



Educación
Cuaderno Red de
Cátedras Telefónica



Universidad de Valladolid

Realidad Aumentada en la Educación

Cátedra Telefónica de la Universidad de Valladolid

Recorrido por la evolución de la Realidad Aumentada desde su inicio hasta nuestros días, con especial atención a su uso en la educación.

Juan Alberto Muñoz Cristóbal
Julio 2012

Biografía



Juan Alberto Muñoz Cristóbal

Es Ingeniero Técnico (UVa) y Grado Universitario (URL) en Telecomunicación, Máster Universitario en Software Libre (UOC) y en Investigación en TIC (UVa) y MBA (EAE, UB). Ha trabajado 10 años en el sector privado como Ingeniero en varias operadoras de telecomunicaciones. Actualmente trabaja como Investigador en el grupo de investigación GSIC-EMIC (www.gsic.uva.es) de la Universidad de Valladolid, donde investiga en la aplicación de las TIC en el aprendizaje.

Colaboraciones

El presente trabajo ha sido realizado en el seno del grupo de investigación GSIC-EMIC, de la Universidad de Valladolid, y ha contado con la colaboración de las siguientes personas:

- **Yannis Dimitriadis Damoulis**, Catedrático del Área de Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid.
- **Juan Ignacio Asensio Pérez**, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid.
- **Eduardo Gómez Sánchez**, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid.
- **Bartolomé Rubia Avi**, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Pedagogía, Universidad de Valladolid.
- **Alejandra Martínez Monés**, Profesora Titular de Universidad del Departamento de Informática, Universidad de Valladolid.
- **Miguel Bote Lorenzo**, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid.
- **Iván M. Jorrín Abellán**, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Pedagogía, Universidad de Valladolid.
- **Davinia Hernández Leo**, Profesora Lectora del Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, Universitat Pompeu Fabra
- **Guillermo Vega Gorgojo**, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid
- **Luis Pablo Prieto Santos**, Investigador Contratado del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid.
- **Beatriz Bargiela Flórez**, Beca en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid.

Resumen

Con el avance de las tecnologías en los últimos años, principalmente Internet y los nuevos dispositivos móviles como *smartphones* y tabletas, la Realidad Aumentada se ha convertido en una tecnología accesible casi para cualquier usuario, y no sólo en entornos profesionales o de investigación. Por ello, han aparecido múltiples aplicaciones software, así como muchos proyectos de investigación en diversos campos, entre ellos la educación, que hacen uso de las posibilidades de la Realidad Aumentada. En el presente trabajo se realiza una revisión de la evolución de la Realidad Aumentada desde su aparición en la década de los 60 hasta la fecha, así como de su uso en la educación.

Índice

1. Introducción
2. Realidad Aumentada
 - 2.1. Dispositivos de RA
 - 2.2. Interfaz de usuario
 - 2.3. Posicionamiento de objetos virtuales
 - 2.3.1. Posicionamiento con marcadores
 - 2.3.2. Posicionamiento por reconocimiento visual
 - 2.3.3. Posicionamiento por localización
 - 2.4. Alineación de objetos virtuales y reales
 - 2.5. Software de RA
 - 2.6. Usos de la RA
3. Realidad Aumentada en la educación
4. Realidad Aumentada en el aprendizaje móvil (*m-learning*)
5. Conclusiones
6. Apéndice. Blogs y páginas web de interés
7. Referencias

1. Introducción

La Realidad Aumentada (RA) puede definirse como una tecnología que combina objetos virtuales y reales en un entorno real, de una forma interactiva y en tiempo real, y que alinea los objetos virtuales y reales entre sí (Azuma, Bailiot et al. 2001). Podría parecer que la RA es una nueva tecnología que ha aparecido en los últimos años, pero no es así. El primer prototipo de un interfaz de RA se presentó en la década de los sesenta (Sutherland 1968). Estaba muy lejos en cuanto a usabilidad de las gafas de RA que ha presentado recientemente Google, *Google Glasses*¹, pero fue el primer dispositivo para visualizar RA, hace más de 45 años. Desde ese proyecto pionero hasta el día de hoy, ha habido muchos trabajos de investigación alrededor de la RA, sus tecnologías, y sus potencialidades en múltiples campos, uno de los cuales es la educación.

Sin embargo, la aplicación real de los productos desarrollados por los trabajos de investigación hasta fechas recientes no era muy viable, especialmente en educación. Los dispositivos que se utilizaban para visualizar la RA eran aparatos enormes, costosos, y la tecnología de uso común para visualizar los objetos virtuales y sincronizarlos con los reales no tenía un rendimiento suficiente para aplicaciones que exigieran potencia gráfica (como por ejemplo, los objetos 3D) (Papagiannakis, Singh et al. 2008; Dörner, Lok et al. 2011).

Este problema de usabilidad de la RA en situaciones auténticas de aprendizaje ha cambiado los últimos años, con el avance de la tecnología. Especialmente por la mejora de las capacidades de procesamiento y gráficas de dispositivos móviles, como *smartphones* y tabletas (Schmalstieg, Langlotz et al. 2011). Ello ha hecho que la RA pueda usarse ampliamente, y que sus potencialidades en educación puedan explotarse, en combinación con las posibilidades que ofrecen los dispositivos móviles para abrir los escenarios educativos más allá de las aulas. En la era tecnológica en que vivimos, el mundo ha cambiado en cuanto al actual acceso ubicuo a información y comunicación. Este hecho permite extender el contexto del aprendizaje más allá de las tradicionales restricciones físicas y temporales de la educación formal en el aula y permite modelos como el de "aprendizaje a lo largo de la vida" (Sharples, Corlett et al. 2002; Sharples, Sanchez et al. 2009). La RA puede formar un papel importante en estos nuevos contextos educativos (Johnson, Smith et al. 2011; Sutherland, Eagle et al. 2012).

En el presente documento se describe, en primer lugar, la evolución que ha experimentado la RA desde su inicio hasta nuestros días. A continuación se centra el análisis en su uso en la educación, para finalizar describiendo trabajos de investigación representativos de RA en el aprendizaje móvil.

¹ <https://plus.google.com/111626127367496192147/posts>. Última visita: Junio 2012

2. Realidad Aumentada

Hay bastante acuerdo en la comunidad científica en que el primer trabajo de investigación que implementó RA fue el de Ivan E. Sutherland en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, de las siglas en inglés) y en Harvard en la década de los 60 (Sutherland 1968). En él, se construyó un sistema que permitía ver objetos tridimensionales virtuales superpuestos a un entorno real. Era un *Head Mounted Display* (HMD, en inglés, "Visualizador Montado en Cabeza") que implementaba un sistema para rastrear la posición de la cabeza del usuario, y en consecuencia, mostrar la perspectiva correspondiente de los objetos virtuales 3D. El sistema se muestra en la Figura 1 (izda), donde puede apreciarse la aparatosidad del equipo, ya que la tecnología en aquella época era limitada.

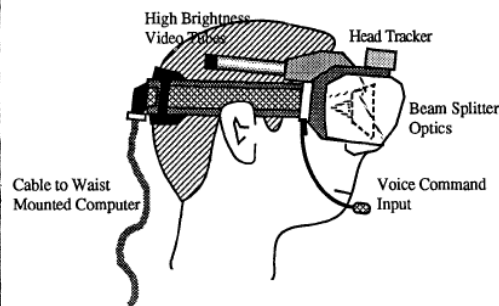
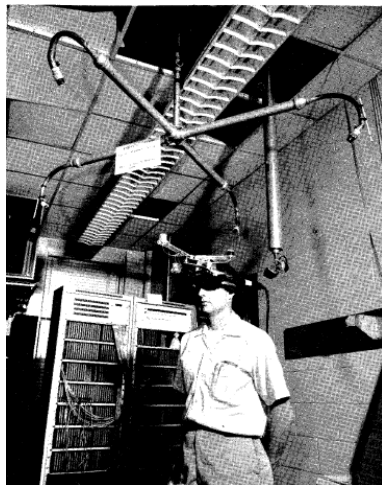


Figura 1. Sistema de RA de Sutherland en 1968 (izda) y de Caudell y Mizell en 1992 (dcha)

Por aquel entonces todavía no se manejaba el término "realidad aumentada". No fue hasta 1992 cuando Caudell y Mizell lo utilizaron, en un artículo de investigación en el que presentaban también un HMD, mucho más avanzado que el de Sutherland, como puede verse en la Figura 1 (dcha), orientado a su uso en la manufactura aeronáutica (Caudell and Mizell 1992). En dicho artículo definen Realidad Aumentada como una tecnología que permite aumentar con información el campo de visión del usuario.

La década de los 90 fue intensiva en la investigación en RA, y es por ello que en ese momento ya puede considerarse la RA como un campo propio de investigación (van Krevelen and Poelman 2010). Aparecieron múltiples conferencias y *workshops* del campo, como el Simposio Internacional en Realidad Aumentada y Mixta² (ISMAR). Tanto es así, que en 1997 Ronald Azuma realizó un famoso artículo de estado de la técnica del campo (Azuma 1997), que tuvo que extender en 2001 (Azuma, Baillet et al. 2001), debido a la gran cantidad de trabajos de investigación que aparecieron esos años. Dichos artículos de estado del arte son referentes en el campo, y aunque en cuanto a tecnologías ha habido gran avance

² <http://ismar-society.org>. Última visita: Junio 2012

hasta la fecha, en cuanto a la conceptualización aún se mantienen sus bases. Así, en el de 2001, definen un sistema de realidad aumentada como un sistema que tiene las siguientes propiedades:

- Combina objetos reales y virtuales en un entorno real;
- se ejecuta interactivamente y en tiempo real;
- registra (alinea) objetos reales y virtuales entre sí.

Ésta es una definición que ha permanecido y que es la más utilizada hasta la fecha, aunque otras veces se simplifica utilizando únicamente la primera de las tres propiedades. Puede observarse que según esta definición, la RA no está limitada a la vista, sino que se puede aplicar a todos los sentidos, como sonidos (Azuma 1997; Azuma, Bailiot et al. 2001). También es interesante destacar que utiliza la palabra "combina", ya que no considera únicamente añadir objetos virtuales, sino que también puede eliminar objetos reales.

Con respecto a los límites de "qué es realidad aumentada", un trabajo interesante es el de Milgram y Kishino (1994), los cuales definen el concepto de "continuo de virtualidad", en donde hablan de una "realidad mixta" en donde coexisten objetos virtuales con objetos reales. La Figura 2 explica esto.

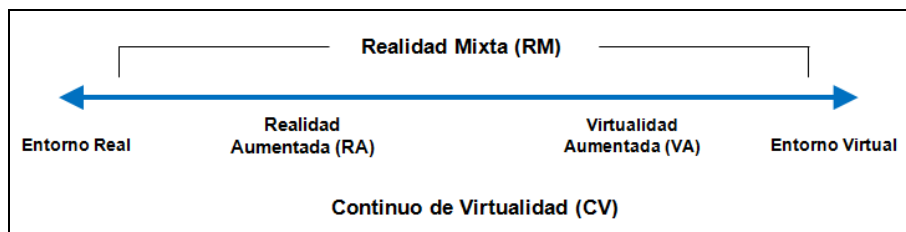


Figura 2. Continuo de virtualidad según (Milgram and Kishino 1994)

Así, habría un continuo de virtualidad en donde en un extremo habría un entorno puramente virtual, y en el otro extremo un entorno puramente real. Entre estos dos extremos tendríamos una realidad mixta. Si estamos más cerca del entorno virtual, entonces hablaríamos de una virtualidad aumentada, y si estamos más cerca del entorno real, entonces hablamos de realidad aumentada. Esta concepción de realidad mixta y del continuo de virtualidad es bastante aceptada por la comunidad investigadora.

