



# CEU

*Universidad  
San Pablo*

**Escuela Politécnica Superior**

## **Construyendo mundos virtuales: de la cueva de Lascaux al metaverso**

---

**Rodrigo García Carmona**

Profesor Adjunto  
Universidad CEU San Pablo  
Festividad de San José  
Marzo 2022



**CEU** | *Ediciones*

# Construyendo mundos virtuales: de la cueva de Lascaux al metaverso

---

**Rodrigo García Carmona**

Profesor Adjunto  
Universidad CEU San Pablo  
Festividad de San José  
Marzo 2022

**Escuela Politécnica Superior  
Universidad CEU San Pablo**

## **Construyendo mundos virtuales: de la cueva de Lascaux al metaverso**

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)) si necesita escanear algún fragmento de esta obra.

© Rodrigo García Carmona, 2022  
© de la edición, Fundación Universitaria San Pablo CEU, 2022

CEU *Ediciones*  
Julián Romea 18, 28003 Madrid  
Teléfono: 91 514 05 73, fax: 91 514 04 30  
Correo electrónico: [ceuediciones@ceu.es](mailto:ceuediciones@ceu.es)  
[www.ceuediciones.es](http://www.ceuediciones.es)

Maquetación: Pedro Coronado Jiménez (CEU *Ediciones*)

Depósito legal: M-8473-2022

*Excelentísima y magnífica Sra. Rectora de la Universidad CEU San Pablo.  
Excelentísimas autoridades académicas, religiosas y civiles.*

*Ilustrísimo Sr. Director de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo.*

*Estimados compañeros, profesores, estudiantes y amigos:*

Antes de empezar quería agradecer a la Dirección de esta Escuela la confianza que han depositado en mi persona, proponiéndome llevar a cabo la lección magistral en el día de San José, Patrón de nuestra Escuela. Es para mí un gran honor, una enorme alegría, y una responsabilidad a cuya altura espero estar. Muchísimas gracias.

La mayoría de nosotros hemos tenido el placer de admirar pinturas rupestres, ya sea a través de fotos o, si hemos sido especialmente afortunados, en una cueva, claramente iluminadas para nuestro disfrute. Pero, como estudios recientes nos enseñan, esta no es la forma ideal de contemplar estas obras de arte.

Nuestros antepasados, en contra de la concepción popular, no vivían en cavernas. Estas eran lugares fríos, de difícil acceso y una oscuridad total, reservados para ocasiones especiales. ¿Qué podría motivar a estas personas a buscar lugares recónditos en las entrañas de la tierra, internarse en ellos y afanarse en decorar sus paredes? ¿Por qué no limitarse a pintar rocas que pudieran llevarse consigo? ¿Por qué cargar con antorchas y materiales de dibujo a un mundo de sombras?

En 1993, Edward Wachtel visitó varias cuevas célebres por sus pinturas rupestres en el sur de Francia y el norte de España, entre ellas la famosa Lascaux. Lo que halló en ellas le dejó profundamente intrigado: las pinturas estaban cubiertas de líneas verticales, cuidadosamente trazadas a intervalos regulares, y había numerosos ejemplos de superposición: animales con extremidades adicionales o incluso un toro pintado directamente encima de un ciervo. Un análisis cuidadoso le confirmó que esto no se debía a la falta de espacio ni a un artista imponiendo su obra sobre otro; debía de haber otra explicación.

No fue hasta que visitó la cueva de La Mouthe que se dio cuenta del por qué de todo esto. Dicha cueva no estaba bien mantenida y carecía de iluminación propia, por lo que se adentró en ella acompañado de un granjero que iluminó el espacio con un candil. La titilante llama reveló lo que había estado oculto a los ojos de los arqueólogos que, con sus luces eléctricas, habían examinado el espacio anteriormente. En palabras del propio Wachtel:

Al mover la luz, vimos los colores y las formas transformarse. Al desplazar la lámpara a la izquierda, los negros se difuminaron, los marrones se tornaron rojos y el rojo se intensificó. Al moverla a la derecha, ocurrió lo contrario. [...] Las formas grabadas se animaron, la cabeza de una criatura se alzó para luego desaparecer al verse sustituida por otra. Las líneas ya no eran un confuso patrón bidimensional, sino un bosque del que surgían animales. [...] La luz del fuego había revelado los secretos de las pinturas.

