virtual en el propio objeto físico o en su entorno que se ve así aumentado. Existen, aunque en menor número, configuraciones donde la información es visualizada mediante OST o VST.

¹⁰ <http://www.microvision.com/>

Seguindo esta clasificación Krevelen & Poelman (2010) identifica las fortalezas y debilidades de este tipo de sistemas visuales, (no hápticos, ni de sonido), **en función del tipo de tecnología empleada,**

Positioning	Head-worn				Hand-held	Spatial		
Technology	Retinal	Optical	Video	Projective	All	Video	Optical	Projective
<i>Mobile</i>	+	+	+	+	+	-	-	-
<i>Outdoor use</i>	+	±	±	+	±	-	-	-
<i>Interaction</i>	+	+	+	+	+	Remote	-	-
<i>Multi-user</i>	+	+	+	+	+	+	Limited	Limited
<i>Brightness</i>	+	-	+	+	Limited	+	Limited	Limited
<i>Contrast</i>	+	-	+	+	Limited	+	Limited	Limited
<i>Resolution</i>	Growing	Growing	Growing	Growing	Limited	Limited	+	+
<i>Field-of-view</i>	Growing	Limited	Limited	Growing	Limited	Limited	+	+
<i>Full-colour</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Stereoscopic</i>	+	+	+	+	-	-	+	+
<i>Dynamic refocus (eye strain)</i>	+	-	-	+	-	-	+	+
<i>Occlusion</i>	±	±	+	Limited	±	+	Limited	Limited
<i>Power economy</i>	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Opportunities</i>	Future dominance	Current dominance			Realistic, mass-market	Cheap, off-the-shelf	Tuning, ergonomics	
<i>Drawbacks</i>		Tuning, tracking	Delays	Retro-reflective material	Processor, Memory limits	No see-through metaphor	Clipping	Clipping, shadows

Fig. 26 Clasificación de los sistemas de RA de displays visuales, en función de la posición del display y de la tecnología empleada. En Krevelen & Poelman (2010)

3.3.3 SISTEMAS FIJOS O MOVILES

Hemos visto como en los sistemas visuales, la información puede visualizarse proyectados en el entorno o a través de visores (OST y VST). Que independientemente de cómo se visualiza esta información los dispositivos pueden estar ligados a la cabeza, de mano o espaciales. Pero independientemente de estas categorías, otra clasificación esencial es la realizada a partir de la movilidad de los dispositivos de registro y/o displays donde podemos distinguir entre sistemas **móviles** (*mobile*) y Sistemas **fijos o espaciales** (*spatial*). En esta definición, los sistemas móviles son aquellos que el usuario lleva consigo los dispositivos de registro, el display e incluso, el ordenador, teléfono tableta o PDA, que gestiona la aplicación. Estas configuraciones son usuales, aunque no exclusivas, de espacios abiertos. Y los tipos de registro habituales son el registro basado en el reconocimiento óptico de imágenes y el registro basado en el posicionamiento mediante

GPS. Contrariamente, en aplicaciones fijas, los dispositivos de registro y/o displays están fijos en el entorno, utilizándose en muchos casos sistemas de proyección sobre superficies tridimensionales. En Bimber & Raskar (2005) se hace un estudio exhaustivo sobre la RA espacial. Otros ejemplos de estos sistemas fijos más recientes pueden encontrarse en (Sukenobe et al. 2010; J. Zhou et al. 2011; Laviolle & Hachet 2012)



Fig. 27 Ejemplos de sistemas de RA Espacial. Izquierda: Sukenobe et al. (2010); Centro Zhou et al. (2011); Derecha: Laviolle & Hachet (2012)

Los sistemas de visualización fijos, son dispositivos estacionarios, no portables, constituidos por recintos, o habitáculos, y dotados con una o más pantallas de gran tamaño sobre las cuales se proyectan las imágenes del mundo virtual, generalmente basándose en alguna técnica de retroproyección estereoscópica. La perspectiva que se ofrece al participante es función de la orientación de su visión, y por otro, a efectos de interactividad también resulta muy atractivo. Además permiten experiencias multiusuario y resultan muy adecuados para entornos colaborativos.

La configuración móvil, por su parte, ofrece ventajas evidentes en espacios exteriores, en tanto que resulta ser ligera y manejable, más asequible y accesible a un público heterogéneo, y su uso socialmente más aceptado (D. Wagner 2007; Schall et al. 2008; Morrison et al. 2011). Aunque es innegable su utilidad en espacios interiores, donde han sido ampliamente utilizados. Además muchos de ellos utilizan el reconocimiento óptico de imágenes, que resulta muchas veces inestable a partir de una cierta distancia del marcador, de manera que su uso en espacios interiores de este tipo de sistema también

está limitado. En Carmigniani et al. (2010) puede consultarse una extensa comparativa de los distintos sistemas y aplicaciones de la tecnología.

3.3.3.1 Sistemas móviles

Existen numerosos entornos de aplicación de esta tecnología, como el que nos ocupa, que requieren movilidad del usuario, necesidades de acceso a la información en cualquier momento y en cualquier lugar. Es en estos casos donde se hace necesaria la utilización de dispositivos móviles. Como se ha comentado éstos se dividen básicamente en dos: los dispositivos **tipo cascos** (head mounted displays, HMD) y el resto, básicamente **de mano** (hand held). Las capacidades de estos últimos (tabletas, teléfonos móviles, o incluso ordenadores portátiles,) han resultado tradicionalmente insuficientes para satisfacer los altos requisitos impuestos por este tipo de aplicaciones, pero a medida que sus procesadores se vuelven más potentes, e incorporan nuevas prestaciones, se han convertido en herramientas útiles para la aplicación de esta tecnología que empieza a ofrecer a los consumidores nuevas formas de mezclar información virtual y real.

La configuración de este tipo de sistemas (hand held), se basa en la visualización de la escena en un monitor (*Monitor Based*) del propio dispositivo. Esta configuración es radicalmente distinto a las técnicas immersivas tradicionalmente utilizadas en aplicaciones de RA, y que básicamente son dos: las basadas en un **sistema de proyección**, que suelen ser fijos, como CAVE (*cave automatic virtual environment*), desarrollado por el laboratorio de visualización electrónica de la universidad de Illinois¹¹, o sus variante más asequibles, NAVE (*Non-Expensive Automatic Virtual Environment*), dirigidas a experiencias multiusuario; y la alternativa móvil ya comentada que utiliza **cascos HMD**, como experiencia unipersonal.

En el ámbito de la enseñanza de la arquitectura y la ingeniería de la edificación, y en tanto que requeriremos de movilidad y registro en el propio entorno arquitectónico, nos centraremos en las diferencias que existen entre estos dos sistemas móviles por excelencia, (*hand held y Head-mounted*).

¹¹ <http://www.evl.uic.edu/EVL/>

Obviamente el primero resulta más manejable y el visor y el dispositivo de entrada están conectados (a diferencia de los dispositivos Head-Mounted) lo cual significa que con un teléfono móvil no hay necesidad de un segundo dispositivo para interactuar. Aunque es verdad que para interactuar con la escena se hace necesario mover el aparato en relación al entorno en lugar de mover el observador, como ocurre con los HMD. En un primer acercamiento se podría decir que un dispositivo de mano, como una tableta o un teléfono móvil, basa su experiencia de RA en una pantalla que provee una pequeña visión de la escena. Asumiendo que el usuario moverá antes el visor del dispositivo que cambiar su punto de vista relativo respecto a él.

En los HMD se asume que el usuario tiene ambas manos libres para manipular los dispositivos, mientras que en las aplicaciones para dispositivos móviles el usuario ve la AR en la pantalla y necesitará al menos una mano para sujetar el dispositivo.

Los dispositivos de cascos o HMD por otro lado, ofrecen un grado de inmersión más elevado al actuar en el campo visual del usuario, y por ello deben mantener la distancia entre el monitor y el espectador. Cosa que no ocurre en los dispositivos móviles donde la escena se genera digitalmente en una pantalla a partir del campo visual que recoge la cámara del dispositivo y ciertamente la sensación de inmersión que ofrece esta experiencia se reduce considerablemente cuando no resulta nula.

Esta inmersión “total” que ofrece un dispositivo HMD plantea sin embargo varias carencias, como son las limitaciones en cuanto a **manipulación e interacción** con objetos, o la no posibilidad de **experiencias compartidas** con otros usuarios de una forma ordinaria. Limitaciones fácilmente salvables en el caso de la proyección en una pantalla táctil de un dispositivo móvil.

Como se ha comentado, la creciente sofisticación de los dispositivos HMD unida a la de los dispositivos móviles, ha hecho aparecer recientemente una solución intermedia que podría recoger las ventajas de los dos sistemas. Se trata de dispositivos mixtos que mediante la simplificación del visor, convertido en unas simples gafas muy ligeras, se

conectan directamente a un dispositivo portátil (teléfono o UMPC) capaces del procesamiento y gestión de datos.

En los últimos años, la aplicación de la tecnología en los dispositivos móviles de mano (*hand held*), se han multiplicado de forma exponencial. Desde el primitivo prototipo “Chameleon” (Fitzmaurice 1993), capaz de reconocer un patrón y sin ninguna interactividad, hasta los sistemas que proponen nuevos tipo de interacción con el entorno, capaces por ejemplo, de reconocer el movimiento de una mano como herramienta de interacción en la escena (Chun & Höllerer 2013) o sistemas que corrigen la geometría de la escena en la pantalla a partir de la posición el usuario respecto a ésta (Uchida & Komuro 2013).



Fig. 28 Imágenes de distinto dispositivos de mano (*hand held*). Izquierda: Fitzmaurice (1993). Centro: Chun & Höllerer (2013). Derecha: Uchida & Komuro (2013)

3.3.4 OTRAS CLASIFICACIONES

Existen otros criterios ampliamente utilizados para clasificar los sistemas de RA. Se enumeran a continuación:

- Según el tipo de sensor utilizado en el registro
- Según el entorno físico en el que se desarrolla la aplicación
- Según la extensión que abarquen
- Según el número de usuarios que simultáneamente pueden interactuar
- Según el tipo de colaboración establecida
- la movilidad de los dispositivos de registro y/o displays

3.3.4.1 Según el tipo de sensor utilizado en el registro

Pueden establecerse las siguientes categorías:

- **Sistemas que utilizan sensores mecánicos, de ultrasonido o magnéticos.** Preferiblemente utilizados en espacios interiores, de gran precisión pero paulatinamente en desuso.
- **Sistemas de posicionamiento global** (*global positioning system, GPS*), utilizados en espacios exteriores. Existe para ello el sistema de satélites americano Navstar GPS (Getting 1993), el sistema ruso Glonass, y el sistema Europeo Galileo. Son sistemas de precisión variable que van desde 10-15mts a los 3-4 mts si se utilizan sistemas WAAS (*wide Area Augmentation System*) que logran eliminar gran parte de la imprecisión al calcular al mismo tiempo dos puntos (fijo y en movimiento)
- **Sistemas basados en sensores de Radio.** Establecen la posición a partir de la emisión de ondas de radio de banda ancha. Requieren de preparación previa del entorno, ya que los chips de identificación RFID (*Active radio frequency identification*) deben ser posicionados previamente, y la precisión en el registro depende del número de puntos desplegados. De forma complementaria, donde es necesario cubrir amplias áreas, se aplican los estándares IEEE 802.11b/g tanto para el posicionamiento, como el seguimiento. Ejemplos de esta técnica de localización pueden consultarse en (Bahl & Padmanabhan 2000; Haeberlen et al. 2004; C.-S. Wang 2012)
- **Sistemas que utilizan sensores inerciales** (Acelerómetros y giroscopios) y que normalmente forman parte de sistemas de seguimiento híbridos (SeungJun Kim & Dey 2009). No requieren de preparación previa del entorno y el posicionamiento se basa en mediciones programadas, proporcionando un método práctico para estimar la posición y la distancia cuando se combina con información precisa de partida. Para reducir posibles desviaciones la medición debe actualizarse regularmente con medidas exactas. En la actualidad este tipo de sensores micro-electromecánicos (MEM) ya se encuentran incorporados en la mayoría de teléfonos móviles de nueva generación.

- **Sistemas basados en el registro óptico.** Este tipo de sistemas obtienen gran precisión en la determinación de los 6 grados de libertad (6DOF) necesarios para estimar dinámicamente la posición del objeto y del usuario. Con este objetivo y mediante el uso de una o dos cámaras, este tipo de configuración se ha desarrollado a partir de dos enfoques distintos:
 - **Sistemas que reconocen marcadores planos** (patrones o imágenes reales del entorno) o algún tipo de marca visual como leds (M. Bajura & Neumann 1995), y que una vez reconocidos superponen en ellos algún tipo de información virtual.
 - **Sistemas que detectan dinámicamente el movimiento relativo entre dos fotogramas** consecutivos en 2d o 3D. (que requiere de gran esfuerzo computacional). También conocidos como sistemas ópticos que no necesitan marcadores (*markerless Systems*). Estos sistemas basan el registro en el cálculo de la posición de la cámara respecto a los objetos.

Los primeros han sido tradicionalmente los más utilizados por su sencillez en la implantación, y la precisión en el registro (Mark Billinghurst et al. 2001; Kaufmann & Dieter Schmalstieg 2002; Andersen et al. 2004; Martín Gutiérrez et al. 2010; Sanchez Riera et al. 2012a). Muchas de las aplicaciones para dispositivos móviles se basan en este tipo de sistema (ARMedia, Aurasma, Junaio, etc...). Y han sido el sistema empleado en la mayoría de los cursos que se han desarrollado en esta tesis. La propia aplicación desarrollada responde a este tipo de sistemas.