Un trabajo muy interesante y precursor, a principios de la década de los 90, fue el de Pierre Wellner: *The DigitalDesk* (en inglés, el escritorio digital) (Wellner 1991; Wellner 1993). Hasta entonces, la investigación se había centrado en los HMD, pero Wellner dio una vuelta de tuerca, aumentando la realidad en un escritorio mediante un proyector y una cámara de vídeo. Con la cámara de vídeo era capaz de procesar la información capturada, y con el proyector aumentaba el escritorio. Así, las propias manos hacían de interfaz, como si el escritorio fuese una superficie táctil. En la Figura 3 puede verse el primer prototipo del DigitalDesk.

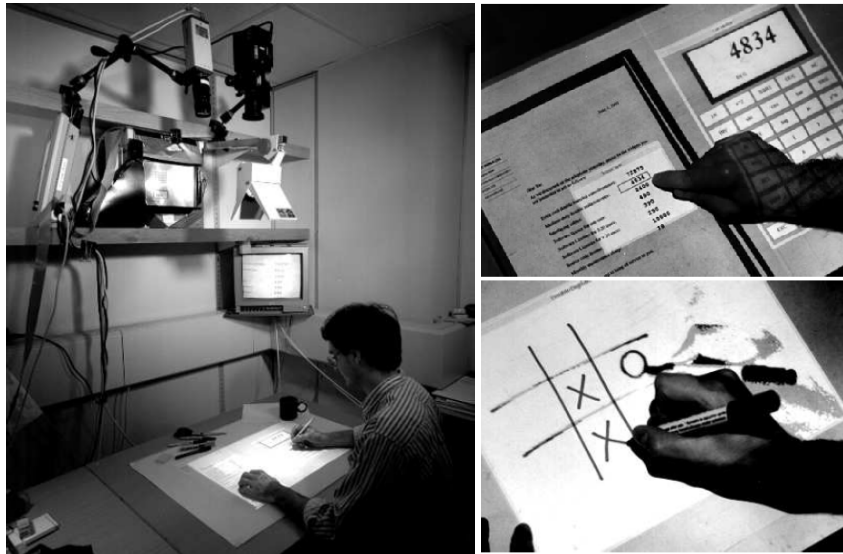


Figura 3. *The DigitalDesk* (Wellner 1993)

Con él, Wellner consiguió crear aplicaciones tan avanzadas para la época como un equivalente táctil al programa "Microsoft Paint", o jugar de forma síncrona a las "tres en raya" con un jugador remoto con otro DigitalDesk. Esto último puede verse en la parte derecha de la Figura 3. Wellner introdujo un nuevo tipo de realidad aumentada, la realidad aumentada mediante proyección. Hasta ese momento, la investigación se había centrado en aumentar la realidad mediante cascos HMD.

A continuación se entra más en detalle en los tipos de dispositivos que permiten el uso de RA así como las técnicas utilizadas para combinar objetos virtuales y reales. También se hace un pequeño resumen del software más común para generar y percibir RA y se describen brevemente los usos de la RA en distintos campos.

2.1. Dispositivos de RA

Así pues, los dispositivos³ utilizados para combinar el entorno real con los objetos virtuales pueden clasificarse de la siguiente forma, adaptando las clasificaciones típicas manejadas por (Azuma, Bailiot et al. 2001) y (van Krevelen and Poelman 2010).

- Olfativos o gustativos: Poco usados o apenas existentes.
- Auditivos: Suelen complementar a dispositivos visuales, generando sonidos para aumentar la inmersión en la RA.
- Visuales: Son los más utilizados. Pueden clasificarse, en función del mecanismo que usen para combinar objetos virtuales y reales como:
 - Ópticos: Mediante tecnologías ópticas combinan los objetos virtuales y los reales, y por lo tanto, por norma general, se ven los objetos reales

³ Suele utilizarse la palabra de origen anglosajón "displays" para denominar a los "dispositivos" de RA, dado que sugiere mucho más el concepto de "percepción" de RA. Sin embargo, en el presente documento se utiliza la palabra "dispositivo" por estar "display" propuesta actualmente para su eliminación del lenguaje español por la Real Academia de la Lengua Española.

directamente. Generalmente son dispositivos que se llevan en la cabeza, como HMDs, gafas o lentillas (ver Figura 5), aunque también pueden ser de otro tipo, como placas transparentes fijas que muestran los objetos virtuales (ver más adelante Spinnstube, en la Figura 18).

- Vídeo: Se captura el entorno real con una cámara de vídeo y se muestra la composición de objetos reales y virtuales mediante vídeo. Por lo tanto, el entorno real no se ve directamente, sino a través de algún tipo de pantalla. También algunos HMDs o gafas de RA son de este tipo, al igual que monitores y dispositivos móviles como *smartphones* o tabletas. Pueden verse ejemplos de este tipo, por ejemplo, en la Figura 14, la Figura 21 y la Figura 23.
- Proyección: Los objetos virtuales se proyectan (con un proyector) sobre los reales. Son ejemplos el DigitalDesk, anteriormente mencionado, así como los sistemas SmartSkin (Rekimoto 2002) y EnhancedTable (Koike, Nagashima et al. 2005) (Figura 4), Sixthsense⁴ (Figura 8) y Tinkerlamp (Dillenbourg and Jermann 2010) (Figura 15).



Figura 4. RA por proyección. SmartSkin (izda), 2002; EnhancedTable (dcha), 2005

- Hápticos: Son dispositivos que utilizan el sentido tacto y la cinestesia (percepción de movimiento), de forma que se reciben movimientos o impulsos, o información virtual por el tacto (se tocan objetos virtuales). Suelen utilizarse en combinación con los visuales.

Por otro lado, los dispositivos de RA pueden clasificarse en función de dónde se ubiquen. Así, pueden ser (van Krevelen and Poelman 2010):

- *Head-worn* (de cabeza): Se llevan en la cabeza. Pueden ser cascos (HMD) (Figura 1), gafas (Figura 5, izda y centro), *retinales* (se proyecta directamente en la retina), lentillas (Lingley, Ali et al. 2011) (Figura 5, dcha), etc. Además, pueden ser de distinto tipo (vídeo, ópticos, etc).

⁴ <http://www.prnavmistry.com/projects/sixthsense/>. Última visita: Junio 2012



Figura 5. Ejemplos de dispositivos *head-worn* de RA. Izda: Gafas comerciales⁵; centro: Google Glasses¹; dcha: lentes (Lingley, Ali et al. 2011)

- *Hand-held* (de mano): El dispositivo va en las manos. Son de este tipo las tabletas, los teléfonos móviles, las PDAs (del inglés "*Personal Digital Assistant*", "Asistente Digital Personal"), etc. Pueden verse ejemplos en la Figura 21, la Figura 23 y la Figura 26.
- Espacial: Están localizados de manera fija en el entorno. Pueden ser pantallas de ordenador, pizarras digitales, equipos formados por proyector y cámara, etc. La Figura 3, la Figura 4, la Figura 14, la Figura 15 y la Figura 18 muestran ejemplos de dispositivos de tipo espacial.
- Luego hay variaciones sobre los anteriores en casos menos generalizados. Por ejemplo, para la RA con proyección, hay aproximaciones en las que el proyector se lleva en el cuerpo, aunque no en la cabeza o en la mano necesariamente. Un ejemplo es el proyecto Sixthsense⁴ del MIT (Figura 8).

2.2. Interfaz de usuario

Hay distintas formas de interactuar con la realidad aumentada, aunque la interacción con los objetos virtuales no es sencilla, y no todos los dispositivos lo permiten (algunos sólo permiten la visualización). A continuación se clasifican las interfaces de RA en cuanto a la forma en que se interactúa con ella.

- Interfaces tangibles: Se utilizan objetos físicos que se pueden manipular, los cuales tienen asociados objetos virtuales. De esta forma, puede interactuarse con el objeto virtual mediante el objeto real al que está asociado (Fjeld, Voorhorst et al. 1999; Azuma, Baillet et al. 2001; Billinghamurst, Kato et al. 2008; Schneider, Jermann et al. 2011). Pueden verse ejemplos de interfaces de este tipo en la Figura 14 y la Figura 15, ya que permiten interactuar con los objetos virtuales manipulando objetos físicos sobre los que se visualizan los virtuales.
- Interfaces hápticas: Son similares a las tangibles, pero la interfaz proporciona una realimentación al usuario. El objeto real puede simular ser un objeto virtual, proporcionando al usuario una respuesta que le hace "sentir" la interacción con el objeto virtual (Azuma, Baillet et al. 2001; Sziebig 2009; van Krevelen and Poelman 2010). La respuesta puede ser en forma de vibración, impulso, movimiento, presión, etc. Un

⁵ http://www.vuzix.com/ar/products_star1200.html. Última visita: Junio 2012

ejemplo puede ser la "vaca háptica"⁶, un proyecto de investigación para la formación de veterinarios, que utiliza una vaca háptica para palpar virtualmente el interior de una vaca artificial, de tal forma que el usuario "siente" que manipula los órganos internos de una vaca.

- Interfaces táctiles o tocables. Se utiliza el tacto para interactuar con los objetos virtuales. Son ejemplos las pantalla, mesas o dispositivos táctiles (Dillenbourg and Evans 2011; Schneider, Jermann et al. 2011), como la mesa del sistema SmartSkin, en la Figura 4 (dcha), que utiliza sensores para detectar que se ha tocado la mesa. La diferencia con las interfaces tangibles es que en este caso no se manipulan objetos, simplemente se toca la interfaz.
- Interfaces gestuales (van Krevelen and Poelman 2010; Dillenbourg and Evans 2011). En este caso, la interfaz de usuario es capaz de reconocer al usuario (sus movimientos, etc), y de esta forma permite interactuar con los objetos virtuales. Son ejemplos los sistemas de RA mediante proyección y videocámara que reconocen las manos o dedos del usuario (como el sistema EnhancedTable de la izquierda de la Figura 4), o los que utilizan proyección y otros sensores para detectar el movimiento o la posición del usuario (como Sixthsense, en la Figura 8). Por ejemplo, muchos sistemas utilizan el sensor Kinect, de Microsoft (originalmente pensado para una consola de videojuegos), como el proyecto "Augmented Reality SandBox"⁷, en la Universidad de California-Davis (en español "Caja de Arena de Realidad Aumentada"), que realiza simulaciones topográficas mediante proyección, sobre una caja de arena (Figura 6).



Figura 6. Proyecto Augmented Reality SandBox⁷

2.3. Posicionamiento de objetos virtuales

Algo fundamental de la RA es el posicionamiento de los objetos virtuales en el entorno real. Se utilizan distintos métodos para posicionar los objetos. Básicamente, para posicionar un objeto en RA, el sistema

⁶ http://www.live.ac.uk/html/projects_haptic_01.html. Última visita: Junio 2012

⁷ <http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/SARndbox/>. Última visita: Junio 2012

que genera la RA necesita conocer la ubicación del objeto y la ubicación del usuario en el entorno físico. Esto último es especialmente importante en caso de que se pretenda cambiar la perspectiva del objeto virtual en función del movimiento del usuario, y es crítico si el objeto virtual es tridimensional (un modelo 3D). Lo ideal sería detectar un movimiento del usuario con 6 grados de libertad (van Krevelen and Poelman 2010), que significa que el movimiento se modela con 3 variables para la posición y 3 ángulos para orientación. De esta forma puede rastrearse prácticamente cualquier movimiento y giro del usuario. Sin embargo, un rastreo de este tipo no es sencillo en todas las situaciones. Para posicionar el objeto virtual se utilizan principalmente marcadores, reconocimiento visual o localización.