La combinación del parpadeo de las antorchas, la única fuente de luz en el paleolítico, y el movimiento del propio espectador conformaban las piezas perdidas de un arte centrado en uno de los aspectos fundamentales de la percepción visual: la persistencia de la imagen en la retina. Las cavernas eran espacios en los que el ser humano primitivo se internaba para visitar otro mundo, uno creado por la imaginación y el ingenio de nuestra especie.

Hace más de 30.000 años, antes de la escritura y de la agricultura, el ser humano ya soñaba con crear mundos virtuales. Un deseo que ha continuado hasta nuestros días, espolcado por los avances tecnológicos que, por fin, han hecho posible lo que estos seres humanos del amanecer de los tiempos soñaron.

Desde aquellas eras prehistóricas ha habido varios intentos de construir entornos virtuales que hagan al espectador sentirse transportado a otro lugar. Un ejemplo son los «panoramas», pinturas inmersivas dispuestas en las paredes de grandes salas circulares o esféricas. El objetivo de los panoramas era ofrecer una suerte de «turismo virtual» al espectador, permitiéndole viajar a lugares lejanos y exóticos. Desarrolladas desde finales del siglo XVIII, estas obras, a pesar de no ser muy diferentes a las cuevas del arte rupestre, eran en esencia más limitadas, pues representaban imágenes puramente estáticas.

No fue hasta el año 1955, en el que Morton Heilig, pionero de lo que hoy conocemos como multimedia, avanzó el paradigma existente. Heilig propuso el desarrollo de un «teatro de experiencias» que estimulara todos los sentidos del espectador; una idea que acabó materializando en el Sensorama, un novedoso invento que utilizaba numerosos avances tecnológicos a su alcance. Este aparato, puramente mecánico, ofrecía visión y sonido estereoscópicos, grabados previamente con

cámaras y micrófonos, y disponía de ventiladores e incluso de emisores de olor. Simulaba cinco experiencias distintas, siendo la más famosa un paseo en motocicleta a través de las calles de Nueva York, en la que los espectadores disfrutaban de una verdadera percepción de profundidad y sentían en sus propias carnes el viento y los olores de la ciudad, cuidadosamente sincronizados para que se sucedieran a la vez que las imágenes y sonidos reproducidos.

Con todo, los entornos proporcionados por el Sensorama tenían una gran limitación: el dispositivo solo podía reproducir vídeos, sonidos y otros estímulos previamente grabados a partir del mundo real. Se había logrado la inmersión, pero no una auténtica interactividad, pues el espectador carecía de la capacidad de relacionarse con el entorno de forma directa. El conductor de la motocicleta virtual no podía, en realidad, conducirla.

Heilig fue humilde con su propia creación y, tras recibir muchos años después el apelativo de «padre de la realidad virtual», llegaría a afirmar lo siguiente:

Cuando algo nuevo aparece, todos, como niños que descubren el mundo, piensan que ellos lo han inventado. Pero si rascas un poco te das cuenta de que un hombre de las cavernas pintando en una pared está, en cierta forma, creando una realidad virtual.

Esta es una reflexión profundamente sagaz si se considera que, curiosamente, fue anterior a la publicación por parte de Wachtel de sus hallazgos relativos a las pinturas rupestres.

Paralelamente a las propuestas de Heilig vio la luz un invento que lo cambiaría todo: el ordenador. Desde su mismo origen se comenzó a investigar en las imágenes generadas por computadora (CGI, por sus siglas en inglés), también llamadas imágenes sintéticas, un término que generalmente se refiere a modelos tridimensionales. En el año 1961 se creó, usando el BESK, el primer ordenador sueco, la primera animación generada por computadora. Se trataba de un video de 49 segundos de duración, que ofrecía la perspectiva de un coche desplazándose por una autopista cuya construcción aún estaba siendo planeada y que conectaría Estocolmo con Nacka. El ordenador, que disponía tan solo 2,5 KB de memoria, calculaba la proyección de los vectores tridimensionales que representaban la autopista sobre un plano. El conjunto de vectores bidimensionales resultantes era reproducido por un osciloscopio.

Llegados a este punto es el momento de explicar que en el campo de la imagen sintética se distinguen dos vertientes que, aunque tienen muchos elementos en

común, persiguen objetivos muy distintos, lo que determina las técnicas y algoritmos empleados.