Fig. 29 Sistemas basados en el reconocimiento óptico de imágenes. En Izquierda: Kaufmann & Dieter Schmalstieg 2002; Centro: Andersen et al. (2004); Derecha: Sanchez Riera et al. (2012a)

Los segundos, son sin duda el futuro más prometedor de la RA, pero su implantación efectiva en dispositivos móviles como los teléfonos o tabletas (*hand Held*) todavía no se ha llevado a cabo. Ejemplos de estos sistemas podemos encontrarlos en (Chia et al. 2002; Yuan 2006; Jung et al. 2007; Klein & D. Murray 2009; Karlsson et al. 2012)

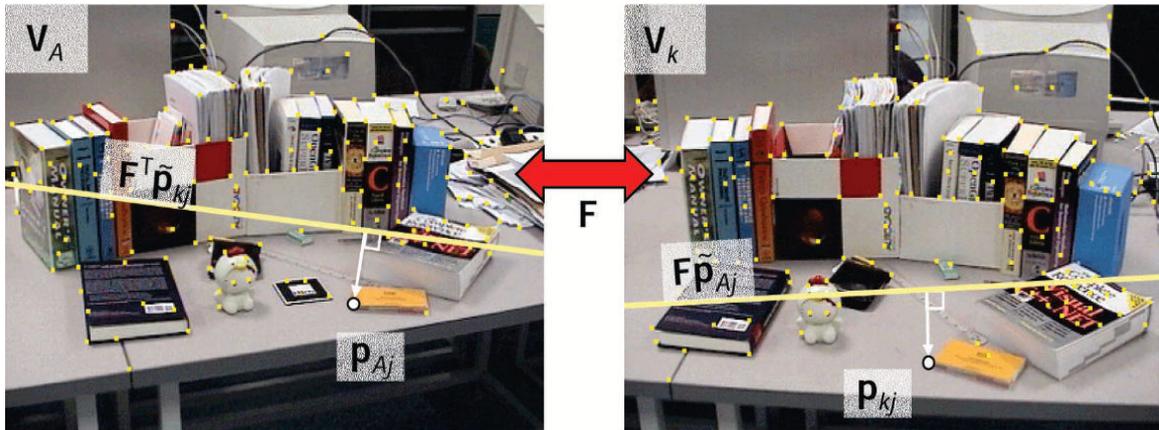


Fig. 30 Fotogramas consecutivos para estimar la posición de la cámara. En Chia et al. (2002)

- **Sistemas Híbridos** (varios sensores simultáneamente): Estos sistemas empezaron a ser utilizados a principio de los años 90, combinando por ejemplo brújulas electromagnéticas, sensores gravitacionales, giroscopios (mecánicos y ópticos) para determinar la orientación, y sensores de ultrasonidos, magnéticos y ópticos para determinar la posición del usuario. Este tipo de combinaciones pueden ser una solución eficaz para solucionar los problemas de registro en espacios ubicuos, (cerrados y abiertos simultáneamente) (R. Azuma et al. 2006).

3.3.4.2 Según el entorno físico en el que se desarrolla la aplicación,

Podemos diferenciar entre sistemas dentro de recintos o **cerrados** (*indoor*) contra Sistemas al aire libre o **abiertos** (*outdoor*). La distintas exigencias de uno u otro espacio, condiciona en muchos casos la configuración de los sistemas de RA que se utilizaran, principalmente el tipo de dispositivos de registro y displays utilizados. De hecho, en aplicaciones al aire libre, con condiciones ambientales y lumínicas poco controlables suelen emplearse receptores GPS y sensores inerciales para el registro, y dispositivos móviles (PDAs, teléfonos, tabletas, etc...) o HMDs para los displays. Si bien es verdad que

éstos últimos han sido ampliamente utilizados igualmente en espacios interiores, donde la integración de distintas configuraciones resulta por su naturaleza, mucho más sencilla y variada (Avery et al. 2006). El registro óptico en estos casos es el más utilizado, por su precisión y economía del sistema. Ejemplos de aplicaciones en espacios cerrados las encontramos en (Broll et al. 2004; Ismail & Sunar 2009; Mulloni et al. 2011a; Irizarry et al. 2012; Kuo et al. 2012); en espacios abiertos en (Wayne Piekarski & Bruce H Thomas 2003; Avery et al. 2006; Morrison et al. 2011; Yetao et al. 2011; Kerr et al. 2011).



Fig. 31 Sistemas Indoor. Izquierda, Mulloni et al. (2011). Derecha: C. Kuo et al. (2012)



Fig. 32 Sistemas Outdoor. Izquierda: Avery et al. (2006); centro: Yetao et al. (2011); derecha: Kerr et al. (2011)

3.3.4.3 Según la extensión que abarquen

Podemos distinguir entre sistemas **locales** (*local*) y **ubicuos** (*ubiquitous*). Los sistemas locales se desarrollan en un ámbito acotado, bien en espacios abiertos o dentro de recintos pero en un entorno limitado. Las aplicaciones ubicuas (u omnipresentes) son aquellas en las que la extensión del entorno aumentado es tan amplio, que el usuario tiene la sensación de que vaya donde vaya seguirá estando inmerso en la aplicación. En

este tipo de RA se suelen utilizar diversas tecnologías de registro que se complementen (GPS, Sensores inerciales, ópticos, etc..) para permitir que el usuario pueda entrar en recintos o salir a espacios abiertos. Además, los sistemas suelen ser móviles, ya que el usuario debe desplazarse libremente. Cabe decir sin embargo, que con el avance del *cloud computing* la tecnología tiende a ser ubicua, pues cualquier sistema con conexión a internet puede adquirir contenidos virtuales asociados a una imagen o a una posición determinada desde cualquier lugar. Podríamos incluir en esta categoría todos los navegadores de RA como Junaio, Layar o Wikitude, de los que se hablará más adelante, sistemas basados en el posicionamiento y/o el reconocimiento óptico que permiten la generación de escenas en cualquier lugar. Existen sin embargo sistemas en que puede interesar que la escena se genere en espacios determinados y no fuera de él, con lo que los sistemas locales finalmente son restricciones impuestas a los sistemas ubicuos. Otros ejemplos de sistemas ubicuos que utilizan distintas configuraciones son (J. Newman et al. 2004; Pasmán et al. 2004; Hiyama et al. 2011; Mark Billinghurst & Bruce H Thomas 2011)

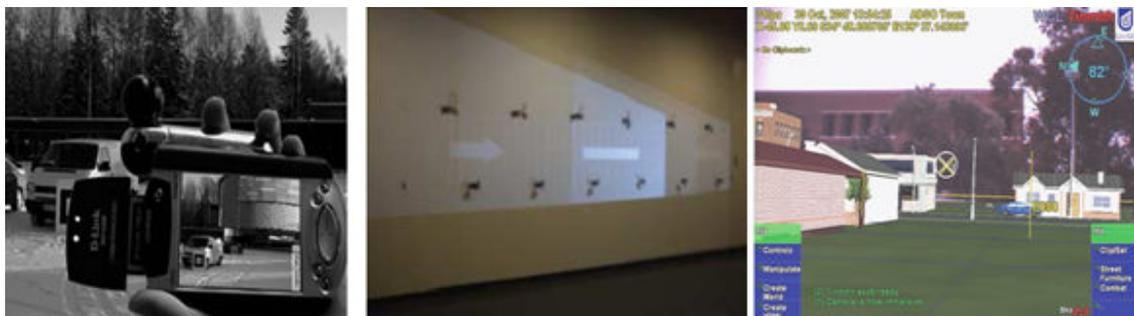


Fig. 33 Ejemplos de distintas configuraciones de sistemas ubicuos. Izquierda: Pasmán et al. (2004); Centro: Hiyama et al. (2011); derecha: Billinghurst & Bruce H Thomas (2011)

3.3.4.4 Según el número de usuarios que simultáneamente pueden interactuar con el sistema

Se pueden dividir entre sistemas **individuales** (*individual*) y **colaborativos** (*collaborative*). Así pues, el sistema es individual cuando existe la posibilidad de interacción de un solo usuario, y colaborativa si existe, como mínimo, la posibilidad de participación de dos usuarios de forma simultánea. Los sistemas individuales requieren de configuraciones específicas que impiden que varios usuarios interactúen de manera simultánea. Ejemplos de estos sistemas pueden consultarse en (Woods et al. 2004; Raphael Grasset et al. 2007; Green et al. 2008)



Fig. 34 Ejemplos de sistemas individuales de RA. Izquierda: Woods et al. (2004); Derecha: Grasset et al. (2007)

3.3.4.5 Según el tipo de colaboración establecida

Diferenciamos entre **sistemas presenciales** o cara a cara (*face-to-face*) y sistemas **remotos** (*remote*). La primera categoría corresponde a las aplicaciones donde se requiere que los usuarios estén físicamente presentes en el mismo lugar para interactuar, de manera que la interacción de uno es percibida por el resto que responde a la acción efectuada. En los sistemas de colaboración remota, esta comunicación se establece generalmente a través de la red. Ejemplos colaborativos presenciales en distintos campo pueden consultarse en (Knoerlein et al. 2007; Yasojima et al. 2011; Dong & Kamat 2011), el campo educativo ha sido especialmente objeto de gran parte de estas aplicaciones, donde los educadores han visto en la tecnología una manera de explotar las ventajas potenciales que este tipo de colaboración ofrece. Algunos ejemplos consultables en (Kaufmann & Dieter Schmalstieg 2002; Broll et al. 2004; Behzadan et al. 2011).



Fig. 35 Ejemplos de sistemas colaborativos presenciales. Izquierda: Kaufmann & Dieter Schmalstieg (2002); Broll et al. (2004); Knoerlein et al. (2007)

Igualmente son numerosos los estudios que plantean experiencias colaborativas a distancia, mediante el uso de la tecnología, y donde es común emular la presencia de un

experto, que remotamente facilita o ayuda a completar determinadas tareas de mantenimiento. Algunas de ellas pueden consultarse en (Bottecchia et al. 2010; Le Ligeour et al. 2006).



Fig. 36 Ejemplos de sistemas colaborativos remotos. Izquierda: Bottecchia et al. (2010); Derecha: Le Ligeour et al. (2006)

3.3.5 CONCLUSIONES

Hemos visto que no es fácil establecer una clasificación clara de los tipos de sistemas existentes. Y cualquiera de ellas puede resultar válida para ubicar una determinada configuración. En cualquier caso, las categorías mostradas no son exclusivas de los criterios de clasificación aquí establecidos, pudiendo encontrar por ejemplo, sistemas colaborativos o individuales, en espacios abiertos o cerrados, basados en sistemas móviles o fijos y en los que la información se visualiza mediante un *display* óptico o de video (*see-through*) o mediante proyección.

En los cursos realizados se ha intentado abarcar diversas categorías, en distintos espacios, con distintos tipos de registro, promoviendo experiencias colaborativas e individuales de forma presencial. Aunque siempre con la premisa del uso de dispositivos móviles de mano (*hand-held*), excluyendo el resto (HMD, y espaciales), y donde la escena se visualiza en una pantalla del propio dispositivo (*Monitor Based AR*) que podemos considerar una variante de la VST, menos inmersiva, pero sin necesidad de utilizar HMD.

La siguiente tabla muestra la clasificación de los cursos realizados en base a algunos de los criterios aquí presentados.

Tabla 7 clasificación de los ensayos realizados

ENSAYO	ENTORNO	EXTENSION	REGISTRO	USUARIO
0 GIRONELLA	EXT	LOCAL	OPTICO	INDIVIDUAL
1 BEST 1	INT	UBICUA	OPTICO	COLABORATIVO
2 BEST 2	INT	LOCAL	OPTICO	INDIVIDUAL
3 BEST 3	EXT	LOCAL	OPTICO	INDIVIDUAL
4 DAC	INT.	UBICUA	OPTICO	COLABORATIVO
5 EGIII	INT.	LOCAL	OPTICO	INDIVIDUAL
6 TICS (Layar)	EXT.	UBICUO	GPS	COLABORATIVO
7 APF	EXT.	LOCAL	OPTICO	COLABORATIVO
8 PT II	INT.	LOCAL	OPTICO	COLABORATIVO

Como puede observarse la mayoría de sistemas utilizan un sistema basado en el registro óptico de imágenes. Resultando experiencias individuales y colaborativas en espacios abiertos o cerrados indistintamente.

3.4 RECORRIDO HISTORICO

3.4.1 ANTECEDENTES

La aparición del ordenador a finales de los años setenta representó una revolución en el mundo de la simulación y la expresión audiovisual. Uno de los productos que generó esta revolución digital es la denominada realidad virtual: donde el ordenador era capaz de simular un entorno alternativo a nuestro entorno físico, y de generar artificialmente estímulos sensoriales (gráficos, audio, olores, etc.). Los usuarios de esta tecnología empezaban entonces a interactuar con la máquina o con otros usuarios dentro de este nuevo mundo, inmersos física y psicológicamente en estas nuevas realidades artificiales. Es entonces cuando aparecen nuevos conceptos y tecnologías, como el ciberespacio, telepresencia (o presencia remota), vida artificial, realidad mezclada, realidad aumentada, etc. Todos ellos modelos de tecnologías actuales, que nos resultan familiares y representativos del avance científico y la creación artística

Superada la fascinación inicial por la aparición de los primeros modelos y espacios virtuales durante el inicio de la década de los 90, el avance de las tecnologías de trabajo en red (*network Technologies*) y de los medios locativos (*locative media*)¹², cada vez más presentes en nuestro entorno real, han modificado hábitos de comportamiento, y de relación social. Aquella imagen previa a la era del ordenador, donde podíamos imaginar a un usuario viajar por un espacio virtual; es sustituida paulatinamente por la imagen de una persona con un dispositivo móvil, comprobando su e-mail, haciendo una llamada telefónica, u obteniendo datos en tiempo real desde cualquier lugar y momento, a través de su dispositivo. Y aún más allá, viviendo en un “*espacio aumentado*” (Manovich 2005) donde la superposición de capas de información a nuestro entorno en tiempo real, permite imaginar un escenario dinámico con acceso a datos y a información del espacio

¹² Con el término medios locativos (*locative media*) nos referimos de forma general a las tecnologías de la comunicación que implican localización o, lo que es lo mismo, que proporcionan un vínculo o información relativa a un lugar concreto mediante dispositivos de tipo GPS, teléfonos móviles, PDA, así como ordenadores portátiles o redes inalámbricas. En la actualidad, estos medios están plenamente integrados en nuestra vida cotidiana y generan toda una serie de rutinas sociales, profesionales y también culturales (Ver revista *Artnodes*, n.º 8 (2008) | ISSN 1695-5951)

físico, en el que el usuario se encuentra perfectamente localizado y orientado con sólo activar su dispositivo. Un espacio que no existe más que en el plano digital, pero conviviendo diariamente a nuestro alrededor y formando parte de nuevos hábitos y formas de acceso a la información.