2.3.1. Posicionamiento con marcadores

Un marcador (o etiqueta) es un objeto físico que el dispositivo de RA es capaz de detectar. Así, pueden asociarse objetos virtuales a dichos marcadores, y el dispositivo podría mostrar el objeto virtual cuando detecta el marcador (Want, Fishkin et al. 1999; Billinghurst, Kato et al. 2001). Hay múltiples tipos de marcadores, que los dispositivos pueden detectar mediante distintos sensores. Así, por ejemplo pueden ser marcadores que se detecten con una videocámara, como códigos de barras o bidimensionales, o imágenes que el dispositivo es capaz de reconocer (Billinghurst, Kato et al. 2001). También pueden ser marcadores que el dispositivo pueda detectar mediante radio frecuencia, como los RFIDs o NFCs (Want, Fishkin et al. 1999; Pérez-Sanagustín, Ramirez-Gonzalez et al. 2011). En general, cualquier objeto que el dispositivo de RA pueda detectar con cualquier sensor, podría utilizarse para posicionar RA.

Es interesante el caso de algunos marcadores que son capaces de almacenar información, de forma que el detector no sólo puede identificarlos, sino que puede obtener la información que contienen. De esta forma, son los propios marcadores los que pueden contener la asociación con el objeto virtual. Es el caso, por ejemplo, de los códigos de Respuesta Rápida (códigos QR, de las siglas en inglés) (ISO/IEC 18004:2006), que pueden contener una URL, de forma que un dispositivo con un decodificador del código QR obtiene directamente la URL asociada (por ejemplo una página web) y puede mostrarla. En otras ocasiones, el marcador únicamente contiene características, o información suficiente para identificarlo, y la asociación con objetos virtuales se realiza mediante software.

2.3.2. Posicionamiento por reconocimiento visual

Un avance al reconocimiento de marcadores es el reconocimiento visual en general (sin marcadores), en donde ya no son marcadores específicos, sino imágenes cualesquiera, que pueden reconocerse, e incluso el propio entorno físico, como edificios, paisajes, personas, etc. En ese caso, tras reconocer la imagen o el entorno físico, puede posicionarse información virtual.

2.3.3. Posicionamiento por localización

El posicionamiento por localización es otro método habitual. Se asocia el objeto virtual a una localización, por ejemplo asignándole coordenadas geográficas. Entonces, el dispositivo necesita poder detectar la ubicación geográfica en la que se encuentra, para posicionar los objetos virtuales en su cercanía. Para conocer las coordenadas geográficas hay varios sistemas. En exteriores suele utilizarse el GPS, aunque hay alternativas, como el reconocimiento del entorno (reconociendo edificios, calles, etc). En interiores pueden utilizarse marcadores, ubicados en localizaciones conocidas, o también redes inalámbricas, de sensores, etc.

2.4. Alineación de objetos virtuales y reales

Uno de los mayores retos en la visualización de realidad aumentada es la alineación de los objetos virtuales y reales, principalmente cuando el usuario o el marcador se mueven (Mackay 1998; Azuma, Baillet et al. 2001; Martín-Gutiérrez, Saorín et al. 2010; van Krevelen and Poelman 2010). En este caso, es necesario variar la perspectiva del objeto virtual en tiempo real. Esta alineación de objetos virtuales y reales ha sido un problema de investigación durante muchos años (Azuma 1997; Azuma, Baillet et al. 2001; van Krevelen and Poelman 2010). Se utilizan múltiples tecnologías para conseguir la alineación, desde las mecánicas o por ultrasonidos, como las del precursor trabajo de Sutherland (1968), hasta rastreo de marcadores o de imagen. Las más comunes en los dispositivos móviles son las que hacen uso de los sensores internos como acelerómetros, giróscopos, GPS, etc. También puede utilizarse sensores de movimiento, de calor u otro tipo de sensores, para rastrear los movimientos del usuario o del entorno (van Krevelen and Poelman 2010).

2.5. Software de RA

A continuación se comenta distinto tipo de software utilizado para crear o percibir RA. Se tiene en cuenta software disponible en Internet, orientado a un uso común.

Software para desarrollar aplicaciones RA

Distintos proyectos de investigación o empresas han creado a lo largo de los años bibliotecas y paquetes de software orientados a desarrolladores, que permiten la creación de aplicaciones de RA.

Studierstube⁸, creado originalmente por la Universidad de Tecnología de Viena en un proyecto de investigación que empezó en 1996 (Schmalstieg, Fuhrmann et al. 2002), y continuado desde 2005 por varios proyectos de la Universidad de Tecnología de Graz⁹. Utiliza un dispositivo HMD, y un panel y un lapicero como interfaz para interactuar con los objetos virtuales (Figura 7). Está orientado a trabajo o aprendizaje colaborativo.

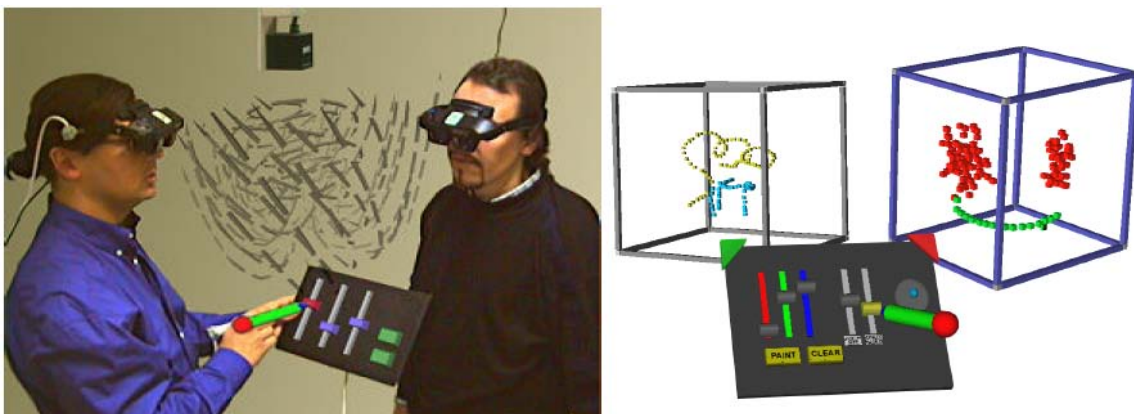


Figura 7. Studierstube (Schmalstieg, Fuhrmann et al. 2002)

⁸ <http://studierstube.icg.tugraz.at/main.php>. Última visita: Junio 2012

⁹ <http://www.icg.tugraz.at/project/studierstube>. Última visita: Junio 2012

ARToolkit¹⁰ es uno de las librerías más utilizadas para desarrollar aplicaciones de RA. Fue originalmente creado por Hirokazu Kato, en colaboración con Mark Billinghurst y el HITLab¹¹ (Kato and Billinghurst 1999). Es una biblioteca para desarrollar aplicaciones de RA que utilizan marcadores. Actualmente es multiplataforma. A partir de ARToolkit se han creado otras bibliotecas para otras tecnologías de desarrollo software, como NyARToolkit¹² (Java, C, C++, AS3, Android), Flartoolkit¹³ (flash), SLARToolkit¹⁴ (Silverlight) y OSGART¹⁵ (OpenSceneGraph). También han aparecido otras bibliotecas basadas en ARToolkit que mejoran la detección de marcadores o la alineación de objetos virtuales de ARToolkit, como ARTag¹⁶.

También se han desarrollado bibliotecas orientadas a desarrollar aplicaciones en dispositivos móviles, como DWARF y Morgan (Sziebig 2009), AndAR¹⁷, para dispositivos Android, o iPhone ARKit¹⁸, para iPhone.

La oportunidad de negocio de aplicaciones software de RA ha sido identificada por varias empresas, que han creado bibliotecas para desarrollar aplicaciones AR. Ejemplo es Qualcomm, con sus herramientas de desarrollo software (del inglés, SDK) Vuforia¹⁹, Total Immersion, con el SDK D'Fusion Studio²⁰, o String²¹ (comercial).

Además de las bibliotecas anteriores, hay otras específicas para escanear y detectar códigos QR u otros códigos bidimensionales, como Open Source QR Code Library²², Zxing²³ o bcTester²⁴ (reconoce códigos en imágenes o documentos PDF).

Navegadores y visores RA

Navegadores y visores de RA son herramientas software que permiten la visualización de RA. Aunque inicialmente las herramientas solían ser parte de los proyectos de investigación, con el tiempo han ido apareciendo aplicaciones orientadas al uso común de la RA con dispositivos de uso masivo (ordenadores, móviles, etc). Utilizamos las palabras "navegadores" y "visores" para introducir un matiz diferencial entre

¹⁰ <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>. Última visita: Junio 2012

¹¹ <http://www.hitlab.com>. Última visita: Junio 2012

¹² http://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/?page_id=198. Última visita: Junio 2012

¹³ <http://www.libspark.org/wiki/saqoosha/FLARToolKit>. Última visita: Junio 2012

¹⁴ <http://slartoolkit.codeplex.com>. Última visita: Junio 2012

¹⁵ <http://www.artoolworks.com/community/osgart/index.html>. Última visita: Junio 2012

¹⁶ <http://www.artag.net>. Última visita: Junio 2012

¹⁷ <http://code.google.com/p/andar/>. Última visita: Junio 2012

¹⁸ <http://www.iphonear.org>. Última visita: Junio 2012

¹⁹ <https://developer.qualcomm.com/mobile-development/mobile-technologies/augmented-reality>. Última visita: Junio 2012

²⁰ <http://www.t-immersion.com/products/dfusion-suite/dfusion-studio>. Última visita: Junio 2012

²¹ <http://www.poweredbystring.com>. Última visita: Junio 2012

²² <http://qrcode.sourceforge.jp/index.html.en>. Última visita: Junio 2012

²³ <http://code.google.com/p/zxing/>. Última visita: Junio 2012

²⁴ <http://www.bctester.de/en/index.htm>. Última visita: Junio 2012

dos de los tipos más generalizados de estas herramientas. Visores serían aquellas que permiten visualizar la RA en un entorno físico limitado (por ejemplo un ordenador) o para una aplicación concreta (por ejemplo, traducir texto) y navegadores serían aquellas más orientadas al uso de RA móvil, en los que podría haber objetos virtuales en múltiples lugares u objetos físicos, los cuales se denominan POIs ("Puntos de Interés", en inglés *Points of Interest*), y el sistema puede guiar al usuario para llegar a ellos, de forma similar a los navegadores GPS.

Navegadores de RA son Junaio²⁵, Layar²⁶, Mixare²⁷, Wikitude²⁸, Aurasma²⁹, Argon³⁰, Zappar³¹, Geociudad³², OpenAR³³, Libregeosocial ARviewer³⁴, AugmentThis!³⁵, Sekai Camera³⁶, Open Gamaray AR browser³⁷ e iBetelgeuse³⁸. Muchos de ellos funcionan de forma que los propios usuarios pueden crear "capas" o "canales" de RA, en la que situar POIs. Accediendo a dichas capas con el navegador, puede verse la RA de dicha capa. También muchos de ellos tienen una versión gratis y una comercial con más funcionalidades.