Por una parte, tenemos las imágenes prerrenderizadas. Se trata de entornos tridimensionales cuya generación, debido a su nivel de detalle y realismo, siempre relativos al nivel tecnológico del momento, conlleva una carga de computación muy grande. Por ello, la creación de tan solo una de estas imágenes puede requerir de mucho tiempo; hoy en día horas y, en sus inicios, días o incluso semanas. La animación de la autopista generada por el BESK es un ejemplo de esta técnica, como lo son todas las animaciones de los primeros años.

La otra vertiente son las imágenes renderizadas en tiempo real. En este caso el ordenador debe producir tantas imágenes por segundo como sea necesario para, aprovechándose de la persistencia de la visión, hacer creer al ojo humano que se encuentra ante una escena en movimiento en lugar de una sucesión de imágenes independientes.

Los requisitos para conseguir este efecto vienen determinados por la ley de Ferry-Porter, que determina que la frecuencia de refresco o actualización de las imágenes aumenta en proporción al logaritmo de la intensidad de la luz ambiente. De esta forma, en entornos particularmente oscuros son necesarias frecuencias de refresco sustancialmente más bajas que en lugares bien iluminados, siendo suficiente con tan solo 4 imágenes por segundo en los casos más extremos. Esto es lo que hacía posible que el simple parpadeo de la luz de una antorcha pudiera dotar de vida a las escenas de caza del arte rupestre. Por eso nuestros ancestros descendían a aquellos lugares oscuros; buscaban un lugar idóneo para obrar su magia.

En entornos como una sala de cine, 24 imágenes por segundo bastan, y por ello las películas se graban a esta frecuencia. Para las animaciones por ordenador se considera que 30 imágenes por segundo son el mínimo para conseguir una auténtica fluidez, y 60 son deseables. Teniendo todo esto en cuenta, se entiende que los gráficos en tiempo real han de ser de una calidad muy inferior a los prerrenderizados, pues aquí la velocidad a la que el ordenador puede generar imágenes es de una importancia crítica.

Las imágenes renderizadas en tiempo real fueron empleadas por primera vez en el Sketchpad, una aplicación que permitía al usuario, mediante un lápiz óptico, manipular formas geométricas. Obra de Ivan Sutherland en 1963 y desarrollada en el Lincoln Laboratory del MIT, la tesis doctoral asociada a este trabajo es una de las más importantes de la historia de la informática, pues sienta las bases de lo que serían los modos de interacción con ordenadores que usamos hoy en día.

De hecho, el objetivo principal de la tesis no era la generación de imágenes en tiempo real, sino que esto era una consecuencia de la motivación inicial: mejorar la forma en la que las personas se relacionan con las máquinas, una motivación puramente humanística.

El Sketchpad hizo posible por primera vez, antes incluso de la invención del ratón, la manipulación en tiempo real elementos puramente digitales, cuya única existencia tangible se encuentra en la memoria de un ordenador. Agregó el elemento que le faltaba al Sensorama de Heilig: la interacción. El espectador se había transformado en usuario.

El propio Sutherland, junto con varios de sus alumnos, llevaron esta idea hasta sus últimas consecuencias, desarrollando en 1968 la Espada de Damocles, un dispositivo diseñado precisamente para hacer posible la exploración de espacios tridimensionales generados por un ordenador. Se trataba de un artefacto que, a modo de casco, cubría la visión del usuario y empleaba medios mecánicos y ultrasonidos para, en función de los movimientos de este, cambiar la perspectiva desde la que se percibían los objetos tridimensionales de forma fidedigna. El peso de la Espada de Damocles era tan grande que el dispositivo tenía que estar físicamente colgado del techo, de ahí su nombre, y usaba dos pequeños monitores de rayos catódicos, uno en cada ojo, para superponer imágenes sintéticas sobre el mundo real. Era la primera manifestación de la realidad aumentada.

En este caso, lo que el usuario veía era una forma geométrica sumamente sencilla: un cubo con cuatro rectángulos en sus paredes, que hacían las veces de puertas, marcadas con los puntos cardinales. Esta simplicidad era inevitable, pues en aquella época los gráficos por ordenador eran muy sencillos, limitándose a meros *wireframes*, estructuras de alambres compuestas de vectores tridimensionales cuya posición era calculada para cada una de las imágenes, algo que seguiría siendo así durante toda la década de los años 60.