En la actualidad, el vertiginoso avance que han sufrido los terminales móviles, unido al desarrollo de la **tecnología del Cloud computing** ha permitido compartir aplicaciones y servicios a través de internet de forma ubicua y con disponibilidad del servicio y/o aplicación web 24h/7días/365días, haciendo que la experiencia de RA sea posible tanto en ordenadores personales como en dispositivos móviles.

Tecnológicamente hablando, sus inicios van unidos a los de la realidad virtual, y al ingenio ideado en **1962** por Morton Heilig conocido como “sensorama¹³”, consultable en Heilig (1994). Aunque como se ha comentado, existen diferencias substanciales entre ellas. En los primeros años de desarrollo algunas grandes compañías utilizaban la RA para visualización y formación pero no sería hasta el año **1998** cuando se celebrara el primer congreso internacional sobre la materia, el «*International Workshop on Augmented Reality '98*» -IWAR 98- en San Francisco, congreso que ha ido reproduciéndose posteriormente cada año y que ahora se realiza bajo el nombre de IEEE «*International Symposium on Mixed and Augmented Reality*» - ISMAR.

Previamente Tom Caudell y David Mizell (Caudell & Mizell 1992) habían utilizado el término de “realidad aumentada” en un artículo para el congreso HICCS (IEEE *Hawaii International Conference on System Science*), bajo el título de “*Augmented Reality: an Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes*” . Donde el autor **describe el diseño de un prototipo para la implementación de un HMD**, donde la combinación de un **sensor inercial situado en la cabeza (head up)** del usuario con un sistema de registro global permite la superposición y estabilización de un diagrama

¹³ La Maquina Sensorama, considerada un hito en los inicios de la realidad virtual, era un dispositivo que permitía, a un solo un espectador a la vez, reproducir una secuencia de imágenes con efecto estereoscópico, además de sonido estéreo, vibraciones, sensación de viento y algunos olores. El usuario se colocaba en una cabina cerrada aislándolo sensorialmente del entorno real. Aunque el ingenio no permitía la interacción con el usuario.

generado por ordenador en una posición específica de un objeto real. Para el autor el desarrollo de esta tecnología permitiría reducir costes y mejorar la eficiencia en el campo de la fabricación de aviones y en general en los procesos de fabricación y mantenimiento.

Hasta entonces los dispositivos “*see-Through*” caracterizados por la capacidad de ver directamente a través del visor el medio real que envuelve al observador, en la mayoría de casos efecto conseguido a partir de espejos y mediante el uso de “cascos de realidad virtual” (*Head mounted display*, HMD), se habían convertido en una tecnología habitual en sistemas de aviación militar (Wanstall 1989; Furness 1986). El origen de este tipo de dispositivos debemos datarlo en 1968, cuando Sutherland (1968) diseña un pesado prototipo que permitía visualizar modelos inalámbricos muy sencillos generados por ordenador.

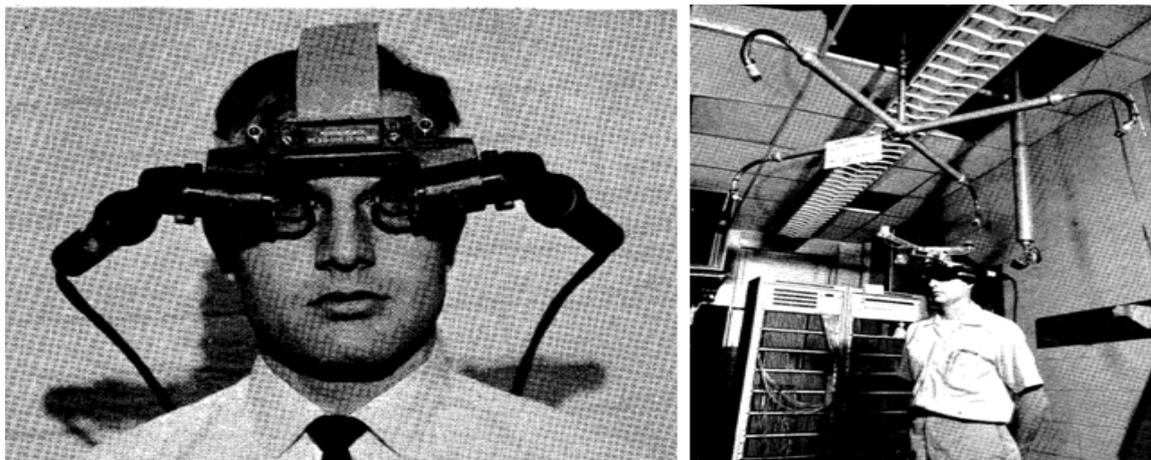


Fig. 37 Imágenes del primer Dispositivo tipo Cascos (HMD). En Sutherland (1968)

En estos primeros años de la década de los 90 la tecnología empezaba a ser objeto de numerosas investigaciones (Janin et al. 1993; Loftin et al. 1993) donde era vista ya como una tecnología capaz de facilitar tareas de mantenimiento y la reparación de aparatos (Steven Feiner et al. 1993) e incluso como potencialmente eficaz en el campo de la medicina, donde los visores de RA conseguían superponer información adquirida mediante técnicas de ultrasonido y escáner al paciente (Michael Bajura et al. 1992). Y no solo con este tipo de dispositivos, sino también mediante el uso de dispositivos de mano (Fitzmaurice 1993) como herramienta que podría describir elementos con información pública o privada. (R. T. Azuma 1997).

El prototipo denominado “*Chameleon*” desarrollado por la Universidad de Toronto se convierte en la primera muestra de cómo dispositivos de mano son capaces de calcular su localización y orientación y servir de “puentes” entre la información virtual generada por ordenador y los objetos del mundo real.

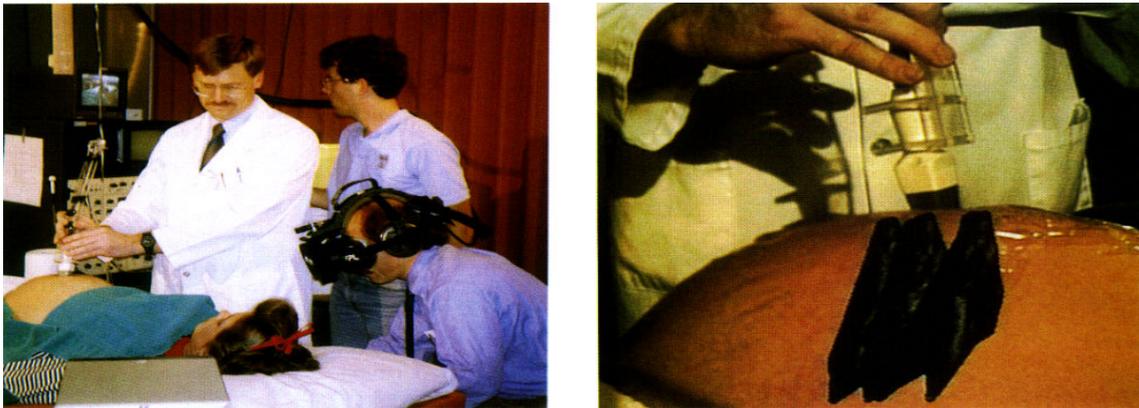


Fig. 38 Imagen de la aplicación de la RA en un paciente, resolviendo parcialmente problemas de oclusión. En Bajura et al. (1992).



Fig. 39 Imágenes del prototipo “*chameleon*” basado en el uso de dispositivos de mano. (Hand-held). En Fitzmaurice (1993)

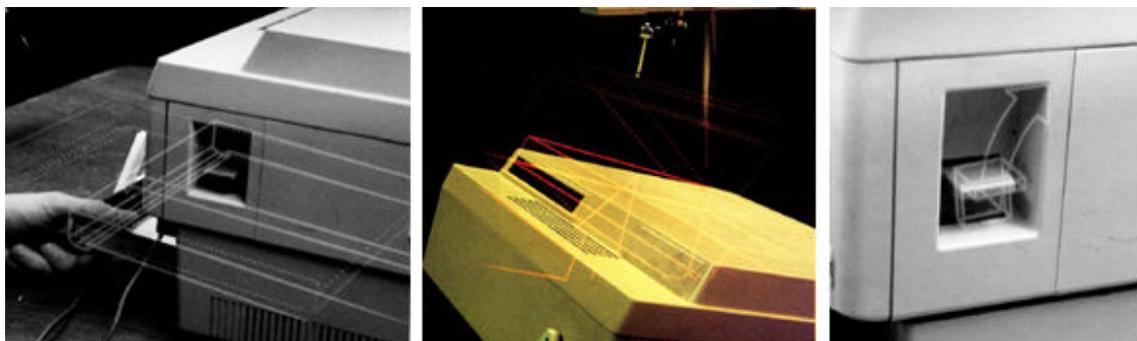


Fig. 40 Imágenes del uso de la tecnología en tareas de mantenimiento. En Steven Feiner et al. (1993)

Paralelamente a esta corriente investigadora en **1994** se funda *The Virtual Reality Society*

(VRS), como un grupo internacional dedicado a la discusión y al desarrollo de la realidad virtual y entornos sintéticos. Una serie de artículos, historia y publicaciones al respecto puede ser consultada en: <http://www.vrs.org.uk/>. En este mismo año aparece el artículo “*A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*” donde Milgram & Kishino (1994) acotan el termino y evidencian las diferencias entre las dos tecnologías (virtual y aumentada). Y las aplicaciones de la tecnología se extienden a otros campos. Así, en **1995** el equipo del *Computer Graphics and User Interfaces Lab* de la universidad de Columbia (Steven Feiner et al. 1995), utiliza la RA para visualizar los contornos de los componentes estructurales de un edificio, tales como viguetas, vigas y columnas así como los análisis de carga de estos componentes.



Fig. 41 Visualización de los elementos estructurales de un edificio. En Steven Feiner et al. (1995)

A partir de 1997 las primeras propuestas de desarrollo en ordenadores portátiles toman forma (Bass et al. 1997; Thorp 1998), ofreciendo nuevas posibilidades para el desarrollo de la tecnología de RA en espacios exteriores.

En **1998** aparecen las librerías ARToolKit originalmente desarrolladas por Hirokazu Kato y Mark Billinghurst (H. Kato & M. Billinghurst 1999), que continuarían en desarrollo con la colaboración del HIT Lab (*Human Interface Technology Laboratory*) en la universidad de Washington, el HIT Lab NZ de la universidad de Canterbury, en Nueva Zelanda y ARToolworks, Inc, en Seattle. Estas librerías, de libre distribución, están diseñadas para el desarrollo de aplicaciones de RA, y se convertirían en una herramienta de uso extendido durante los próximos años (Mark Billinghurst et al. 2001; Mark Billinghurst & Hirokazu Kato 2002; Cheok et al. 2002; S. Prince et al. 2002). Las librerías se basan en la codificación

de marcas fiduciales cuadradas a partir de un sistema de reconocimiento de patrones para obtener la orientación de las marcas y por tanto disponer de seis grados de libertad para el objeto virtual. Algunas aplicaciones utilizadas en los cursos de esta tesis se basan en software que utiliza estas librerías.

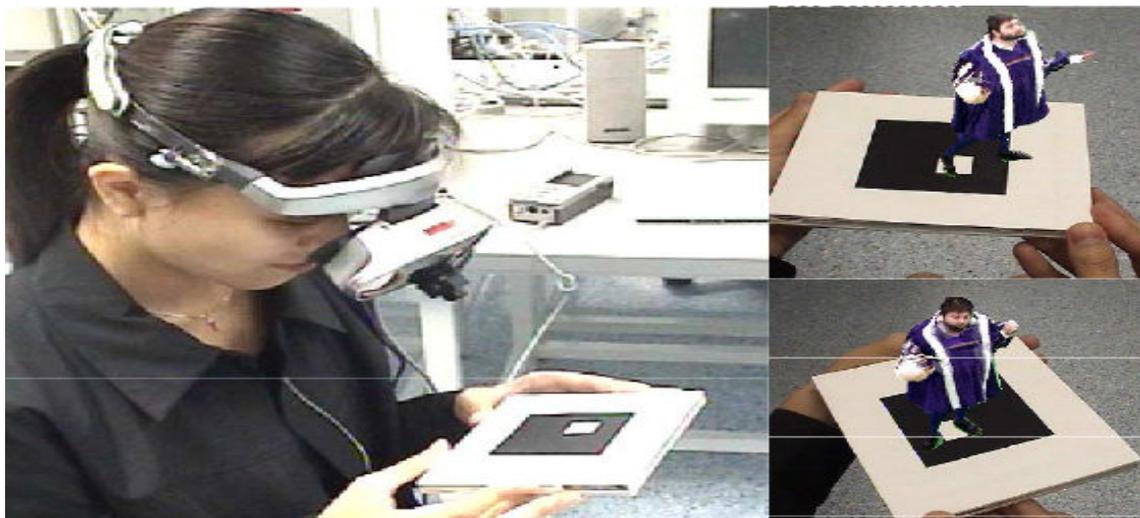


Fig. 42 Aplicación de RA basada en el uso de las librerías ARTToolkit. En Prince et al. (2002)

En este mismo año, Rekimoto et al. (1998), diseñan un sistema que permite, mediante dos tipos de registro (visual y infrarrojos) la incorporación dinámica de información digital (notas de voz, o fotografías) a los objetos con un interface móvil que permite retenerlos o moverlos. El sistema plantea por primera vez la interacción y alimentación en tiempo real de una base de datos mediante la tecnología avanzándose a la mayoría de trabajos que hasta entonces se centraban en la capacidad de localizar y registrar información del contexto real.