Visores de RA son EZFlar³⁹, blippar⁴⁰ (muy orientado a publicidad), AR-media⁴¹ (permite ver modelos 3D de Google Sketchup⁴² y ARSights⁴³ (basado en AR-media), que permite ver mediante un monitor y una cámara web modelos 3D de Google Earth sobre un marcador, con RA. También podrían considerarse visores de RA Google Goggles⁴⁴ y Word Lens⁴⁵, que permiten traducir texto en tiempo real con RA.

²⁵ <http://www.junaio.com>. Última visita: Junio 2012

²⁶ <http://www.layar.com>. Última visita: Junio 2012

²⁷ <http://www.mixare.org>. Última visita: Junio 2012

²⁸ <http://www.wikitude.com>. Última visita: Junio 2012

²⁹ <http://www.aurasma.com>. Última visita: Junio 2012

³⁰ <http://argon.gatech.edu>. Última visita: Junio 2012

³¹ <http://zappar.com>. Última visita: Junio 2012

³² <http://www.geociudad.com>. Última visita: Junio 2012

³³ <http://openar-project.org>. Última visita: Junio 2012

³⁴ <http://www.libregeosocial.org/node/24>. Última visita: Junio 2012

³⁵ <http://augmentthis.appspot.com>. Última visita: Junio 2012

³⁶ <http://sekaicamera.com>. Última visita: Junio 2012

³⁷ <http://opengamaray.sourceforge.net>. Última visita: Junio 2012

³⁸ <http://finalist.github.com/iBetelgeuse/>. Última visita: Junio 2012

³⁹ <http://www.ezflar.com>. Última visita: Junio 2012

⁴⁰ <http://www.blippar.com>. Última visita: Junio 2012

⁴¹ http://www.inglobetechnologies.com/en/new_products/arplugin_su/info.php. Última visita: Junio 2012

⁴² <http://sketchup.google.com>. Última visita: Junio 2012

⁴³ <http://www.arsights.com>. Última visita: Junio 2012

⁴⁴ <http://www.google.com/mobile/goggles/#text>. Última visita: Junio 2012

⁴⁵ <http://itunes.apple.com/es/app/word-lens/id383463868?mt=8>. Última visita: Junio 2012

Software de autoría

Con la proliferación de las aplicaciones de RA, han ido apareciendo herramientas que permiten la creación de RA a usuarios no desarrolladores. DART⁴⁶ es un conjunto de herramientas que permiten un rápido diseño e implementación de RA. ROAR⁴⁷ es una herramienta de autoría de la Universidad de Randford para crear juegos de RA con dispositivos móviles. En la misma línea, ARIS⁴⁸ es una herramienta web de autoría para crear complejos juegos de RA para dispositivos móviles de una forma sencilla (Figura 22). El HITLab de Nueva Zelanda tiene también una herramienta de autoría, Build AR⁴⁹ (versión gratis, y versión de pago), orientada a la RA con marcadores, ordenador y cámara web. La creación de objetos 3D asociados a marcadores puede realizarse también con Google Sketchup⁴² y AR-media⁴¹ (versiones gratis y de pago). Google Sketchup permite seleccionar modelos 3D de la biblioteca de modelos 3D de Google, modificarlos, o crear modelos nuevos. Con AR-media, dichos objetos pueden asociarse a un marcador, y verse en RA tanto en un ordenador (con una cámara web), como en un dispositivo móvil.

Otras aplicaciones para asociar objetos virtuales a marcadores y visualizarlos en un ordenador con cámara web son EZFlar⁵⁰ y , Atomic⁵¹.

Finalmente, otras herramientas que permiten la creación de RA son Geociudad³², que permite la creación de POIs en cualquier parte del mundo. Stiktu⁵², que permite crear de manera sencilla contenidos virtuales sobre imágenes reales (utilizando un software de reconocimiento visual). Hoppala⁵³ es un servicio que permite la creación de POIs y ver éstos mediante RA utilizando navegadores de RA como Junaio, Layar o Wikitude.

2.6. Usos de la RA

Desde el inicio en los años 60 hasta la fecha, la RA se ha utilizado en múltiples aplicaciones, con mayor o menor éxito. A continuación se describen algunos de los campos en donde ha encontrado utilidad, con algunos ejemplos.

Uso personal

En (van Krevelen and Poelman 2010) se comentaba que uno de los usos potenciales de la RA es como sistema de información personal, indicando como ejemplo el famoso *sixthsense* del MIT (Figura 8). Actualmente hay muchos ejemplos, como los navegadores de RA estilo Junaio o Layar, que permiten un uso personal de la RA para muy distintas aplicaciones, o el proyecto *Google Glasses*, que consiste en unas gafas de RA que usan múltiples servicios de Internet para aumentar la realidad. Otras aplicaciones

⁴⁶ <http://ael.gatech.edu/dart/>. Última visita: Junio 2012

⁴⁷ <http://gameslab.radford.edu/ROAR/>. Última visita: Junio 2012

⁴⁸ <http://arisgames.org>. Última visita: Junio 2012

⁴⁹ <http://www.buildar.co.nz>. Última visita: Junio 2012

⁵⁰ <http://www.ezflar.com>. Última visita: Junio 2012

⁵¹ <http://www.sologicolibre.org/projects/atomic/es/>. Última visita: Junio 2012

⁵² <http://stiktu.com>. Última visita: Junio 2012

⁵³ <http://www.hoppala-agency.com>. Última visita: Junio 2012

que utilizan RA para uso personal son Google Goggles⁵⁴, con un sistema de reconocimiento de imágenes, Word Lens⁵⁵ (comercial), que traduce automáticamente texto, o Google Sky Map⁵⁶, que devuelve información de las estrellas y constelaciones al enfocar el cielo con la cámara.



Figura 8. Sixthsense⁴, del MIT

Marketing

Posiblemente uno de los usos más generalizados de la RA es la publicidad. Actualmente, pueden verse códigos QR en múltiples revistas, periódicos, carteles publicitarios, etc, con enlaces a páginas web u otro contenido. Rayban⁵⁷ y Atol⁵⁸ tienen sendas aplicaciones que permiten verse puestas unas gafas virtuales, utilizando RA. Blippar, el mencionado visor de RA, tiene una orientación publicitaria, y en su página web se pueden encontrar múltiples ejemplos de marketing. En la Figura 9 pueden verse dos ejemplos de uso de RA en marketing. A la izquierda de la figura la aplicación de Atol para “probarse” gafas virtuales, y a la derecha, un anuncio publicitario en un periódico en el que aparece un código QR.



Figura 9. RA en marketing. Gafas virtuales de Atol (izda) y código QR en anuncio de periódico (dcha)

⁵⁴ <http://www.google.com/mobile/goggles>. Última visita: Junio 2012

⁵⁵ <http://itunes.apple.com/es/app/word-lens/id383463868?mt=8>. Última visita: Junio 2012

⁵⁶ <http://www.google.com/mobile/skymap/>. Última visita: Junio 2012

⁵⁷ <http://www.ray-ban.com/spain/science/virtual-mirror/>. Última visita: Junio 2012

⁵⁸ <http://www.opticiens-atol.com/pages/collections/adriana/?moduleTI=view>. Última visita: Junio 2012

Navegación

También se han realizado trabajos en los que se desarrollan sistemas de navegación utilizando RA, tanto en interiores como en exteriores (van Krevelen and Poelman 2010). Hay ejemplos de uso de navegación de peatones y automóviles. Los navegadores de RA actuales (junaio, layar, wiktude, etc) son sistemas de navegación más o menos avanzados en los que se pueden desarrollar “capas” de RA, y en cada capa situar puntos de interés (cuyas siglas en inglés son POI), que permiten al usuario orientarse o encontrar los POIs a su alrededor. También hay ejemplos de sistemas de navegación para coche, como el sistema Cyber Navy de Pioneer⁵⁹ (Figura 10).



Figura 10. Sistema Cyber Navy de Pioneer⁵⁹

Militar

Los HMDs han sido durante muchos años de uso habitual en los pilotos de aviones o helicópteros, para proporcionarles información superpuesta a la realidad (Azuma 1997). También se ha utilizado para realizar simulaciones de operaciones militares (Hughes, Stapleton et al. 2005; van Krevelen and Poelman 2010).

Turismo

Muchos trabajos realizan guías turísticas en donde se explican los principales puntos de interés de ciudades, o en eventos culturales, como guías turísticas de Alcañices⁶⁰, Valladolid⁶¹ (Figura 11), del Festival Internacional de Teatro y Artes de Calle de Valladolid⁶², o MobiAR⁶³, un sistema de servicios de

⁵⁹ <http://pioneer.jp/press-e/2012/pdf/0511-1.pdf>. Última visita: Junio 2012

⁶⁰ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.alcanicesturistico>. Última visita: Junio 2012

⁶¹ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.valladolidturistico>. Última visita: Junio 2012

⁶² <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.espaciotic.tacvall>. Última visita: Junio 2012

⁶³ <http://www.labhuman.com:7777/labhuman/web/minisites/mobiar/>. Última visita: Junio 2012

información turística. También en los navegadores de RA como Layar o Junaio hay múltiples capas (o canales) turísticos de RA, como "visitaragon"⁶⁴).



Figura 11. Guía turística de Valladolid⁶¹

Entretenimiento

Es otro de los usos principales de la RA. Hay múltiples aplicaciones orientadas al ocio, como juegos con realidad aumentada. Un ejemplo clásico es ARQuake⁶⁵, que es una versión de RA del famoso Quake⁶⁶. Pero hay otros muchos juegos que utilizan RA, como por ejemplo ARhrrrr!⁶⁷ (Figura 12), un juego en el que hay que eliminar zombis, o ARTennis (Billinghurst, Grasset et al. 2009), un juego de tenis entre dos jugadores, utilizando teléfonos móviles.



Figura 12. Juego ARhrrrr!⁶⁷

⁶⁴ <http://www.visitaragon.es>. Última visita: Junio 2012

⁶⁵ <http://wearables.unisa.edu.au/projects/arquake/>. Última visita: Junio 2012

⁶⁶ <http://www.idsoftware.com/games/quake/quake>. Última visita: Junio 2012

⁶⁷ <http://ael.gatech.edu/lab/research/handheld-ar/arhrrrr/>. Última visita: Junio 2012

Medicina

La RA también puede ser útil en aplicaciones médicas, como puede ser para guiar o dar soporte al médico, para simulaciones, o como "rayos X" virtuales, superponiendo en el paciente imágenes o modelos 3D que son escaneados, radiografías, etc. Algunas aplicaciones para las que se ha usado es para permitir al médico ver con RA el feto de una mujer embarazada (Figura 13), para guiar al médico en una biopsia, o para ver los huesos de una pierna (Azuma 1997; van Krevelen and Poelman 2010).



Figura 13. "Rayos X" con RA para ver el feto de embarazada

Industria

Algunos ejemplos industriales se pueden encontrar en el diseño de productos, manufactura y reparaciones (Azuma 1997; van Krevelen and Poelman 2010). Por ejemplo, para poder ver modelos RA de automóviles en su diseño, o el rango de alcance de sensores de robots de limpieza. También se ha utilizado en la manufactura aeronáutica, o en la reparación de maquinaria, en donde se utilizaba a modo de "rayos X" que permitía ver el interior de la misma.

Educación

Por supuesto, hay aplicaciones de la RA en la educación, que se describen más en detalle en los siguientes apartados.

3. Realidad Aumentada en la educación

También en la educación hay muchos ejemplos de uso de la RA, aunque en este caso, empiezan a encontrarse sobre todo a partir de finales de la década de los 90. Esto posiblemente es así debido a que hasta esa fecha, los trabajos de investigación utilizaban equipamientos aparatosos, complejos, y costosos. Su uso generalizado en contextos educativos era difícil. Desde finales de los 90 y sobre todo después del año 2000, empiezan a aparecer trabajos que investigan la RA en la educación, y ya con la aparición de PDAs, y posteriormente de *smartphones* y tabletas, empieza a verse el uso de RA en entornos reales educativos, no solo en trabajos de investigación. El uso de la RA en la educación aparece

como uno de los retos claves actuales en la investigación sobre aprendizaje mejorado por tecnología en el informe Horizon⁶⁸ de 2011 (Johnson, Smith et al. 2011), así como en el informe de Mayo de 2012 de STELLAR⁶⁹ (red de excelencia europea en aprendizaje mejorado por tecnología) (Sutherland, Eagle et al. 2012).

Una posible clasificación de trabajos de investigación de realidad aumentada en la educación, y ejemplos representativos, puede ser la siguiente:

Uso de realidad aumentada mediante pantalla de ordenador y cámara web

En estos casos se combinan objetos virtuales y reales por medio de un ordenador y una cámara web. Generalmente se usan marcadores, y los estudiantes pueden verse a sí mismos en la pantalla, en el entorno físico en el que se encuentran, percibiendo objetos virtuales sobre los marcadores. Hay múltiples trabajos de este tipo, como (Zagoranski and Divjak 2003) o (Kerawalla, Luckin et al. 2006). El Instituto Interuniversitario de Investigación en Bioingeniería y Tecnología Orientada en el Ser Humano⁷⁰ (I3BH) de la Universidad Politécnica de Valencia ha realizado varios trabajos con este sistema, desarrollando su propio software (Alcañiz, Contero et al. 2010; Pérez-López, Contero et al. 2010; Salvador-Herranz, Pérez-López et al. 2011). En la Figura 14 puede verse dos ejemplos de trabajos del I3BH.

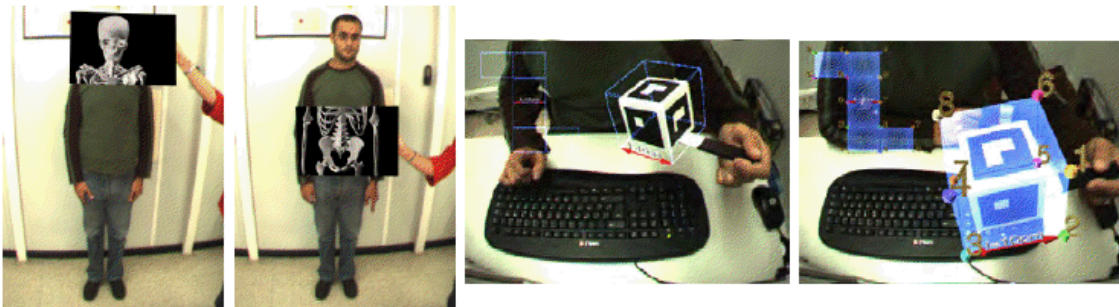


Figura 14. Ejemplos de aplicaciones RA de I3BH (Alcañiz, Contero et al. 2010)

Uso de Realidad Aumentada mediante proyección

Otro sistema habitual es utilizar un proyector para aumentar la realidad, y una cámara de vídeo, o sensores de movimiento para posicionar y alinear los objetos virtuales. En (Chen, Su et al. 2007) usan un proyector, decorado como un espejo mágico. Mediante RA en marcadores, enseñan a niños el alfabeto chino, la pronunciación, etc. Al final sólo concluyen que el uso de la RA puede ser otro método más de aprendizaje, pero que necesitan evaluar su impacto educativo. Pierre Dillenbourg crea un sistema de RA con proyección ("Tinkerlamp", ver Figura 15) para clases de logística (Dillenbourg and Jermann 2010) en donde sobre una mesa con un plano de un almacén, los estudiantes colocan los estantes y mediante una

⁶⁸ <http://www.nmc.org/horizon-project>. Última visita: Junio 2012

⁶⁹ <http://www.teleurope.eu>. Última visita: Junio 2012

⁷⁰ <http://www.i3bh.es>. Última visita: Junio 2012

proyección se generan simulaciones de carretillas almacenando. El énfasis de su trabajo es cómo la tecnología puede orquestrar el proceso de aprendizaje. Posteriormente comparan la realización de experiencias similares en papel o con superficies tangibles (Jermann, Zufferey et al. 2008; Schneider, Jermann et al. 2011). En (Enyedy, Danish et al. 2011), los estudiantes hacen predicciones de cómo se moverá una bola, y con una cámara y software de reconocimiento de objetos y de simulación, se proyecta en una pizarra interactiva un vídeo con RA que muestra cómo se movería la bola. Otro ejemplo es GENTORO (Sugimoto 2011), donde los niños crean historias que posteriormente ponen en marcha utilizando un robot y un proyector. El robot recorre los caminos que se proyectan. (Yoon, Elinich et al. 2011) es una experiencia en un museo de ciencia con estudiantes. Tratan de evaluar si funciona la construcción de conocimiento mediante el guiado o la ayuda con realidad aumentada. Realizan una experiencia en la que tiene que resolver problemas de electricidad formando circuitos con unas bolas de metal que los alumnos tocan y ellos mismos. Cuando creen haber encontrado una solución, lo anuncian, y se proyecta el camino que seguirían los electrones.

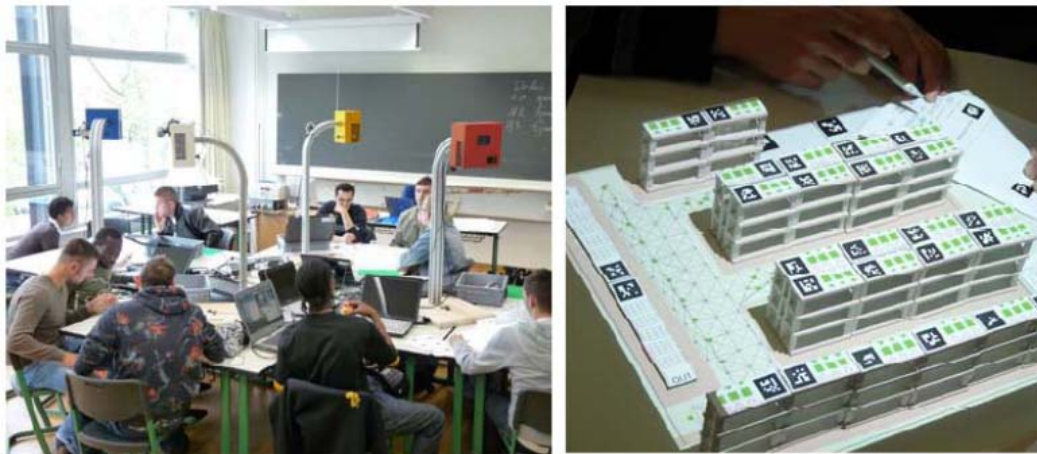


Figura 15. Sistema de proyección "Tinkerlamp" (Dillenbourg and Jermann 2010)

Uso de HMD para visualización de objetos virtuales en interiores

Suelen ser propuestas que pretenden aprovechar las potencialidades espaciales que tiene la RA. Un ejemplo son los trabajos de Hannes Kaufmann (Kaufmann and Schmalstieg 2002), que diseñó un sistema, Construct3D (Figura 16), basado en Studierstube, para la enseñanza de geometría y matemáticas, en donde los estudiantes se colocaban unas gafas de RA, y podían trabajar con objetos 3D virtuales. Otros trabajos exploran el aprendizaje de estructuras moleculares o química, haciendo uso de gafas de RA (Shelton 2002).

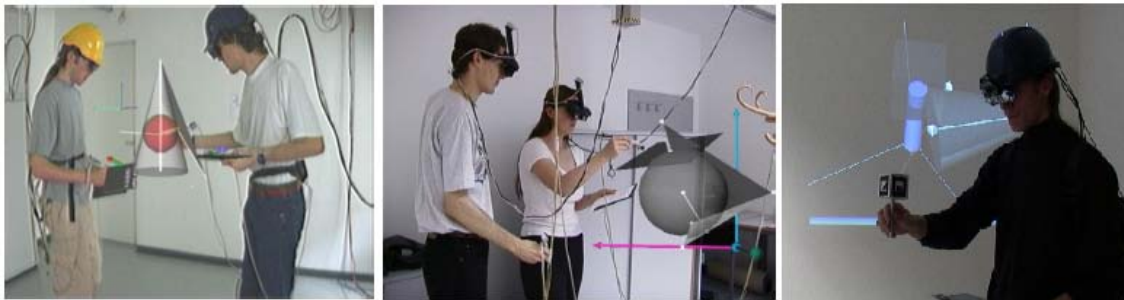


Figura 16. Construct3D (Kaufmann and Schmalstieg 2002)

Un trabajo interesante es el proyecto CONNECT que se desarrolló en Suecia alrededor de 2006 (Sotiriou, Anastopoulou et al. 2006). Consiste en un sistema para crear una red de museos de ciencias donde se pudiera mezclar la educación formal e informal. El objetivo era que en un entorno de educación informal como son los museos de ciencias, se desplacen clases y utilicen las tecnologías (RA, Web, etc), para crear un aprendizaje formal aprovechando las ventajas de ese entorno. Era un sistema con casco de RA y mochila con ordenador. Incluía incluso un sistema de autoría para crear los contenidos RA.

Libros "mágicos" o aumentados

Son libros que si se ven con un dispositivo de RA, incluyen objetos virtuales, normalmente en 3D. El precursor fue Mark Billinghurst e Hirokazu Kato en el HITLab de Nueva Zelanda⁷¹, con su "libro mágico" (en inglés, *The Magic Book*) en 2001 (Billinghurst, Kato et al. 2001). Un interfaz consistente en unas gafas de RA permitía ver objetos virtuales en un libro, e incluso interaccionar con ellos (Figura 17). En (Martín-Gutiérrez, Saorín et al. 2010) crean un libro con RA para verlo mediante monitor y cámara web, en el que aparecen formas geométricas para el aprendizaje de dibujo.



Figura 17. The Magic Book (Billinghurst, Kato et al. 2001)

⁷¹ <http://www.hitlabnz.org>. Última visita: Junio 2012

Dispositivos móviles

Las propuestas que utilizan dispositivos móviles son las que más han proliferado los últimos años, sobre todo debido a la aparición de tabletas y *smartphones*, con grandes recursos de computación y gráficos. Debido a ello, se tratan más en detalle en el siguiente apartado, enmarcándolo en el concepto del aprendizaje móvil.

Otras aproximaciones

También existen otras aproximaciones, menos habituales, como (Pemberton and Winter 2009), que utilizan *Spinnstube* (Figura 18), que es un sistema que coloca una pantalla grande plana entre el usuario y una mesa, de forma que ve la mesa a través de la pantalla, además de objetos virtuales. De esta forma, puede manipular objetos al no tener que sujetar el dispositivo. Es una aproximación intermedia entre llevar un casco, o unas gafas de RA, y usar una tableta. Pudieron concluir que su uso aumentaba la motivación de los alumnos.