Fig. 43 Incorporación de información digital a los objetos. En Rekimoto et al. (1998)

A partir de este año nacen también los primeros **congresos** dedicados exclusivamente a la RA. Entre los que destacan:

- Noviembre, 1998, San Francisco, CA (USA). **IEEE International Workshop on Augmented Reality (IWAR)**.
- Marzo, 1999, Yokohama (Japón). **International Symposium on Mixed Reality (ISMR)**.
- Octubre, 2000, Munich (Alemania). **IEEE, ACM, and Eurographics International Symposium on Augmented Reality (ISAR)**.
- Septiembre –Octubre, 2002, Darmstadt (Alemania). **International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)**. Este congreso unió los dos congresos de ISMR e ISAR

El año siguiente, **1999**, con la llegada de los primeros ordenadores portátiles y la progresiva pérdida de peso de los dispositivos HMD, el uso de la RA en ambientes exteriores empieza a convertirse en una realidad (W. Piekarski et al. 1999). Hasta entonces la investigación se había centrado en la obtención de registros precisos pero siempre acotados a pequeños espacios restringidos. La aparición, un año más tarde, de *ARQuake* (B. Thomas et al. 2000), una extensión del popular juego de ordenador en primera persona, representa una revolución en las aplicaciones en espacios abiertos. La aplicación se plantea bajo una arquitectura de bajo coste y con un registro moderadamente preciso que combina el uso de GPS con el reconocimiento de imágenes (mediante el uso de librerías *ARToolkit*).

Durante el año **2000**, los trabajos de Oliver Bimber se convierten en un referente en las posibilidades que ofrece la tecnología (Bimber, Encamacao, et al. 2000; Bimber, Encarnação, et al. 2000). Sus trabajos se basan en el uso de espejos y proyectores para generar un nuevo tipo de escenas de RA. Especial mención requiere “*The Virtual Showcase*” (Bimber et al. 2001) presentado un año más tarde, junto con otros investigadores. Se trata de un nuevo *display* óptico que permite que varios usuarios observen e interactúen con el contenido físico aumentado situado dentro de la caja del

display . El efecto se consigue mediante la combinación de espejos semitransparentes divisores del haz (*half-silvered mirror beam splitters*), que permiten presentaciones estereoscópicas y superposiciones 3D junto a los elementos físicos.

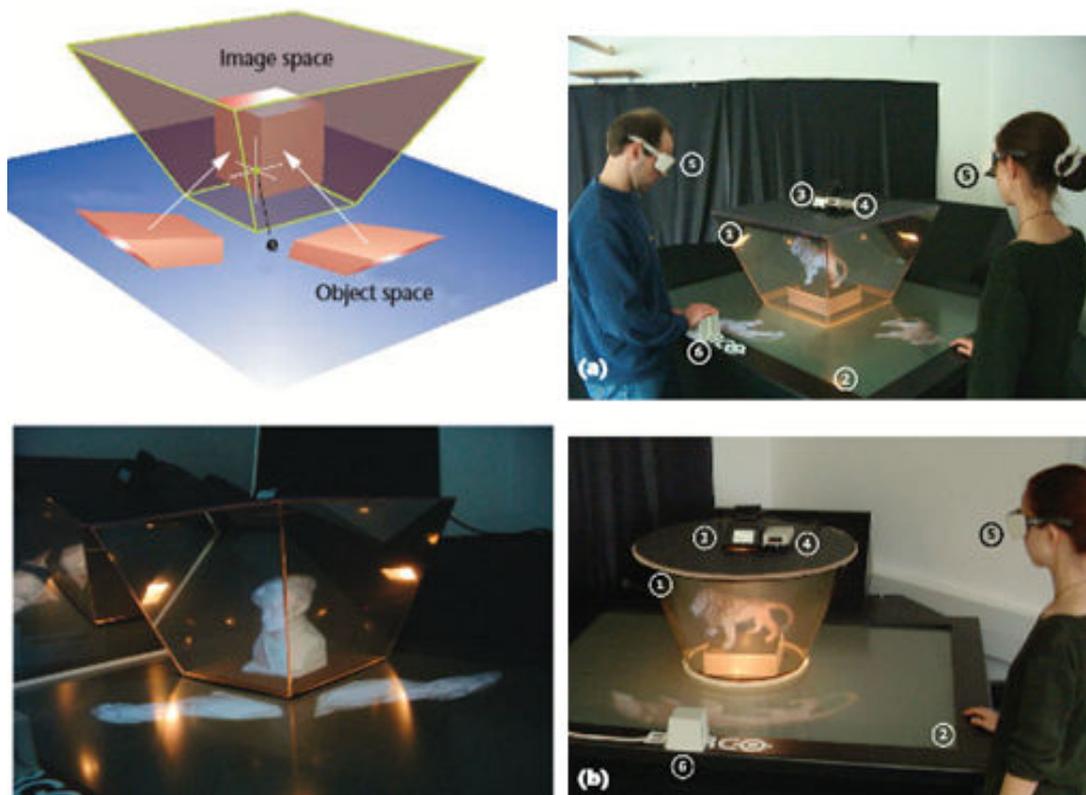


Fig. 44 “The virtual Showcase” en Bimber et al. (2001)

El uso de los dispositivos móviles (*hand held*) como herramienta de RA da un paso adelante en **2001** cuando Joseph Newman et al. (2001) desarrolla un sistema de RA en un entorno sensible (*“Sentient enviroment”*) usando dos tipos de dispositivos, un HMD y una PDA. Para Newman un **dispositivo de mano es una alternativa al HMD, ya que supone mejoras en cuanto a ligereza y facilidad de uso**. Otra ventaja en este sentido es que debido a su discreción y ligereza, posee un grado de aceptación más elevado en reuniones sociales. Sin embargo el uso de un dispositivo de mano es un sistema no inmersivo, por supuesto, y las capacidades de seguimiento y posicionamiento (*tracking*) son menos efectivas que en el caso de los dispositivos HMD.



Fig. 45 Vector de dirección usado por Newman para el renderizado de la información enviada por el sistema “sensible”. En Joseph Newman et al. (2001)

Desde el año **2002** hasta el 2004 se pone en marcha el proyecto AMIRE patrocinado por el programa EU IST. AMIRE es un software de autor basado en las librerías ARToolKit, y que permite la creación y modificación de aplicaciones de RA de manera sencilla, sin la necesidad de programación.

En el año **2003** se empieza a implantar en Europa la tercera generación de la telefonía móvil (3G), permitiendo disponer en el móvil de aplicaciones y servicios nuevos, caracterizados por una alta calidad de imagen y una elevada velocidad de transmisión de datos. El incremento de capacidad de almacenamiento de los móviles, la integración de cámaras digitales y la posibilidad de localización con RFID, hacen de éste un dispositivo idóneo para ser utilizado en aplicaciones de RA móviles. Un claro ejemplo es el trabajo publicado por D. Wagner (2007) en el Instituto *Computer Graphics and Vision*, de la *Graz University of Technology* al desarrollar ARToolKitPlus (2003-2006), unas librerías hechas a partir de ARToolKit para introducir aplicaciones de RA en los teléfonos móviles y PDAs.

Durante el año siguiente, **2004**, proliferan las aplicaciones en espacios exteriores que evalúan la usabilidad de los sistemas, aunque todavía, en su mayoría, mediante HMD y ordenadores portátiles, (Cheok et al. 2004; Broll et al. 2004). Aparecen sin embargo prototipos diseñados para PDAs (Pasman et al. 2004)

En el año **2005** aparecen las primeras aplicaciones para dispositivos móviles (*hand held displays*). Henrysson et al. (2005) construye un sistema en el que el contenido 3D podría

ser manipulado usando tanto el movimiento (tracking) de una cámara móvil como con una interfaz de botones tradicionales que servía como entrada para las transformaciones. Este mismo año, la compañía Metaio lanza la primera aplicación de RA dirigida al consumidor final llamada *KPS Click & Design*, que permitía al usuario superponer mobiliario a una imagen. Y poco después lanzaría la plataforma *Unifeye* ofreciendo a terceros la posibilidad de desarrollar soluciones comerciales de RA.

Durante el año **2006** es reseñable el desarrollo de aplicaciones en entornos abiertos y colaborativos donde la comunicación de los usuarios y o fuentes remotas resulta esencial¹⁴ (Benford et al. 2006). Este mismo año se presenta en ISMAR06 (International Symposium on Mixed and Augmented Reality) en santa barbara, el proyecto MARA¹⁵. Que ha sido el referente de los navegadores de RA (AR Browsers) durante un tiempo, y al que seguirán otras propuestas (Liarokapis et al. 2006), aunque su desarrollo fue cancelado por dificultades económicas y sobre todo por la llegada de los nuevos teléfonos Google-Android con programación abierta, mas adaptados a estas aplicaciones. EL prototipo se basaba en el uso de acelerómetros in los tres ejes X, Y, Z para determinar la orientación del dispositivo, y brújula y GPS para determinar la posición del usuario y superponer información virtual. Tal y como realizan los actuales navegadores de RA como Layar o Junaio.



Fig. 46 Imágenes del primer navegador de RA. MARA. En <http://research.nokia.com/page/219>. Febrero 2012.

¹⁴ Benford et al., 2006 presentan un estudio de un juego de realidad mixta móvil llamado *Can You See Me Now?* donde jugadores *on line* son perseguidos a través de una ciudad virtual por 'runners' (actores profesionales equipados con GPS y Wifi) que corriendo por las actuales calles de la ciudad deberán atraparlos.

¹⁵ <http://research.nokia.com/research/projects/mara/index.html>

Igualmente en este año nace Wii (Figura 19), la quinta videoconsola casera de Nintendo. El dispositivo más atrayente es su controlador inalámbrico, *Wii Remote*, que se puede utilizar como puntero y puede detectar aceleración y orientación en 3D. Este control remoto es un dispositivo relativamente económico que puede utilizarse en aplicaciones de RA para capturar las rotaciones de la cámara.

3.4.2 PRINCIPALES HITOS RECIENTES

EL año **2007** supone un hito en el uso de la RA en teléfonos móviles. Pues sale a la venta el primer *iPhone*, un revolucionario teléfono táctil, con sistema operativo propio, dotado de acelerómetro, cámara, acceso a redes wifi y otras características exclusivas, y con él un kit de desarrollador para que cualquiera pueda escribir programas para este aparato. Lo que ha dado lugar a la aparición de múltiples aplicaciones de RA casi todas basadas en posicionamiento GPS, y reconocimiento de marcadores. Aunque también basadas en el reconocimiento de imágenes como Junaio. Como alternativa al sistema iOS de iPhone, aparece Android de Google, un sistema operativo open Source, que basado en un sistema táctil, también facilita a los desarrolladores independientes crear aplicaciones en dispositivos móviles. El lanzamiento inicial del *Android Software Development Kit* apareció en noviembre de 2007.

Este mismo año cabe destacar la aparición de un nuevo método para estimar la posición de la cámara conocido como PTAM (*Parallel Tracking and Mapping*) (Klein & D. Murray 2007). Se basa en el mapeado en 3D de un entorno desconocido a partir de una serie de imágenes, y que es utilizado para determinar la posición de la cámara en relación a este espacio sin necesidad de reconocer ninguna imagen (*markerless System*). Este sistema continuara sus desarrollo en los años siguientes (Klein & D. Murray 2009), y se ofrece como la mejor alternativa al sistema de reconocimiento de imágenes en dispositivos móviles, hasta ahora limitados por capacidades computacionales.