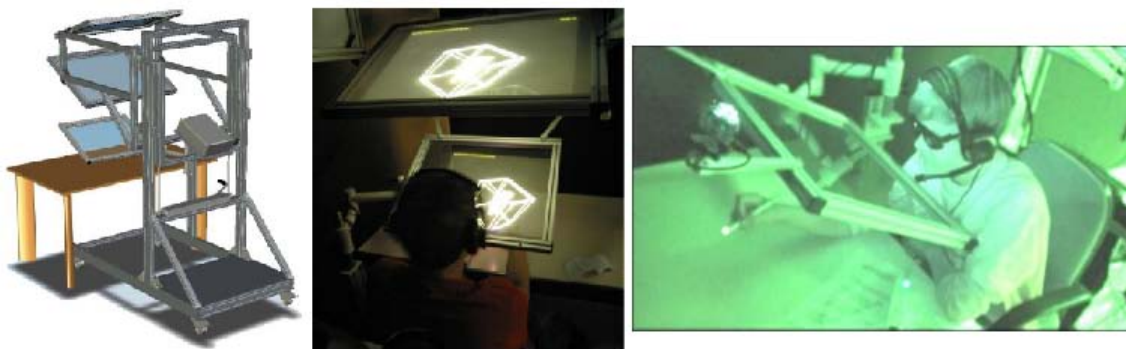


Figura 18. Spinnstube (Pemberton and Winter 2009)

4. Realidad Aumentada en el aprendizaje móvil (m-learning)

La evolución de la tecnología, principalmente Internet y los dispositivos móviles, está rompiendo los límites temporales y espaciales que tradicionalmente enclaustraban el aprendizaje a los espacios y tiempos del aprendizaje formal en el aula (Sharples, Sanchez et al. 2009). De esta forma, con el acceso ubicuo a información, expertos, y comunicación, se facilita el aprendizaje en cualquier momento y cualquier lugar a lo largo de la vida (Sharples, Corlett et al. 2002). Existen distintas definiciones y acepciones de lo que sería el aprendizaje-móvil (en inglés mobile learning, o m-learning) (Lauris and Eteokleous 2005; Cobcroft, Towers et al. 2006; Fotouhi-Ghazvini, Earnshaw et al. 2011; Kearney, Schuck et al. 2012). Algunas están centradas en la tecnología, otras en el aprendizaje electrónico, otras en el estudiante y su movilidad, y otras en las posibilidades de interacciones y comunicación que posibilita la movilidad y la tecnología. Pero independientemente del énfasis en la definición, todas tienen en común

contemplar el cambio producido en la sociedad con el avance de las tecnologías y la ubicuidad del acceso a información y comunicación, así como en la importancia del aprendizaje más allá de los límites temporales y espaciales tradicionales del aula.

También la RA ha sido utilizada en el m-learning, debido a su capacidad de superponer contenidos virtuales en un entorno real. De esta forma, pueden utilizarse distintas tecnologías pedagógicas en experiencias educativas que se desarrollan fuera del aula, como puede ser el aprendizaje situado (en inglés *situated learning*), el aprendizaje basado en lugar (*place-based learning*), el aprendizaje basado en juegos (*game-based learning*). También el aprendizaje colaborativo, debido a la capacidad de la RA de ofrecer distintos contenidos a distintas personas o grupos, y el constructivismo, con la utilización de "andamiaje" (del inglés *scaffolding*), aportando herramientas para ayudar al estudiante a construir el conocimiento.

Papagiannakis, Singh et al. (2008) introducen el concepto de RA móvil, que puede ser vista como el punto de encuentro entre la RA, la computación ubicua y los dispositivos que se pueden llevar puestos (en inglés *wearables*). La definición de RA móvil sería similar a la de Azuma de RA, a la que se añadiría el componente móvil ("en tiempo real y de manera móvil"). Suele mencionarse como primer trabajo de investigación de RA móvil el de Feiner, MacIntyre et al. (1997), "*A touring machine*", que consistía en un sistema de RA móvil para uso en exteriores, que permitía obtener información mediante RA del campus universitario de la universidad de Columbia. Por ello, además de ser el primer trabajo de RA móvil, también es el primero de RA móvil en educación.



Figura 19. The touring machine (Feiner, MacIntyre et al. 1997)

Como puede verse en la Figura 19, consistía en un HMD y una mochila en la que se encontraba un computador. El sistema también hacía uso de un ordenador de mano con pantalla táctil. Para el posicionamiento y la alineación de objetos virtuales, el sistema utiliza varios sensores, como GPS, inclinómetro y magnetómetro, así como una red inalámbrica para comunicarse con el resto de infraestructura. Posteriormente habría trabajos en la misma línea, profundizando en el carácter pedagógico. Un ejemplo es el proyecto CONNECT (Sotiriou, Anastopoulou et al. 2006), ya mencionado anteriormente dentro de los trabajos que utilizaban HMD en interiores, aunque con la diferencia de que no era un sistema de exteriores que utilizaba GPS para posicionar objetos, sino de interiores utilizando

marcadores para posicionarlos (Figura 20). También la Universidad de Tecnología de Graz continuó con investigaciones similares el proyecto Studierstube desde 2005⁷².



Figura 20. Proyecto CONNECT (Sotiriou, Anastopoulou et al. 2006)

Dado que la tecnología avanza, el tamaño de los ordenadores se va reduciendo y van creciendo sus recursos. Ya entrada la década del 2000 empiezan a aparecer trabajos de RA en educación que hacen uso de PDAs. En (Facer, Joiner et al. 2004) ponen en marcha "Savannah", un juego móvil educativo que utiliza RA con PDAs como las de la Figura 21 (izda), en el que los alumnos toman el papel de una manada de leones y tienen que sobrevivir en la "sabana" (el patio del colegio). Lo que pretenden es ver que pueden utilizar tecnologías móviles en interacción física directa con el espacio y con otros jugadores, y combinarse con los principios de la atracción y la auto-motivación de los juegos para crear potentes y atractivas experiencias educativas.

En una línea parecida aparecen poco después los trabajos del grupo de investigación STEP⁷³ del MIT. Crean un sistema de realidad aumentada mediante el que se pueden realizar juegos educativos que hacen uso de la RA con PDAs y posicionamiento GPS (MITAR). Ejemplos de implementaciones de estos juegos son "Mad City Mystery" (Squire and Jan 2007) y "Environmental Detectives" (Klopfer and Squire 2008). En ellos ponen en marcha juegos colaborativos en donde los estudiantes tienen distintos roles y han de resolver un misterio. En "Mad City Mystery" tienen que resolver un caso de una muerte en un pueblo, donde tienen que analizar distintas causas (medio ambiente, enfermedades, etc), y en "Environmental Detectives" tienen que investigar el origen de unas toxinas que aparecen en el agua. En estas experiencias utilizan metodologías pedagógicas de *place-based learning* y *game-based learning*. Klopfer estudia con más profundidad el aprendizaje basado en juegos con RA móvil en su libro *Augmented Learning* (en inglés "Aprendizaje Aumentado") (Klopfer 2008). En esa fecha, Chris Dede y Matt Dunleavy (Dunleavy, Dede et al. 2008) realizan trabajos en Harvard con ayuda tecnológica del MIT, para estudiar las potencialidades y limitaciones de la RA en la educación. En concreto, estudian la influencia en el aprendizaje de un juego de RA que desarrollan conjuntamente con el MIT: "Alien Contact!". En él los estudiantes tienen que descubrir por qué unos extraterrestres han llegado a la tierra. El resultado es que parece que la RA aporta valor añadido, y los estudiantes que habían presentado retos

⁷² <http://www.icg.tugraz.at/research?year=&author=&key=Virtual%20reality%20and%20augmented%20reality&pp=all>. Última visita: Junio 2012

⁷³ <http://education.mit.edu>. Última visita: Junio 2012

académicos y de comportamiento muestran compromiso con la actividad. Sin embargo, a la vez la RA móvil presenta retos tecnológicos, de gestión y cognitivos a la enseñanza y aprendizaje. En la Figura 21 (centro) puede verse la PDA y GPS utilizados en el juego.

Aunque algunos de estos trabajos ofrecían herramientas que permitían reutilizar el juego en distintas localizaciones, había una clara limitación en cuanto a la autoría de estos juegos con RA en exteriores. Dunleavy, doctorando en Harvard de Chris Dede, dirigiría posteriormente un grupo de investigación en la universidad de Randford, en donde desarrollaron una herramienta de autoría de juegos con RA móvil: ROAR⁷⁴. Dos juegos realizados con ROAR son "Outbreak", donde los estudiantes tienen que ir recogiendo especímenes de animales y plantas para crear un antídoto de una enfermedad, y "Buffalo Hunt" (parte derecha de la Figura 21), donde los estudiantes tienen que investigar un misterio mientras aprenden de forma colaborativa sobre la cultura americana nativa.

Recientemente, Chris Dede lidera el proyecto EcoMOBILE⁷⁵, en el que se utiliza un software de autoría de RA, Fresh AiR⁷⁶, creado por una spin-off del grupo de investigación de Matt Dunleavy en Randford y dirigida por éste. El proyecto estudia experiencias educativas en la naturaleza, en donde los estudiantes recogen muestras e información (fotografías, video, muestras de agua, medidas de composición de agua, humedad, etc) que les sirve para resolver un misterio. Se utilizan dispositivos móviles y RA como guía en las experiencias.



Figura 21. PDAs utilizadas en Savannah (izda) (Facer, Joiner et al. 2004); Alien Contact! en acción (centro) (Dunleavy, Dede et al. 2008); Estudiantes jugando a "Buffalo Hunt"⁷⁴ (dcha)

En 2010 aparece ARIS⁴⁸, otra herramienta de autoría, ya comentada en el apartado de navegadores RA, que permite crear juegos de RA de una forma sencilla (Gagnon 2010). Es desarrollada por Gagnon en su Trabajo de Fin de Máster en la Universidad de Wisconsin-Madison, bajo la dirección de Squire. Squire tiene una carrera investigadora en aprendizaje mediante juegos, y trabajó junto con Klopfer en los trabajos de investigación de RA del MIT STEP. ARIS dispone de una interfaz web que permite la creación de complejos juegos de RA que posicionan objetos virtuales con geolocalización y códigos QR. Sus opciones son muy avanzadas, pudiendo crear caracteres virtuales, ofrecer opciones al usuario, y configurar condiciones. Un ejemplo de implementación de experiencia educativa con ARIS es "Mentira" (Holden and Sykes 2011) (Figura 22), orientado al aprendizaje del lenguaje español, en donde los estudiantes tienen que resolver un crimen producido en una comunidad hispanohablante. Todos estos

⁷⁴ <http://gameslab.radford.edu/ROAR/>. Última visita: Junio 2012

⁷⁵ <http://ecomobile.gse.harvard.edu>. Última visita: Junio 2012

⁷⁶ <http://playfreshair.com>. Última visita: Junio 2012

trabajos de MIT, Randford y Wisconsin-Madison investigan el uso de juegos RA móvil en la educación, principalmente con aproximaciones pedagógicas de aprendizaje basado en juegos y basado en lugar (Klopfer, Sheldon et al. 2011).

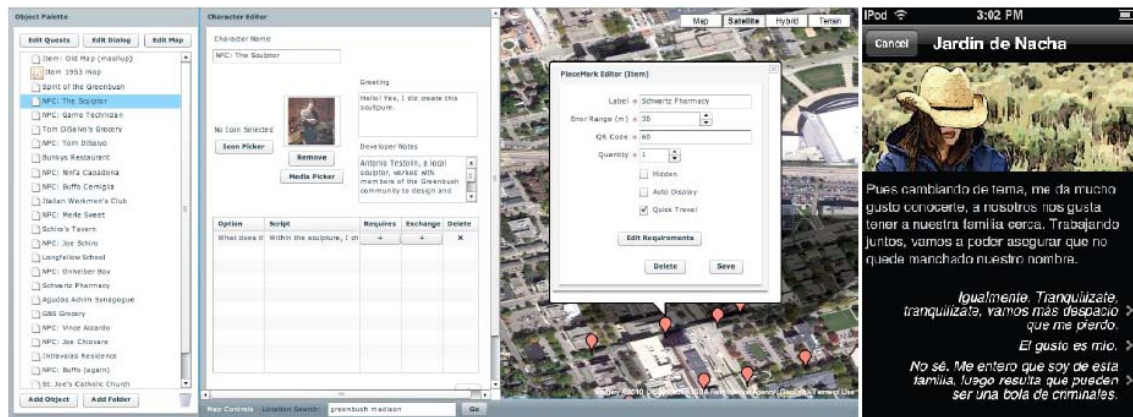


Figura 22. ARIS⁴⁸. Herramienta de autoría (izda) y captura de interfaz de usuario jugando a "Mentira" (dcha)

Otra experiencia educativa con PDAs es la de (Huang, Lin et al. 2010). En ella desarrollan un sistema para el aprendizaje de botánica, mediante el cual los estudiantes van al campo con PDAs, y tiran fotos a determinadas plantas. Mediante reconocimiento de imágenes, el sistema les ofrece alguna característica de la planta, y ellos tienen que completar el formulario de búsqueda del tipo de planta, y seleccionar la que creen que es. También con un GPS pueden ver los tipos de plantas que hay en los alrededores. En este trabajo es interesante que también se tiene en cuenta la posibilidad de que no haya red que conecte las PDAs con el servidor, de manera que almacena información en una base de datos local en las PDAs.

(Pérez-Sanagustín, Ramirez-Gonzalez et al. 2011), en la Universidad Pompeu Fabra (UPF), pone en práctica lo que podría ser la evolución de "A touring machine". Una situación de aprendizaje que se desarrolla tanto en clase como alrededor del campus, y que tiene el objetivo de que alumnos de primer año de carrera obtengan un mayor conocimiento del campus universitario e interaccionen entre ellos. De esta forma, ubican NFCs en las distintas instalaciones del campus, y mediante dispositivos móviles con lector de NFCs y contenidos asociados a los NFCs, los estudiantes obtienen en los móviles información sobre el campus. El mismo grupo de investigación también ha desarrollado una aplicación, "Quest in situ" que permite realizar cuestionarios geoposicionados, que los estudiantes deben responder en determinadas ubicaciones utilizando dispositivos móviles con GPS (Santos, Pérez-Sanagustín et al. 2011). La Figura 23 muestra imágenes de estos trabajos.



Figura 23. Trabajos de la UPF. Exploración de campus con NFCs (arriba) y "Quest in situ" (abajo)

En la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) presentan un trabajo que trata de explorar la sincronización de objetos físicos y virtuales en varios espacios (Ibáñez, Kloos et al. 2011). Así, en una experiencia orientada al aprendizaje de una lengua extranjera, los alumnos están en una clase conectados a un mundo virtual 3D (open Wonderland⁷⁷) con una representación virtual de la Gran Vía de Madrid, y el profesor se encuentra físicamente en la Gran Vía, con un *Smartphone*. El profesor ve mediante realidad aumentada los avatares de los alumnos en la Gran Vía, y los alumnos ven en el mundo virtual 3D el avatar del profesor. Los movimientos de profesor en el mundo físico y alumnos en el mundo virtual 3D se ven reflejados en los avatares en el otro espacio (Figura 24).



Figura 24. Experiencia de la UC3M de realidad Mixta

⁷⁷ <http://openwonderland.org/>. Última visita: Junio 2012

El mismo grupo de investigación también ha realizado experiencias educativas utilizando un navegador de RA, Popcode⁷⁸, una versión obsoleta de Zappar (Ibáñez, Serio et al. 2011).

En la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid (URJM) (Robles, Gonzales-Barahona et al. 2011) han desarrollado un software de autoría de yincanas, que permite realizar yincanas mediante la también suya aplicación para android Libregeosocial RA browser (Figura 25).



Figura 25. Yincana de URJM. Captura de dispositivo móvil en el transcurso de yincana (izda); mapa con la posición actual de participante y destino (dcha)

Specht, Ternier et al. (2011), de la Netherlands Open University, presentan "Locatory", que es un navegador de RA basado en capas, al estilo de Junaio, Layar, etc, y en el que se puede variar el contenido RA ofrecido en función del estado del juego. También incluyen una herramienta de autoría, para la creación de las capas de RA.



Figura 26. CityViewAR, del HITLab Nueva Zelanda

⁷⁸ <http://popcode.info/>. Última visita: Junio 2012

También en el HITLab de Nueva Zelanda trabajan en RA móvil aplicada a la educación (Billinghurst and Duenser 2012). Como muestra, han creado una aplicación, CityViewAR⁷⁹, que permite ver por RA una ciudad tal y como era antes de que varios terremotos destruyesen muchos de sus edificios (Figura 26).

Por último, el grupo de investigación GSIC-EMIC⁸⁰, de la Universidad de Valladolid (UVa) ha desarrollado un prototipo de una arquitectura que permite desplegar en VLEs (como Moodle⁸¹ o Mediawiki⁸²) y espacios físicos (por medio de navegadores de RA como Junaio) diseños educativos realizados en distintas herramientas de diseño. La arquitectura permite la integración de herramientas de la Web 2.0 (como Google Docs⁸³ o Dabbleboard⁸⁴) y modelos 3D. De tal forma, que, por ejemplo, un documento Google Docs podría utilizarlo un grupo de estudiantes en una actividad en clase, apareciendo embebido en el VLE, y el mismo documento podría reutilizarlo otro grupo en una actividad posterior en exteriores, geoposicionándolo o asociándolo a un marcador, y accediendo a él mediante RA con Junaio (Muñoz-Cristóbal, Asensio-Pérez et al. 2012). La Figura 27 muestra esta propuesta.

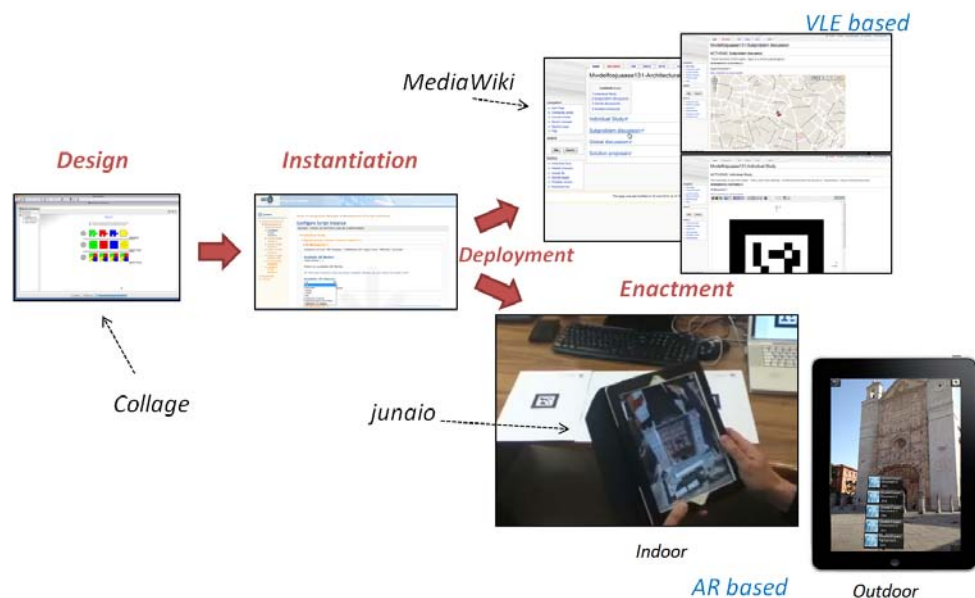


Figura 27. Sistema de UVa

⁷⁹ <http://www.hitlabnz.org/index.php/products/cityviewer>. Última visita: Junio 2012

⁸⁰ <http://www.gsic.uva.es>. Última visita: Junio 2012

⁸¹ <http://moodle.org>. Última visita: Junio 2012

⁸² <http://www.mediawiki.org>. Última visita: Junio 2012

⁸³ <http://docs.google.com>. Última visita: Junio 2012

⁸⁴ <http://www.dabbleboard.com>. Última visita: Junio 2012

5. Conclusiones

Aunque puede parecer una tecnología novedosa, desde los inicios de la realidad aumentada hasta nuestras fechas han pasado más de 45 años. Sin embargo, como puede verse en el presente documento, el avance de la tecnología ha sido gradual, y no es hasta fechas recientes cuando el uso de la realidad aumentada en la educación está pasando de ser algo de muy difícil implementación en aulas reales, a poderse poner en marcha de manera relativamente sencilla para el aprendizaje tanto en el aula como fuera de él. Son los nuevos dispositivos móviles y el avance de Internet lo que ha propiciado este cambio. Estamos, por tanto, ante una nueva tecnología habilitante. Debido a ello, nuevas situaciones de aprendizaje son posibles, que mezclan objetos virtuales con entornos reales, permitiendo aplicar diversas técnicas pedagógicas y aumentando la motivación de los estudiantes.

6. Apéndice. Blogs y páginas web de interés

Hay muchas páginas web interesantes relacionadas con la RA en educación. Karen E. Hamilton tiene una Wiki con un excelente estudio de la RA en la educación (Hamilton 2011). "Aumentame"⁸⁵ es una página web sobre RA y educación. El blog dedicado a e-learning "E-TechUK" tiene una entrada interesante, con una recopilación de herramientas y artículos sobre RA en educación⁸⁶. También merece la pena destacar varios magazines creados mediante Scoop.it⁸⁷ (web que permite crear magazines a cualquier usuario), como "Realidad Aumentada en Educación"⁸⁸, "Geolocalización y Realidad Aumentada en educación"⁸⁹ y "Realidad Aumentada y Enseñanza 3.0"⁹⁰.

⁸⁵ <http://www.aumenta.me>. Última visita: Junio 2012

⁸⁶ <http://muppetmasteruk.blogspot.com.es/2011/10/augmented-reality-in-education.html>. Última visita: Junio 2012

⁸⁷ <http://www.scoop.it>. Última visita: Junio 2012

⁸⁸ <http://www.scoop.it/realidad-aumentada-en-educacion>. Última visita: Junio 2012

⁸⁹ <http://www.scoop.it/geolocalizacion-en-educacion>. Última visita: Junio 2012

⁹⁰ <http://www.scoop.it/realidad-aumentada-aplicada-a-la-ensenanza-de-lenguas-ele>. Última visita: Junio 2012