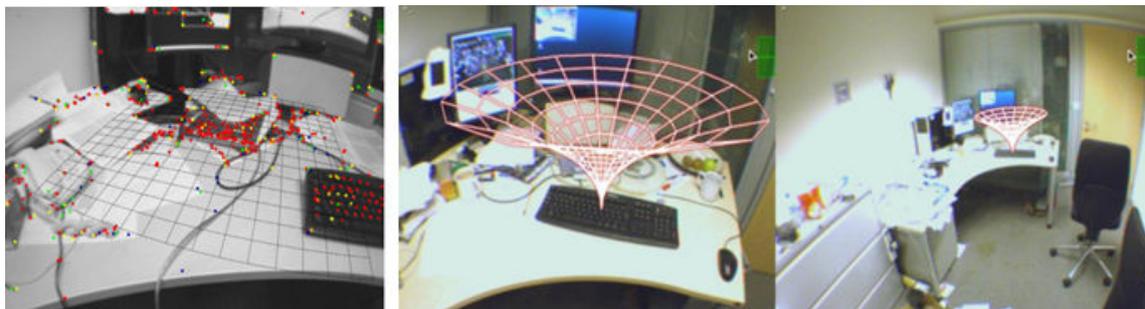


Fig. 47 Imágenes de la superposición de un objeto virtual a partir del mapeado del entorno. En Klein & D. Murray (2007)

En el año **2008** aparece *Wikitude*¹⁶ el primera navegador basado en el uso de la tecnología de RA. La aplicación se basa en el uso de GPS para la geolocalización de contenidos, sus actuales aplicaciones *Wikitude World Browser* y *Wikitude Drive*, están diseñadas para su uso en dispositivos móviles. (iPhone, Android, y Symbian) como guía de viaje y dispositivos de navegación. Paralelamente el *HIT Lab NZ* lanza la versión inicial de *BuildAR*, un programa de referencia que permite construir escenas de RA sin conocimientos de programación, y los ingenieros del departamento de ingeniería Eléctrica de la universidad de Washington dirigidos por el profesor *Babak Parviz*¹⁷, utilizan técnicas de fabricación microscópicas para combinar de una forma flexible y segura lentes de contacto con un circuito electrónico impreso (Saeedi et al. 2008). En este año se extiende además el uso de la tecnología al campo de la educación. (Kaufmann & B. Meyer 2008; Dror 2008; R. Chen & X. Wang 2008).

De manera que en el año siguiente, **2009**, la compañía *CONNECTED SERVICES LTD*, subsidiaria de Sony, en colaboración con varias escuelas, desarrolla una aplicación dirigida a la mejora de la enseñanza. (*Games Based Learning*). En concreto destaca el uso de su dispositivo Sony PlayStation Portable (PSP™) y su aplicación de RA *Second Sight*, diseñada para escuelas y para gestionar contenidos docentes. Las librerías AR Toolkit son adaptadas a Adobe Flash (FLARToolkit)¹⁸, con lo que la Realidad Aumentada llega al navegador Web. Este año además la tecnología salta al gran público al aparecer en

¹⁶ <http://www.wikitude.com/>

¹⁷ Parviz Research Group: <http://www.ee.washington.edu/research/parviz/html/>

¹⁸ <http://saqoo.sh/a/en/flartoolkit/start-up-guide>

campañas de comunicación como Coca-Cola¹⁹ o Mini²⁰, y en un número especial de la revista *Squire*²¹ (noviembre 2009) dedicado a esta tecnología, y donde el usuario puede interactuar con algunas de sus páginas.

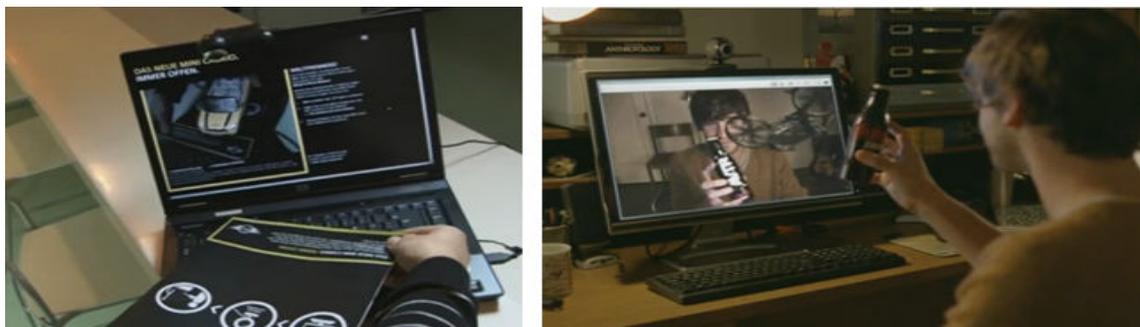


Fig. 48 Imágenes de las primeras campañas publicitarias que hacen uso de la tecnología de RA. En <http://nuevosmediosytelematica.bligo.com/realidad-aumentada-y-comunicacion> (Febrero 2013)

Aparece también el primer navegador de RA basado en el reconocimiento óptico de imágenes, Junaio de la empresa Metaio, pionera en aplicaciones de RA en dispositivos móviles. Y paralelamente, en Mayo de este mismo año, aparece la primera versión de Layar (1.0) disponible en Holanda, y en Agosto abierta en todo el mundo. Este navegador de RA para dispositivos móviles goza hoy de gran popularidad, y se basa fundamentalmente en el posicionamiento de información virtual a través de sistemas GPS. Ofrece una plataforma abierta para publicar y consultar capas de contenidos superpuestos, permitiendo a desarrolladores externos crear y publicar, de forma estructurada, sus propios contenidos.

En el año **2010**, la RA se presenta como la gran apuesta de las consolas de videojuegos. Aparece Kinect para Xbox 360, (originalmente conocido por el nombre en clave «Project Natal»), es «*un controlador de juego libre y entretenimiento*» desarrollado por Microsoft para la videoconsola Xbox 360, y en un futuro para PC a través de Windows. Permite a los usuarios controlar e interactuar con la consola sin necesidad de tener contacto físico con un controlador de videojuegos tradicional, mediante una interfaz natural de usuario que

¹⁹ <http://youtu.be/APQ2OxgCNzE>

²⁰ <http://youtu.be/31v9MO3lhWI>

²¹ <http://www.esquire.com/ar>

reconoce gestos, comandos de voz, y objetos e imágenes.

Paralelamente Sony lanza *PS Move* un interface para PlayStation 3 que integra un giroscopio, un acelerómetro y una brújula digital. Con el objetivo de detectar con total precisión su movimiento, ángulo y la posición tridimensional exacta, permitiendo a los usuarios jugar “de forma intuitiva como si ellos mismos estuvieran dentro del juego”,

Durante este año se multiplican además las aplicaciones para RA específicamente diseñadas para dispositivos móviles entre las que destacamos:

Google Goggles, una aplicación de búsqueda visual para sistemas Android e ios que permite realizar una búsqueda con imágenes en lugar de con palabras. Cuando tomas una foto de un objeto con la cámara de tu teléfono, Goggles intenta reconocer el ítem, y retornar resultados de búsqueda relevantes.

Bionic Eye, es una aplicación de RA que permite encontrar puntos de interés (POI) a tu alrededor, simplemente apuntando con el dispositivo móvil en la dirección en la que están todos ellos localizados. Contiene muchos motivos visuales como logotipos de cafeterías o restaurantes de comida rápida con la información de a qué distancia se encuentra o en qué dirección. Tiene integración completa con Google Maps.

Finalmente cabe destacar la aparición de recientes aplicaciones como **Augmented ID**, basada en el reconocimiento de rasgos físicos, o **TwitAround**, que acceden a información geolocalizada proveniente de aplicaciones como Twitter para permitir al usuario acceder a información cercana y actual compartida por otros usuarios del programa, y que abre la vía a la integración entre **redes sociales y realidad aumentada**.

En el año **2011** Metaio gana el premio a la mejor solución de seguimiento (tracking) en 3D en el congreso ISMAR, probablemente una de las soluciones más prometedoras en los próximos años. Los prototipos y las aplicaciones basadas en el posicionamiento sin necesidad de reconocimiento de imágenes se extienden (*markerless systems*). (H. Alvarez et al. 2011; Minnaar & van Rooyen 2012), y aparece la plataforma Vuforia™²² que facilita la creación de aplicaciones de RA para móviles con sus librerías de libre distribución

²² <https://developer.qualcomm.com/presentations?page=1>

basadas en el reconocimiento óptico de imágenes. Soporta los sistemas operativos los, Android, y Unity 3D.

Y finalmente en **2012** Google lanza su proyecto Google Glass, para desarrollar unas gafas de RA, basado en el concepto de HMD aunque no disponible todavía para el consumidor. Paralelamente, la tecnología se aplica en el campo de los juegos de forma masiva. Las nuevas aplicaciones básicamente basan el registro de los objetos en el reconocimiento de marcadores planos, con aplicaciones como *Eye Pet*²³, *invizimals*²⁴, o *Drift*²⁵. Otras aplicaciones basan el registro en sensores de inclinación (*Tilt Sensor-Based Tracking*) como *FairyTrails* o *ArcadeReality*²⁶ y finalmente otras utilizan el posicionamiento mediante sensores GPS como *SpekTrek*²⁷. Todas ellas consultables en Bruce H. Thomas (2012). De igual forma la aparición de aplicaciones para dispositivos móviles que utilizan la tecnología crece de forma exponencial y en todos los campos especialmente el dedicado a juegos y entretenimiento. De entre las que gozan de mayor popularidad podemos citar: Golfscape GPS Rangefinder, New York Nearest Places, SpyGlass, Theodolite, Robotvision, Cyclopedia, AR Compass, etc... Y análogamente, se suceden las aplicaciones y experiencias en entornos educativos (Parhizkar et al. 2012a; Navarro et al. 2012; X. Wang 2012; C.-M. Chen & Tsai 2012)

En los años venideros es de esperar que la tecnología siga avanzando de forma vertiginosa tal y como lo ha hecho en la última década. Los sistemas basados en el reconocimiento óptico de imágenes seguirán probablemente siendo los más utilizados especialmente en entornos educativos (Lai & C.-L. Wang 2012), por la precisión en el registro y la economía del sistema, el salto cualitativo en este tipo de sistemas ya se ha realizado al remplazar el reconocimiento de patrones (provenientes de las librerías ARToolkit) por el de imágenes reales con lo que el entorno físico puede no resultar alterado. Probablemente otra variante de este tipo de sistemas basado en el reconocimiento de características del

²³ <http://www.eyepet.com/>.

²⁴ <http://www.invizimals.com/>.

²⁵ <http://www.slapdowngames.net/>.

²⁶ <http://www.toyspring.com/>.

²⁷ <http://spectrekking.com/>.

entorno (*Natural Features Tracking*, NFT) ya iniciado en la pasada década (Neumann & You 1999) consiga implementarse en dispositivos móviles. Sus ventajas son múltiples pues, el primero depende del reconocimiento de un marcador plano que permita estimar los 6 grados de libertad necesarios para registrar el objeto o la información que se superpone en la escena, de manera que el marcador siempre ha de estar visible, además el entorno requiere de preparación previa y se ve alterado. En la segunda variante sin embargo, no es necesario el reconocimiento de marcadores (*markerless Tracking*) ya que lo que se busca es la estimación de la posición de la cámara en relación a su entorno, de manera que el usuario puede cambiar de posición libremente y el sistema reconoce dinámicamente la posición de los objetos virtuales en relación al espacio que los rodea. La complejidad del algoritmo de registro hace todavía inviable su implantación en dispositivos móviles.

De igual modo, la creciente sofisticación de los dispositivos HMD unida a la de los dispositivos móviles, ha hecho aparecer recientemente una solución intermedia que podría recoger las ventajas de los dos sistemas. Se trata de dispositivos mixtos que mediante la simplificación del visor, convertido en unas simples gafas muy ligeras, se conectan directamente a un dispositivo portátil (teléfono o UMPC) capaces del procesamiento y gestión de datos.



Fig. 49 Imágenes de nuevos prototipos tipo HMD. En www.vuzix.com

3.5 SOFTWARE

La solución más extendida para la realización de aplicaciones de RA es la utilización de librerías basadas en el reconocimiento óptico de patrones planos (o marcas fiduciales), tales como ARToolKit o MXRToolKit, Artag, y Studierstube. De estas librerías se han derivado numerosas aplicaciones como Amire²⁸, BuildAR²⁹ y más recientemente ARMedia³⁰, que están diseñados específicamente para la generación de escenas aumentadas. Este tipo de librerías utilizan técnicas de visión por computador basadas en el registro de una serie de marcas (patrones de marcas planas) para el cálculo de la matriz de transformación, siendo su uso muy extendido entre la comunidad científica. Sin embargo, existen otras librerías basadas en el mismo principio en las que el posicionamiento se realiza mediante el registro de rasgos naturales, como es el caso de las librerías BazAR³¹, y más recientemente Qcar de la empresa Qualcomm a través de su plataforma Vuforia³². Una aplicación comercial en esta línea es Junaio³³.

Entre las ventajas de este tipo de sistemas ópticos cabe destacar: la precisión alcanzada con el registro 3D (del orden del cm); la peculiaridad de que los objetos generados por ordenador se pueden relacionar fácilmente con las marcas (permitiendo interfaces tangibles); la posibilidad de implementar elementos de interacción (a partir de distancias y rotaciones entre marcas); y la economía de los sistemas (ya que suelen disponer de licencia GPL³⁴ y para el registro únicamente es necesaria una cámara Web). Sin embargo, también hay que tener en cuenta sus limitaciones, por ejemplo: la fuerte dependencia de las condiciones de luminosidad; la escala local de trabajo (distancia cámara-marca); y el hecho de que el entorno físico se ve alterado por las marcas. Especialmente en el campo

²⁸ <http://www.amire.net/>

²⁹ <http://www.buildar.co.nz/>

³⁰ <http://www.inglobetechnologies.com/en/>

³¹ <http://cvlab.epfl.ch/software/bazar/>

³² <https://developer.qualcomm.com/mobile-development/mobile-technologies/augmented-reality>

³³ <http://www.junaio.com/>

³⁴ GPL: (*General Public License*) licencia creada por la Free Software Foundation en 1989 (la primera versión). Orientada principalmente a proteger la libre distribución, modificación y uso de software. Su propósito es declarar que el software cubierto por esta licencia es software libre y protegerlo de intentos de apropiación que restrinjan esas libertades a los usuarios.

de la arquitectura o en entornos patrimoniales. Además, un gran inconveniente que se ha encontrado en el desarrollo de este tipo de software, es la necesidad de programación en un lenguaje de alto nivel, como es el C++, estando restringido a desarrolladores e investigadores. Aunque existen plataformas gratuitas que facilitan la creación de este tipo de software de forma rápida y sencilla como Atomic Web Authoring Tool³⁵

Existe otro tipo de software basado en el posicionamiento mediante GPS para la superposición de la información digital en la escena. Estas aplicaciones gozan de gran popularidad y su principal uso es de navegador de realidad aumentada. (*AR Browser*), con lo que son capaces de representar información geolocalizada a partir de las consultas de los usuarios. Un ejemplo de este tipo de programas es Layar³⁶.

Finalmente mencionamos aplicaciones como Max/Jitter³⁷, diseñado para la creación de contenido multimedia interactivo (sonido, video, imágenes), que no se basan exclusivamente en el registro de objetos mediante reconocimiento óptico o GPS, ni en la combinación de los mismos, si no que permiten la incorporación de sensores para la entrada de datos y *displays*, pudiendo ser útil para la generación de escenas de RA (Ricart 2008, p 197).

3.5.1 PRINCIPALES LIBRERIAS Y SDK.

3.5.1.1 ARTOOLKIT.

Son un conjunto de librerías desarrolladas por Hirokazu Kato y Mark Billinghurst en 1998, que continuarían en desarrollo con la colaboración del HIT Lab (*Human Interface Technology Laboratory*) en la universidad de Washington. Desarrolladas en C y C++ , dieron origen a múltiples aplicaciones de RA. Su característica principal es el uso de marcadores con un grueso recuadro negro en el borde de fácil identificación, y que permite extraer de forma efectiva los 6 grados de libertad (6DOF) necesarios para el cálculo de la posición del marcador en relación a la cámara.

³⁵ <http://www.sologicolibre.org/projects/atomicweb/es/>

³⁶ <http://www.layar.com/>

³⁷ <http://cyclimg74.com/products/max/>

3.5.1.2 MXRTOOLKIT

MXRToolKit es una aplicación con una librería de rutinas enfocada a la construcción de aplicaciones de RA. Desarrollada en el 2004 por el *Mixed Reality Lab*³⁸, de la *National University* de Singapur.

El software tiene una interfaz sencilla con funciones y estructuras orientadas a la fácil comprensión por parte del usuario de modo que no sea necesario ningún conocimiento de programación. Con este software además de relacionar marcadores con modelos 3D también se pueden relacionar con archivos de vídeo, audio o imágenes.

3.5.1.3 ARTAG

Desarrolladas por Dr. Mark Fiala (Fiala 2005), en el National Research Council of Canadá (NRC) se basa en los mismos principios. En cierto modo resultaban una mejora respecto las librerías anteriores donde a menudo la cámara detectaba marcadores inexistentes, y el sistema confundía marcadores. Estas librerías mantienen el marco exterior cuadrado, y el uso de blanco y negro, pero el procesamiento del patrón interior se realiza de forma distinta (Fiala 2005).

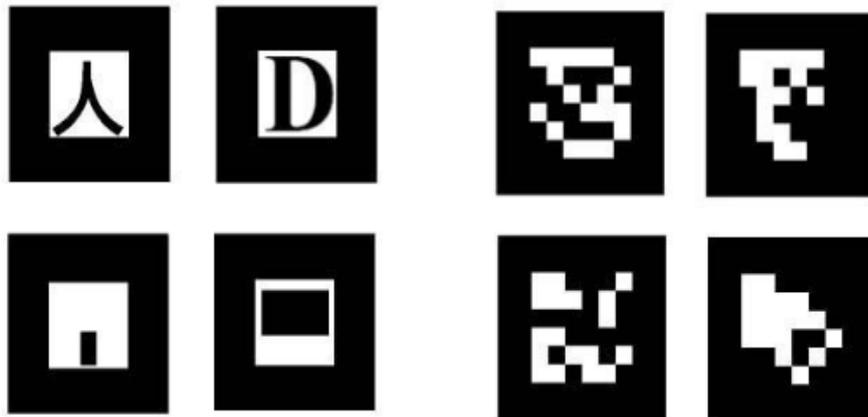


Fig. 50 Ejemplo de marcadores utilizados en las librerías ArToolkit (izquierda) y Artag (derecha). En Fiala (2005)

³⁸ <http://mixedrealitylab.org/>

3.5.1.4 OSGART.

Es otra variante de ARtoolkit. Se trata de una librería que simplifica el desarrollo de aplicaciones de RA mediante la combinación de la mencionada librería de ARToolkit con OpenSceneGraph³⁹ (que ofrece alta calidad de render, multiformato, etc...). Fue desarrollada por *The Human Interface Technology Laboratory* en Nueva Zelanda (HIT Lab NZ) en 2005 (Raphaël Grasset et al. 2005). Ofreciendo un alto nivel de integración de entrada de video, registro espacial (basado en marcas, múltiples trackers) y registro fotométrico (oclusión, sombras). Como en el standard ARToolkit, el usuario puede desarrollar aplicaciones interactivas utilizando diversos marcadores simultáneamente.



Fig. 51 Aplicaciones de las librerías Osgart con alta calidad de imagen. En Raphaël Grasset et al. (2005)

3.5.1.5 ARTOOLKITPLUS Y STUDIERSTUBE.

Librerías originalmente desarrolladas en la *University of Technology* de Viena (TU-Wien) en el año 1996, y desde el 2004 llevadas a cabo en la *University of Technology en Graz*. El grupo de investigación de Graz encabezado por Daniel Wagner, desarrolló el software *ARToolKitPlus* basado en ARToolKit (D. Wagner & Dieter Schmalstieg 2007) pero diseñado específicamente para dispositivos móviles.

³⁹ Kit de herramientas de código abierto para creación de gráficos 3d. Escrito por completo en C++ y OpenGL, es usado por desarrolladores de aplicaciones, bajo plataformas windows, OSX, GNU/Linux, IRIX, Solaris, HP-Ux, AIX y sistemas operativos FreeBSD.



Fig. 52 Dispositivos de mano (hand-held) UMPC, PDA y Smartphone, que utilizan las librerías ARToolkitPlus. UMPC En D. Wagner & Dieter Schmalstieg (2007)

Tras varios años de desarrollo y varias versiones obtuvieron un software que no compartía ninguna de las librerías de ARToolkit y que añadía nuevos elementos específicos para dispositivos móviles, lo denominaron Studierstube ES (D. Wagner & Dieter Schmalstieg 2009) La plataforma permitía un rápido desarrollo de aplicaciones de Realidad Aumentada para teléfonos móviles.

3.5.1.6 HUMANAR

Otra librería citada en (Martín Gutiérrez 2010, p 350) es Humanar, aunque no de carácter público. Desarrollada por el *Human Centered Technology* (LabHuman), de la Universidad Politécnica de Valencia, se basa en el reconocimiento de patrones de las librerías ARToolkit para calcular el verdadero punto de vista de cámara en relación con un mundo real marcador. Ha sido utilizada con éxito en diversas experiencias (Martín Gutiérrez et al. 2010; D. Pérez-López et al. 2010)

3.5.1.7 FLARTOOLKIT

Esta librería es una versión de las librerías NyARToolkit, adaptación de las librerías ARToolkit pero basada en la programación por clases y disponibles para el lenguaje java, por Tomohiko Koyama (Saqoosha) en 2008. FLARToolkit facilita el desarrollo de páginas web que utilizan RA. En la página web del autor puede encontrarse información al respecto. (<http://www.libspark.org/wiki/saqoosha/FLARToolKit/en>)

El rápido desarrollo de este tipo de librerías y de software y hardware asociado crean ciertas incógnitas respecto al uso y evolución en los próximos años. Por ejemplo, en el caso de ARToolKit, la primera demostración del sistema tuvo lugar en un congreso SIGGRAPH 1999. Que tuvo el soporte de Windows DirectShow Video y que ayudó a su uso masivo para un sin fin de presentaciones. Pero durante los últimos años ha padecido numerosas modificaciones⁴⁰ (multiplataforma, algoritmos para un mejor registro...) hasta la aparición de **ARToolKit** para **iOS y AndAR**, librerías para el desarrollo de aplicaciones especialmente en dispositivos móviles (en entornos los y Android) permitiendo el desarrollo de aplicaciones revolucionarias de AR como ARmedia.

3.5.1.8 BAZAR

Hasta ahora todas las librerías y recursos comentados se basan en el reconocimiento de patrones (tipo ARToolkit). Existen sin embargo librerías que facilitan el registro a partir de la identificación de rasgos naturales puntuales. A diferencia de las anteriores, mediante la utilización de este software no se altera el entorno físico, al no requerir marcas artificiales, por lo que puede ser idóneo para ciertas aplicaciones donde el entorno no puede alterarse. Sin embargo hay que tener en cuenta la gran cantidad de recursos que consume y que no todas las imágenes de referencia pueden ser utilizadas para obtener puntos de referencia. Estos sistemas son más sensibles todavía a los cambios de condiciones lumínicas del entorno.

Bazar⁴¹ es una librería basada en este tipo de reconocimiento. En particular permite registrar objetos virtuales a partir del reconocimiento de series de puntos en una imagen cualquiera. Ha sido desarrollada por investigadores del *Computer Vision Laboratory* (CVLAB) de la escuela politécnica de Lausanne. (Lepetit et al. 2005; Lepetit & Pascal Fua 2006)

⁴⁰ En la página web del laboratorio puede encontrarse una amplia relación de versiones con la descripción de las mejoras en cada una de ellas, así como una relación de los proyectos más importantes llevados a cabo con esta tecnología. <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/projects/>

⁴¹ <http://cvlab.epfl.ch/software/bazar/>



Fig. 53 Secuencia de detección de una imagen en distintas posiciones, condiciones de iluminación y parcialmente ocultada. En V. Lepetit et al. (2005)

3.5.1.9 QCAR

Esta librería basada, al igual que la anterior, en el reconocimiento de imágenes reales, aparece en 2010 de la mano de la empresa Qualcomm⁴². Las librerías en su conjunto se distribuyen como un SDK en la plataforma Vuforia, que permite la creación de aplicaciones en los dispositivos móviles bajo los sistemas operativos los, Android, y en la plataforma de desarrollo Unity⁴³. Existe además un servicio web para la creación automática de marcadores, y que es utilizado por los desarrolladores para la descarga de archivos DAT y XML con la información de las imágenes que serán reconocidas, una vez implementados en el código fuente de la aplicación. Esta librería es la que se ha usado en el desarrollo de la aplicación propia (U-AR) de la que se hablará más adelante.

3.5.2 APLICACIONES BASADAS EN EL RECONOCIMIENTO OPTICO DE IMÁGENES

Los programas de referencia basados en el reconocimiento óptico de imágenes durante varios años han sido **Amire** y **BuildAR**⁴⁴ del HITLabNZ, y de los que se ha hablado brevemente. Otra aplicación gratuita parecida es **Mr Planet**, que se enmarca dentro de un

⁴² <https://developer.qualcomm.com/mobile-development/mobile-technologies/augmented-reality>

⁴³ <http://unity3d.com/unity/>

⁴⁴ <http://www.buildar.co.nz/>

proyecto desarrollado por la universidad Rovira y Virgili en Tarragona (*planet Project*). El usuario es capaz de relacionar modelos 3D realizados con su editor preferido (AutoCad, 3D Studio,...) con una gran variedad de patrones. La herramienta permite modificar el escalado, rotar el modelo y trasladarlo en relación al patrón con un sencillo menú de opciones. Se incluye en la aplicación un sistema multipatrón que permite relacionar un mismo modelo 3D a varios patrones de tal forma que el modelo se dibujaría en su posición con tal solo verse un patrón de su lista. Todos ellos se basan en interfaces muy intuitivos que permiten la creación de escenas y la interacción con objetos virtuales rápidamente.

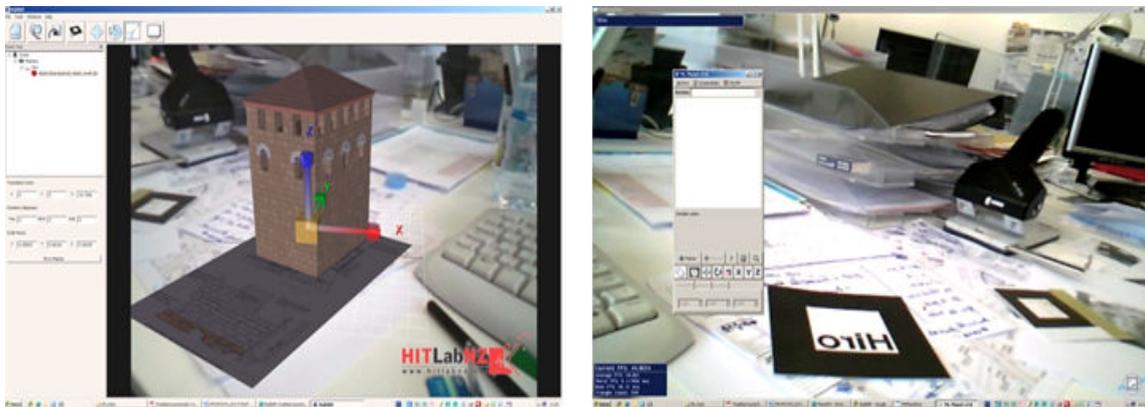


Fig. 54 Imágenes de BuildAr i Mr Planet.Fuente: Elaboración propia

Otro programa, más reciente es **ARmedia** de Inglobe Technologies⁴⁵. Consiste en un plugin que se instala en distintos programas de modelado como 3dsMax o Sketchup, y que permite crear escenas a partir de los modelos generados en el programa. Dispone además de un visor independiente (Ar player) que permite importar escenas sin necesidad de tener los programas instalados. Este programa ha sido utilizado en diversos de los cursos descritos en esta tesis. En su versión inicial, el reconocimiento de las imágenes se realizaba a partir de patrones planos (tipo ArToolkit) que podían personalizarse. Versiones posteriores han desarrollado el reconocimiento de imágenes reales y versiones para dispositivos móviles. Donde además el modelo puede ser posicionado, escalado y rotado de manera interactiva en relación al marcador.