7. Referencias

- Alcañiz, M., M. Contero, et al. (2010). Augmented Reality Technology for Education. New Achievements in Technology Education and Development. S. Soomro, InTech: 247-256.
- Azuma, R., Y. Baillet, et al. (2001). "Recent advances in augmented reality." Computer Graphics and Applications, IEEE 21(6): 34 -47.
- Azuma, R. T. (1997). "A Survey of Augmented Reality." Presence 6: 355-385.
- Billinghurst, M. and A. Duenser (2012). "Augmented Reality in the Classroom." Computer 45(7): 56-63.
- Billinghurst, M., R. Grasset, et al. (2009). Tangible Interfaces for Ambient Augmented Reality Applications. Human-Centric Interfaces for Ambient Intelligence. H. Aghajan, J. C. Augusto and R. L.-C. Delgado, Academic Press: 281-298.
- Billinghurst, M., H. Kato, et al. (2001). "The MagicBook: a transitional AR interface." Computers & Graphics 25: 745-753.
- Billinghurst, M., H. Kato, et al. (2008). Tangible augmented reality. ACM SIGGRAPH ASIA 2008 courses, New York, NY, USA, ACM.
- Caudell, T. P. and D. W. Mizell (1992). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on System Sciences, 1992. Hawaii.
- Cobcroft, R. S., S. J. Towers, et al. (2006). Mobile learning in review: Opportunities and challenges for learners, teachers, and institutions. Online Learning and Teaching (OLT) Conference 2006. Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- Chen, C.-H., C. C. Su, et al. (2007). Augmented Interface for Children Chinese Learning. Seventh IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, 2007. ICALT 2007. , Niigata, Japan.
- Dillenbourg, P. and M. Evans (2011). "Interactive tabletops in education." International Journal Of Computer-Supported Collaborative Learning 6: 491-514.
- Dillenbourg, P. and P. Jermann (2010). Technology for classroom orchestration. New Science of Learning Cognition Computers and Collaboration in Education. M. S. Khine and I. M. Saleh, Springer New York: 1-20.
- Dörner, R., B. Lok, et al. (2011). Social Gaming and Learning Applications: A Driving Force for the Future of Virtual and Augmented Reality? Virtual Realities. G. Brunnett, S. Coquillart and G. Welch, Springer Vienna: 51-76.
- Dunleavy, M., C. Dede, et al. (2008). "Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning." Journal of Science Education and Technology 18(1): 7-22.
- Enyed, N., J. A. Danish, et al. (2011). Play and Augmented Reality in Learning Physics: The SPASES Project. Connecting Computer-Supported Collaborative Learning to Policy and Practice: CSCL2011 Conference Proceedings. Volume I — Long Papers.
- Facer, K., R. Joiner, et al. (2004). "Savannah: mobile gaming and learning?" Journal of Computer Assisted Learning 20(6): 399-409.
- Feiner, S., B. MacIntyre, et al. (1997). "A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment." Personal Technologies 1: 208-217.
- Fjeld, M., F. Voorhorst, et al. (1999). Exploring Brick-Based Navigation and Composition in an Augmented Reality. Proceedings of the 1st international symposium on Handheld and Ubiquitous Computing, London, UK, Springer-Verlag.
- Fotouhi-Ghazvini, F., R. Earnshaw, et al. (2011). "From E-Learning to M-Learning - the use of Mixed Reality Games as a new Educational Paradigm." International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM) 5(2).
- Gagnon, D. J. (2010). ARIS. An open source platform for developing mobile learning experiences, University of Wisconsin - Madison.
- Hamilton, K. E. (2011, October). "Augmented Reality in Education." Retrieved 4/02/2012, from http://wik.ed.uiuc.edu/index.php/Augmented_Reality_in_Education.
- Holden, C. L. and J. M. Sykes (2011). "Leveraging Mobile Games for Place-Based Language Learning." International Journal of Game-Based Learning (IJGBL) 1(2): 1-18.
- Huang, Y.-M., Y.-T. Lin, et al. (2010). "Effectiveness of a Mobile Plant Learning System in a science curriculum in Taiwanese elementary education." Computers & Education 54: 47-58.
- Hughes, C. E., C. B. Stapleton, et al. (2005). "Mixed reality in education, entertainment, and training." Computer Graphics and Applications, IEEE 25(6): 24 - 30.
- Ibáñez, M., C. D. Kloos, et al. (2011). "Learning a Foreign Language in a Mixed-Reality Environment." Internet Computing, IEEE 15(6): 44 -47.
- Ibáñez, M. B., A. D. Serio, et al. (2011). Orchestration Framework for Learning Activities in Augmented Reality Environments. Across Spaces Workshop, European Conference-Technology Enhanced Learning, Palermo, Italy.
- ISO/IEC 18004:2006 (2006). Information technology -- Automatic identification and data capture techniques -- QR Code 2005 bar code symbology specification.
- Jermann, P., G. Zufferey, et al. (2008). Tinkering or Sketching: Apprentices' Use of Tangibles and Drawings to Solve Design Problems. Proceedings of the 3rd European conference on Technology Enhanced Learning: Times of Convergence: Technologies Across Learning Contexts, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag.
- Johnson, L., R. Smith, et al. (2011). The 2011 Horizon Report. Austin, Texas, The New Media Consortium.
- Kato, H. and M. Billinghurst (1999). Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, 1999. (IWAR '99).
- Kaufmann, H. and D. Schmalstieg (2002). Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications, New York, NY, USA, ACM.
- Kearney, M., S. Schuck, et al. (2012). "Viewing mobile learning from a pedagogical perspective." Research in Learning Technology 20(1).
- Kerawalla, L., R. Luckin, et al. (2006). "'Making it real': exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science." Virtual Reality 10(3): 163-174.
- Klopfer, E. (2008). Augmented Learning: Research and Design of Mobile Educational Games. Cambridge, MA. , The MIT Press.

- Klopfer, E., J. Sheldon, et al. (2011). Augmented reality games: place-based digital learning. Proceedings of the 9th International Computer-Supported Collaborative Learning Conference, Hong Kong, China.
- Klopfer, E. and K. Squire (2008). "Environmental Detectives—the development of an augmented reality platform for environmental simulations." Educational Technology Research and Development 56(2): 203-228.
- Koike, H., S. Nagashima, et al. (2005). EnhancedTable: An Augmented Table System for Supporting Face-to-Face Meeting in Ubiquitous Environment. Ubiquitous Computing Systems. H. Murakami, H. Nakashima, H. Tokuda and M. Yasumura, Springer Berlin / Heidelberg. 3598: 117-130.
- Laouris, Y. and N. Eteokleous (2005). We need an educationally relevant definition of mobile learning. mLearn 2005. 4th World Conference on mLearning. Mobile Technology: The future of learning in your hands. Cape Town, South Africa.
- Lingley, A. R., M. Ali, et al. (2011). "A single-pixel wireless contact lens display." Journal of Micromechanics and Microengineering 21(12): 125014.
- Mackay, W. E. (1998). Augmented reality: linking real and virtual worlds: a new paradigm for interacting with computers. Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces, New York, NY, USA, ACM.
- Martín-Gutiérrez, J., J. L. Saorin, et al. (2010). "Design and validation of an augmented book for spatial abilities development in engineering students." Computers & Graphics 34(1): 77 - 91.
- Milgram, P. and F. Kishino (1994). "A taxonomy of mixed reality visual displays." IEICE Transactions on Information and Systems E77-D(12).
- Muñoz-Cristóbal, J. A., J. I. Asensio-Pérez, et al. (2012). Helping educators to deploy CSCL scripts into mainstream VLEs that integrate third-party Web and Augmented Reality Tools. Workshop on Digital Ecosystems for Collaborative Learning, International Conference of the Learning Sciences (ICLS 2012), Sydney, Australia.
- Papagiannakis, G., G. Singh, et al. (2008). "A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems." Comput. Animat. Virtual Worlds 19(1): 3-22.
- Pemberton, L. and M. Winter (2009). Collaborative augmented reality in schools. Proceedings of the 9th international conference on Computer supported collaborative learning - Volume 2, International Society of the Learning Sciences.
- Pérez-López, D., M. Contero, et al. (2010). Collaborative Development of an Augmented Reality Application for Digestive and Circulatory Systems Teaching. IEEE 10th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), 2010 Sousse, Tunisia.
- Pérez-Sanagustín, M., G. Ramirez-Gonzalez, et al. (2011). "Discovering the campus together: A mobile and computer-based learning experience." Journal of Network and Computer Applications 35(1): 167-188.
- Rekimoto, J. (2002). SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing ourselves, New York, NY, USA, ACM.
- Robles, G., J. M. Gonzales-Barahona, et al. (2011). Implementing Gymkhanas with Android smartphones: A multimedia m-learning game. Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2011 IEEE, Amman, Jordan.
- Salvador-Herranz, G., D. Pérez-López, et al. (2011). Augmented reality at the primary school: a pilot study on a Natural Sciences course. Across Spaces Workshop, European Conference-Technology Enhanced Learning. Palermo, Italy.
- Santos, P., M. Pérez-Sanagustín, et al. (2011). "QuesTInSitu: From tests to routes for assessment in situ activities." Computers & Education 57(4): 2517 - 2534.
- Schmalstieg, D., A. Fuhrmann, et al. (2002). "The studierstube augmented reality project." Presence: Teleoper. Virtual Environ. 11(1): 33-54.
- Schmalstieg, D., T. Langlotz, et al. (2011). Augmented Reality 2.0. Virtual Realities. G. Brunnett, S. Coquillart and G. Welch, Springer Vienna: 13-37.
- Schneider, B., P. Jermann, et al. (2011). "Benefits of a Tangible Interface for Collaborative Learning and Interaction." Learning Technologies, IEEE Transactions on 4(3): 222 -232.
- Sharples, M., D. Corlett, et al. (2002). "The Design and Implementation of a Mobile Learning Resource." Personal Ubiquitous Comput. 6(3): 220-234.
- Sharples, M., I. A. Sanchez, et al. (2009). Mobile learning: small devices, big issues. Technology Enhanced Learning: Principles and Products. N. Balacheff, S. Ludvigsen, T. de Jong and S. Barnes. Heidelberg, Germany, Springer: 233-249.
- Shelton, B. E. (2002). "Augmented Reality and Education: Current Projects and the Potential for Classroom Learning." New Horizons for Learning 9(1).
- Sotiriou, S., S. Anastopoulou, et al. (2006). The CONNECT Project: bridging science education activities at schools and science centers with the support of advanced technologies. Proceedings of The First European Conference on Technology Enhanced Learning, EC-TEL 2006, Springer-Verlag, Berlin.
- Specht, M., S. Ternier, et al. (2011). "Dimensions of Mobile Augmented Reality for Learning: A First Inventory." Journal of the Research for Educational Technology (RJET) 7(1): 117-127.
- Squire, K. D. and M. Jan (2007). "Mad City Mystery: Developing Scientific Argumentation Skills with a Place-based Augmented Reality Game on Handheld Computers." Journal of Science Education and Technology 16(1): 5-29.
- Sugimoto, M. (2011). "A Mobile Mixed-Reality Environment for Children's Storytelling Using a Handheld Projector and a Robot." Learning Technologies, IEEE Transactions on 4(3): 249 -260.
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I, New York, NY, USA, ACM.
- Sutherland, R., S. Eagle, et al. (2012). A Vision and Strategy for Technology Enhanced Learning: Report from the STELLAR Network of Excellence, STELLAR.
- Sziebig, G. (2009). Achieving total immersion: technology trends behind augmented reality-a survey. Proceedings of the 9th WSEAS international conference on Simulation, modelling and optimization, Stevens Point, Wisconsin, USA, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
- van Krevelen, D. W. F. and R. Poelman (2010). "A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations." The International Journal of Virtual Reality 9(2): 1-20.

- Want, R., K. P. Fishkin, et al. (1999). Bridging physical and virtual worlds with electronic tags. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: the CHI is the limit, New York, NY, USA, ACM.
- Wellner, P. (1991). The DigitalDesk calculator: tangible manipulation on a desk top display. Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology, New York, NY, USA, ACM.
- Wellner, P. (1993). "Interacting with paper on the DigitalDesk." Communications of the ACM - Special issue on computer augmented environments: back to the real world 36(7): 87-96.
- Yoon, S. A., K. J. Elinich, et al. (2011). Learning Science through Knowledge-Building and Augmented Reality in Museums. Proceedings of the 9th International Computer-Supported Collaborative Learning Conference, Hong Kong, China.
- Zagoranski, S. and S. Divjak (2003). Use of augmented reality in education. EUROCON 2003. Computer as a Tool. The IEEE Region 8, Ljubljana, Slovenia.