⁴⁵ <http://www.inglobetechnologies.com/en/index.php>

Otro programa de referencia, especialmente en dispositivos móviles es **Aurasma**⁴⁶. Aparecida en 2011, y disponible en las principales plataformas móviles. Se basa exclusivamente en el reconocimiento imágenes reales (no patrones). Esta aplicación se complementa con una plataforma Web (*Aurasma Studio*) que permite a los usuarios crear y publicar sus propios canales y contenidos para compartir escenas de RA. Facilitando de alguna manera el uso de la tecnología en las redes sociales, y permitiendo compartir experiencias y contenidos en escenas de RA creadas por el propio usuario.

3.5.3 SOFTWARE BASADO EN SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GPS

Existe otro enfoque en el desarrollo de aplicaciones de RA que basan el registro y el seguimiento de los contenidos de la escena de RA en la determinación de coordenadas mediante un sistema de posición global (GPS).

Entre ellas **los navegadores de RA**, permiten combinar categorías, capas de información, canales, y otros elementos a partir de una base de datos contenida en un servidor remoto permitiendo al usuario visualizar contenidos, filtrarlos, e interactuar con ellos. Los navegadores calculan la posición del usuario en base a sus coordenadas, la brújula digital, el acelerómetro y la conexión permanente a internet, y acceden a distintas bases de datos desde las que descarga información geográfica y otros datos de diversos puntos de interés. De esta manera, la cámara captura imágenes del entorno que muestra en pantalla. El GPS determina la posición exacta y la brújula la dirección en la que se está mirando. Basándose en esta información, la aplicación toma los contenidos de la base de datos del canal creado y los superpone encima de la pantalla del móvil. Permite además la creación de filtros, para elegir el modelo en función de diversas variables asociadas a la base de datos que alimenta el canal, la cual cosa lo hacen muy similar a las consultas generadas mediante un SIG tradicional. En la figura siguiente se muestran los elementos comunes que contienen todos los navegadores de RA.

⁴⁶ <http://www.aurasma.com>

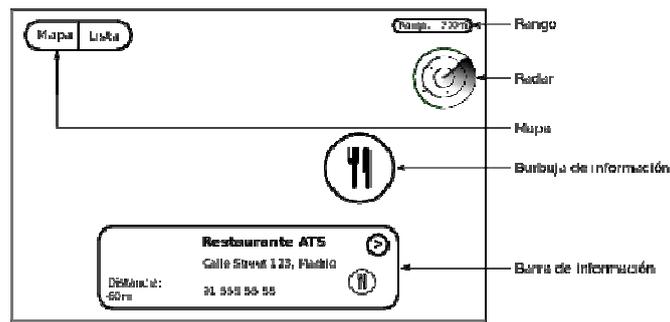


Fig. 55 Esquema del interface común entre los principales navegadores de RA. En <http://www.treearrow.com/adblog/wp-content/uploads/2011/10/arbrowser-scheme.png>

El radar muestra la posición de los puntos de interés (POI's) cercanos a la posición del usuario, que aparecen sobre la pantalla. Estos puntos pueden ser etiquetas, texto, modelos 3D o cualquier otro tipo de contenido multimedia geoposicionado y con los que el usuario puede interactuar. Y acceder a información y datos adicionales (en el ejemplo aparece el nombre del restaurante, su dirección su teléfono y distancia). El componente rango indica el radio alrededor del usuario en la que se buscan puntos. Normalmente es un parámetro configurable, aunque a menudo no es interesante que sea demasiado grande. El elemento mapa permite pasar al modo de vista de mapa, que sitúa los puntos detectados sobre un mapa y en ocasiones da indicaciones para llegar hasta ellos. El elemento lista hace lo mismo, pero en forma de lista de elementos.

Entre los navegadores que gozan de más popularidad cabe destacar Wikitude, Layar y Junaio como los tres de mayor difusión en el mercado de la movilidad y otras como Mixare por su uso como SDK de software libre.



Fig. 56 Principales navegadores de Realidad Aumentada

Wikitude: En 2008 se constituyó como el primer navegador de RA para smartphones coincidiendo con la aparición del nuevo sistema operativo para estos dispositivos de Google, Android. Es desarrollado por la empresa austriaca Mobilizy, y se utiliza

principalmente como guía de viajes que proporciona a los usuarios información geográfica, descripciones, historia e información de contacto acerca de restaurantes, edificios o lugares históricos. Localizados y georeferenciados en las bases de datos de Wikipedia, Youtube, Twitter, Flickr, Starbucks y otros servicios web. Además ofrece la posibilidad de realizar búsquedas por términos concretos y permite crear puntos de interés propios y compartirlos. Requiere conexión a Internet y no soporta geolocalización en interiores. Este navegador puede descargarse actualmente desde los dispositivos con plataformas bajo iOS (iPhone y iPad), Android, Balckberry, Symbian y Windows Phone.

Layar: Es el navegador de RA para teléfonos inteligentes por excelencia, posee más de diez millones de instalaciones y miles de desarrolladores. Creado y mantenido por la compañía holandesa SPRXMobile desde 2009, se encuentra entre las aplicaciones más descargadas de los repositorios oficiales de las distintas plataformas de movilidad. Los datos que muestra están organizados en diferentes capas provenientes de servicios web REST3 (Madden 2011) que contienen puntos de interés cercanos geolocalizados (*points of interest*, POI). Estas capas son desarrolladas por terceros utilizando un interfaz de programación de aplicaciones (API) de Layar⁴⁷. Actualmente, existen más de mil capas públicas disponibles y validadas para la aplicación. Originalmente basado en el posicionamiento GPS, la versión *Layar Vision*⁴⁸ permite la incorporación de canales que basan el registro mediante técnicas de reconocimiento óptico.

Junaio: Aparece en 2009, de la mano de la empresa Metaio, disponible para todas las plataformas móviles. Originalmente se basaba exclusivamente en el reconocimiento óptico de imágenes (al contrario que layar), pero ya permitía la incorporación de canales de información a través de una API diseñada a tal efecto. Cada uno de ellos está formado por una serie de imágenes pre configuradas a través de un servicio web, y que una vez el dispositivo reconoce, utiliza para sobreponer un objeto determinado. Uno de estos canales, permite fotografiar cualquier imagen y hacerla servir de marcador para su

⁴⁷ En el caso de estudio que se plantea utilizando esta plataforma el autor de esta tesis crea un canal de información donde ubicar las propuestas de los alumnos. En los siguientes apartados se describe la creación del canal utilizado para visualizar los contenidos.

⁴⁸ <http://www.layar.com/documentation/browser/howtos/layar-vision-doc/>

registro con un modelo ya preestablecido. Cualquier usuario de este programa, una vez registrado puede añadir canales propios de información, a los que vincular un objeto con una imagen determinada por él. Versiones posteriores incorporaron el posicionamiento de la información mediante GPS. Con este tipo de navegador cualquier imagen podía ser utilizada como marcador, incluso la fachada de un edificio, aunque la aplicación resulta inestable en condiciones de luz poco favorables o distintas a las utilizadas al tomar la fotografía que ha de servir de referencia.

Mixare Se constituye como otra alternativa para la explotación de los contenidos de Realidad Aumentada. Está basado en software libre y posee actualmente una comunidad de usuarios y desarrolladores en constante crecimiento y evolución⁴⁹. Al igual que el resto de navegadores está disponible para Android y Iphone, y funciona tanto como aplicación autónoma como para el desarrollo de otras aplicaciones basadas en su código abierto (*Open Source*). En este caso el posicionamiento de la información se realiza exclusivamente mediante GPS.

⁴⁹ <http://www.mixare.org/>

3.6 REALIDAD AUMENTADA EN EDUCACION

Desde 1990 diversos sistemas virtuales enfocados específicamente a tareas de aprendizaje han sido ensayados con éxito (Loftin et al. 1993; Youngblut 1998; Bell & Fogler 1995). Un amplio resumen de investigaciones en este campo llevadas a cabo durante los últimos 10 años puede consultarse en (Mikropoulos & Natsis 2011). Y el portal de referencia en esta línea es <http://education.mit.edu/>

Los educadores e investigadores se han mostrado tradicionalmente entusiastas con el uso de tecnologías como la que nos ocupa, en el aprendizaje y la enseñanza (Bower 2008; Dalgarno & M. J. W. Lee 2010). Esperando que las características de esta emergente tecnología, que algunos autores destacan como únicas, tales como su capacidad para promover tareas de aprendizaje y su apoyo a los procesos cognitivos de memoria (Dunleavy et al. 2008), ayuden a mejorar el grado de satisfacción de los estudiantes, y promuevan la adquisición y comprensión del conocimiento adquirido de manera más efectiva. Son muchos los proyectos y aplicaciones que se han llevado a cabo en este campo, basados específicamente en el uso de esta tecnología como herramienta docente, especialmente en tareas de aprendizaje que requieren de cierta experimentación como la habilidad espacial y el trabajo en colaboración (*collaborative*). Por otra parte los avances recientes en tecnología móvil, han convertido la RA en una tecnología asequible e universal, promoviendo su uso en el campo educativo. A continuación se describen, por su interés, algunas de estas aplicaciones.

El grupo de investigación *Interactive Media System Group*⁵⁰, del *Institute of Software Technology and Interactive System*⁵¹ (Vienna University of Technology), es pionero en el desarrollo de aplicaciones de RA en este ámbito. Este grupo desarrolló e implementó una de las aplicaciones de referencia, Construct3D (Kaufmann et al. 2000). Se trata de una aplicación diseñada para la educación en el campo de la geometría matemática. Todavía restringida, sin embargo, al uso de dispositivos tipo cascos (HMD).

⁵⁰ <http://www.ims.tuwien.ac.at/> (Agosto 2012)

⁵¹ <http://www.isis.tuwien.ac.at/> (Agosto 2012)

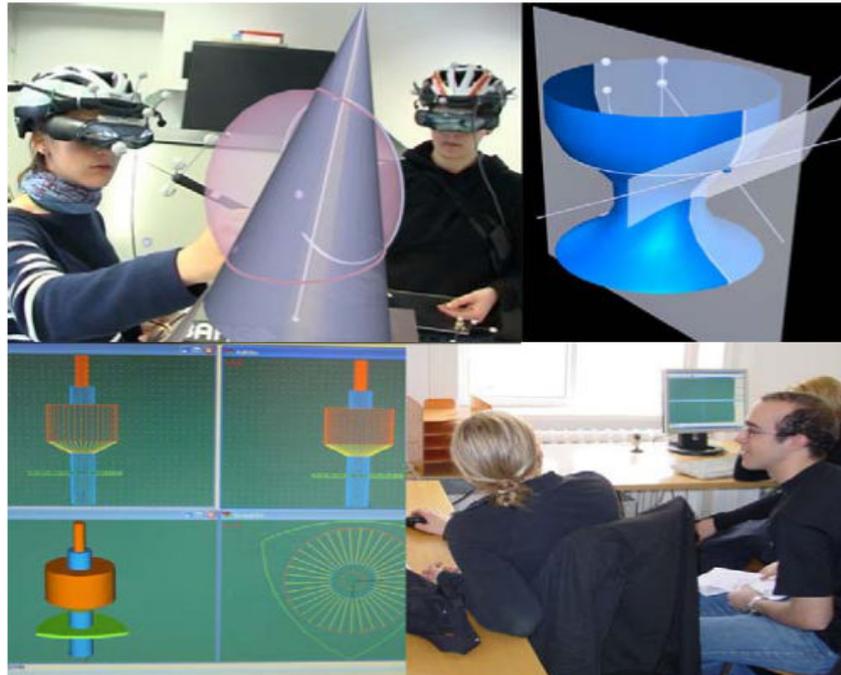


Fig. 57 Imágenes de alumnos en el entreno de sus habilidades espaciales mediante Construct 3D. En Dünser et al. (2006b)

El sistema permite la creación de escenarios geométricos de forma que alumno y profesor interactúan para explicar los contenidos geométricos. Puede ser utilizado en tres modos diferentes: modo autónomo, donde el estudiante puede ver e interactuar con los objetos construidos por él mismo; modo colaborativo, visible para todos los usuarios y modo de profesor, en el que el profesor selecciona la visibilidad para unos u otros alumnos. En (Dünser et al. 2006a), previa revisión de experiencias que utilizan tecnologías de realidad virtual, y que estudian distintos aspectos de la habilidad espacial, los autores presentan los resultados y hallazgos de uno de los primeros estudios a gran escala (215 estudiantes) que ilustra el potencial de la tecnología RA para el entreno de la habilidad espacial.

Los mismos autores, desarrollaron una aplicación educativa de contenidos de “teoría de mecanismos” (Kaufmann & B. Meyer 2008), donde mediante RA, la aplicación simulaba experimentos físicos en el campo de la mecánica y en tiempo real.



Fig. 58 Alumnos interactuando con el sistema propuesto. En Kaufmann & B. Meyer (2008)

Otro claro ejemplo pedagógico, en este caso en el campo de la química, es el ofrecido por Patrick et al. (2009) que presenta una aplicación orientada a la visualización espacial de la estructura de las moléculas. Más allá de la clásica representación 2d en pizarras o diapositivas. La cual cosa facilita la comprensión de su estructura y el comportamiento de las moléculas. En Chien et al. (2010) los autores utilizan la tecnología para crear un sistema de aprendizaje interactivo que ayuda a entender y memorizar la estructura anatómica en 3D mediante un sistema de interacción tangible de manera más efectiva.

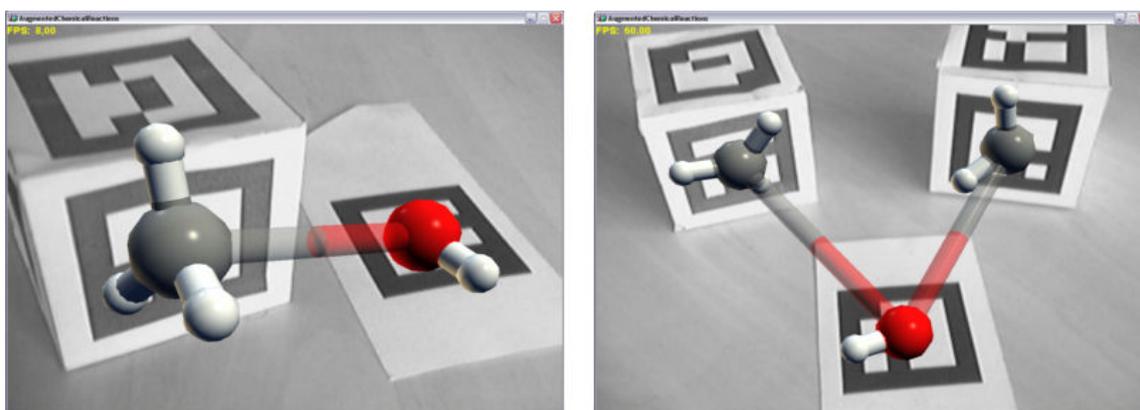


Fig. 59 Representación en el aula mediante marcadores de la estructura en 3D de una molécula. En (Patrick et al. 2009)

En la misma línea de visualización de contenidos 3D para la evaluación de la mejora de las habilidades espaciales se encuentra el software AR-Dehaes desarrollado por (Martín Gutiérrez et al. 2010) basado, al igual que el anterior en el reconocimiento óptico de

patrones, y mediante el cual los autores confirman el aumento en el desarrollo de habilidades del grupo que utiliza esta herramienta.

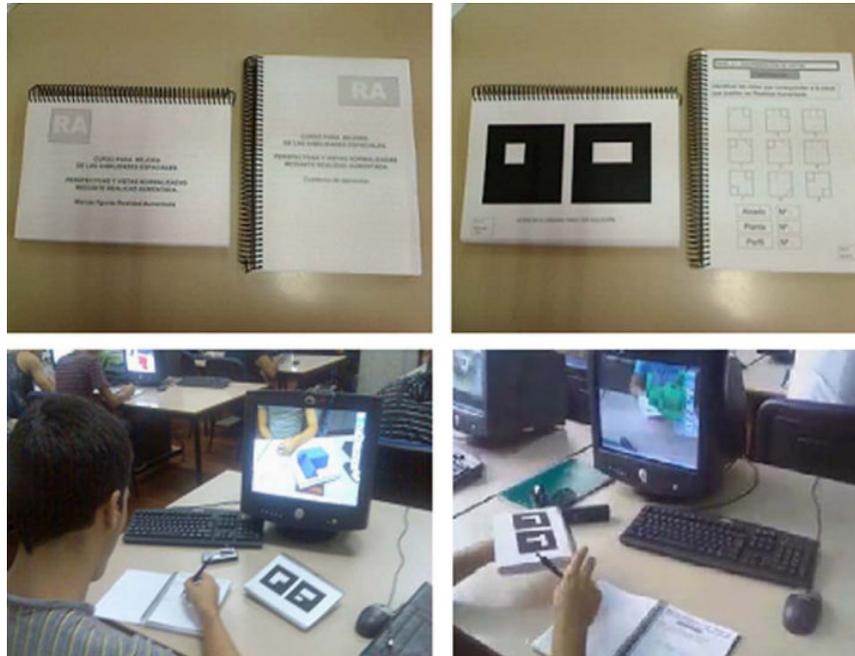


Fig. 60 Conjunto de herramientas utilizadas en la aplicación AR-Dehaes. En (Martín Gutiérrez et al. 2010)

Paralelamente en procesos de formación, se han experimentado aplicaciones para el entrenamiento de tareas específicas. En Henderson & Steven Feiner (2011), los autores experimentan el desarrollo de una aplicación para la mejora en el rendimiento de tareas de reparación y mantenimiento en el campo militar. El sistema muestra en el campo visual del operario texto, marcas, flechas y secuencias animadas dirigidas a facilitar la comprensión, localización y ejecución de distintas tareas.

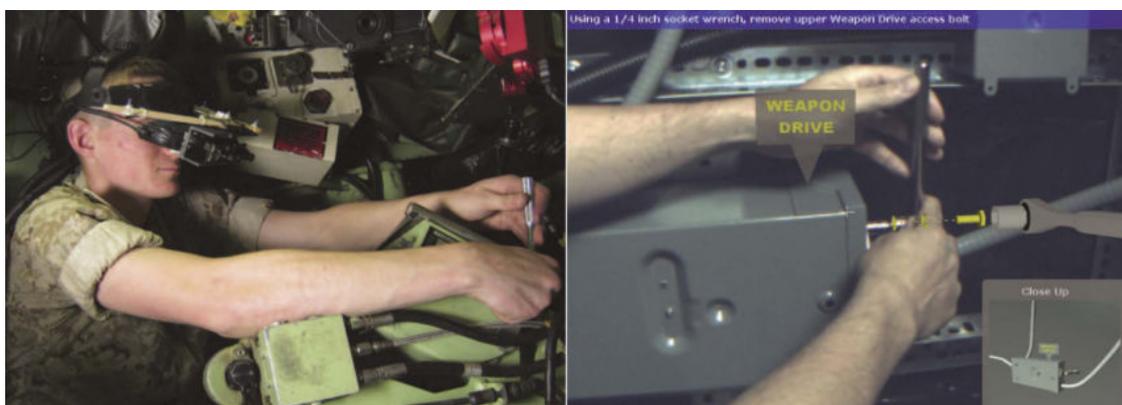


Fig. 61 Ejemplo de sistema de aprendizaje en tareas de reparación y mantenimiento Mediante RA. En Henderson & Steven Feiner (2011)

En educación médica, con objeto de entrenar a los futuros médicos anestesiólogos, (Quarles et al. 2009) proponen una aplicación de simulación con RA, del equipo empleado para anestesia en quirófanos. (VAM, *virtual anesthesia machine*). Que según el estudio realizado minimiza el problema de transición entre una máquina real y la virtual, tradicionalmente utilizada en el aprendizaje.



Fig. 62 Sistema de Visualización de una máquina de anestesia, propuesto por Quarles et al. 2009 en procesos de aprendizaje en el campo de la medicina.

En (Nilsson et al. 2011) se plantea la utilidad de la tecnología como herramienta de soporte en tareas que requieren colaboración como son los cuerpos de rescate. Planteando un estudio cercano a un caso real y donde los participantes muestran su disposición para ser utilizado en casos reales.



Fig. 63 operarios de los servicios de rescate en una práctica de un ejercicio donde se requiere coordinación y colaboración entre los distintos equipos. En Nilsson et al. (2011)

Dentro de nuestro campo, un ejemplo de estudio de aprendizaje colaborativo en materia de urbanismo y planificación territorial se puede encontrar en (R. Chen & X. Wang 2008). El sistema (TAR, *Tangible Augmented Reality*) basado en la interacción tangible, con el uso de patrones de librerías ARToolkit, concluye que con la tecnología RA se puede mejorar el diseño de las actividades a realizar por los estudiantes

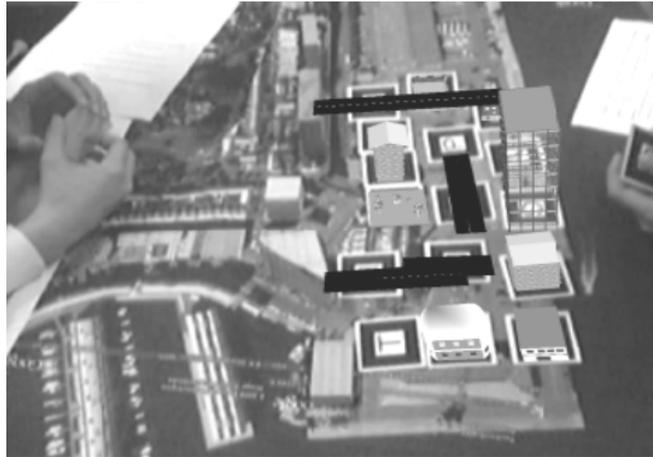


Fig. 64 Sistema de RA para el estudio de urbanismo y planificación territorial propuesto en Chen & Wang, 2008

Para Billingham & Duenser (2012) todas estas experiencias comparten una serie de componentes como son: un procesador, un visor (*display*) y un sistema de seguimiento (*tracking systems*). Estos tres componentes esenciales pueden presentarse de muchas maneras distintas, sin embargo dos tipos de configuraciones destacan por encima del resto. Son los denominados “**Libros Aumentados**” (*augmented Books*) y más recientemente las aplicaciones para **dispositivos móviles** (*hand held devices*). Ambas configuraciones se comentan a continuación.

Desde la presentación de MagicBook (Mark Billingham et al. 2001), un interface en formato de libro convencional que demostraba como éstos objetos reales podían servir de mecanismo para integrar contenidos reales y virtuales. El uso de estos “libros aumentados” ha resultado un clásico en proyectos y experiencias educativas (Singh et al. 2004; Raphael Grasset et al. 2007; Raphaël Grasset et al. 2008; A. Clark et al. 2011; Dünser et al. 2012)

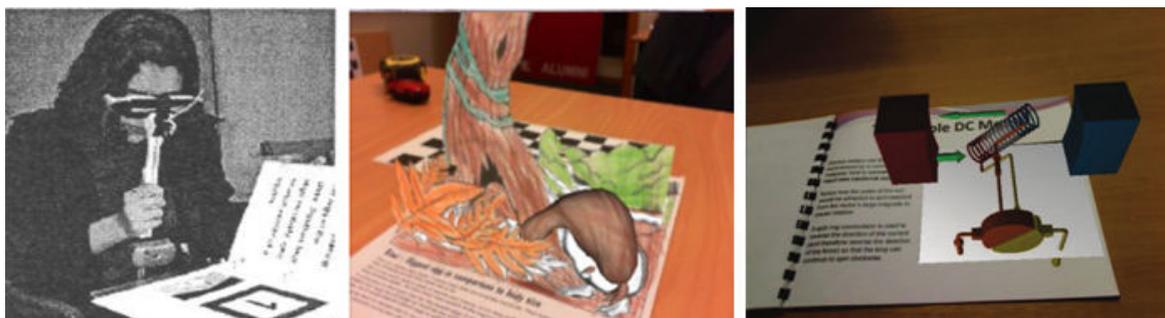


Fig. 65 Imágenes de ejemplo del uso de libros en educación. Izquierda: Billinghamurst et al. (2001). Centro: A. Clark et al. 2011. Derecha: Dünser et al. (2012)

Una ventaja evidente de este tipo de libros o interfaces es su interactividad pues los usuarios pueden manipular sus hojas para visualizar contenidos adicionales, desde distintas perspectivas y en diferentes escenas. Esta interacción tan básica es como una prolongación natural de un libro convencional, y este tipo de configuración permite también la interacción mediante la mirada, o los gestos, de manera que el usuario (el alumno en este caso) apunta a distintas zonas del libro y activa acciones como destacar determinadas zonas, mover objetos virtuales, o iniciar una animación. Es por ello que este tipo de interfaces tangibles facilitan una nueva e intuitiva forma de aprender, en muchos casos a través de juegos y experiencias colaborativas (Mark Billinghamurst & Duenser 2012b).

El uso de la tecnología mediante dispositivos móviles, por su parte, todavía se encuentra en una fase inicial. La mayoría de las experiencias consultadas se basan en el uso de marcadores procedentes de las librerías ARToolkit (Behzadan et al. 2011) aunque algunas de ellas ya se han implementado con éxito utilizando librerías basadas en el reconocimiento óptico de rasgos naturales (Parhizkar et al. 2012b). La mayoría están enfocadas en añadir algún tipo de información virtual para, de forma visual, mejorar o completar algún tipo de contenido.

Así mismo, una ventaja evidente del uso de este tipo de dispositivos, es su ubicuidad. Los alumnos pueden visualizar contenidos didácticos en cualquier lugar, esto significa que los alumnos pueden permanecer implicados en su proceso de aprendizaje tanto dentro como fuera del aula. El proyecto CityViewAR⁵² es un ejemplo en esta línea, donde el alumno

⁵² www.hitlabnz.org/cityviewer

puede obtener información histórica “in situ” de un determinado elemento arquitectónico.

De manera que la interactividad que proporcionan los sistemas de RA parece ser clave en la mejora del aprendizaje. Los sistemas móviles por su parte, son especialmente útiles en la motivación de los estudiantes que exploran sus alrededores y desarrollan sus habilidades para resolver problemas en colaboración con el grupo.

A medida que los sistemas incrementen en movilidad aparecen nuevas oportunidades de creación de experiencias educativas interactivas.

Las investigaciones futuras deben abordar las oportunidades y desafíos de los sistemas móviles y cómo éstos pueden enriquecer la enseñanza en clase, ofreciendo soluciones novedosas para estudiantes y educadores, tanto en la creación, edición y visualización de contenidos.