No obstante, es importante recalcar que, desde los mismos orígenes de la imagen sintética, sus propios creadores buscaron inmediatamente la forma de emplearla para crear mundos habitables, explorables y con los que se pudiera interactuar de la forma más natural para el ser humano, incluso aunque tales representaciones se escaparan a las capacidades de los ordenadores de la época. La tecnología de las imágenes tridimensionales era perseguida no como un fin en sí misma, sino como un medio para hacer realidad el sueño de crear mundos artificiales en los que el usuario pudiera sumergirse.

El propio Sutherland reconoció que su visión llegaba más lejos de lo que la tecnología podía ofrecer, que su proyecto aún no podía tener utilidad real, pero afirmó que su fin era «captar la atención». Afirmó:

Aspiro a definir un conjunto de problemas que motiven a las personas durante años, [...] una razón para seguir avanzado y empujar el avance tecnológico tanto como sea posible.

Esta aspiración acabó haciéndose realidad, pues otros recogieron su testigo y, motivados por el futuro que Sutherland concebía, se pusieron manos a la obra para solucionar los problemas técnicos presentes. Durante los años 60 y 70 se produjeron numerosos avances conceptuales. Se trataba de desarrollos que no solo se centraban en mejorar la capacidad de los ordenadores para producir imágenes, sino también en experimentar con interfaces persona-computador y en postular los modelos matemáticos necesarios para plasmar digitalmente objetos y seres vivos del mundo real.

Describir de forma exhaustiva estos avances queda fuera del alcance de esta lección magistral, pero me gustaría resaltar de forma sucinta los más relevantes.

En 1967, Lee Harrison y su equipo digitalizaron por primera vez los movimientos de un ser humano, utilizando un traje que, mediante potenciómetros, representaba digitalmente cada uno de los segmentos principales que componen el cuerpo humano. Estos eran modelados como vectores tridimensionales, «huesos», cuya unión se producía en las articulaciones. Los datos recogidos por este traje se utilizaron para animar lo que entonces se denominó «marioneta digital».

El año siguiente, un grupo de matemáticos y físicos soviéticos dirigidos por Nikolai Konstantinov crearon el primer personaje animado por ordenador, un gato cuyos movimientos obedecían a un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales. Estamos ante el primer ejemplo de animación procedural, en la que los movimientos vienen determinados por un algoritmo y no creados a mano o digitalizando los movimientos de un ser vivo.

Quizá el avance más importante de los años 70 en el campo de la imagen sintética se produjo cuando, en 1972, Edwin Catmull y Fred Parke, por aquel entonces estudiantes de doctorado y alumnos de Sutherland, crearon la primera animación en 3D basada en mallas poligonales sombreadas con colores planos. La animación se componía de una mano, la del propio Catmull, y de la cara de la esposa de Parke.

Este modo de crear imágenes por ordenador, que consiste en representar una superficie mediante una colección de polígonos, generalmente triángulos,

conectados por sus lados y aristas, para luego colorear dichos polígonos, se convirtió en un estándar que, a pesar de las muchas evoluciones experimentadas desde entonces, sigue empleándose hoy en día. Además, la creación de Catmull y Parke tiene una enorme relevancia histórica por otras dos razones: en primer lugar, fue la primera animación tridimensional creada utilizando un proceso de interpolación matemática. En segundo lugar, fue el primer vídeo en 3D generado por ordenador en aparecer en una película, pues fue empleado en una escena de la película *Futureworld*, estrenada en 1976 y secuela de *Westworld*, que a su vez fue la primera película en usar efectos digitales.

Dos años después de aquella primera animación, en 1974, Catmull ideó otro avance fundamental: el mapeo de texturas. Una textura es una imagen bidimensional que se proyecta sobre la cara exterior de una superficie tridimensional compuesta de polígonos, «envolviéndola». De esta forma, la superficie ya no está limitada a un único color, sino que sobre ella pueden representarse imágenes arbitrarias y, gracias a ellas, reducir la complejidad geométrica necesaria para representar objetos complejos y de gran detalle. Además, las texturas y las propiedades que se pueden codificar sobre ellas acabaron siendo fundamentales para una de las técnicas más importantes en la creación de imágenes por ordenador: la iluminación.

Mientras matemáticos, físicos, científicos e ingenieros llevaban a cabo estos desarrollos, la inexorable ley de Moore, que postulaba que el número de transistores en un microprocesador se duplicaría cada 2 años, seguía su curso, aumentando la potencia de cálculo de la que los ordenadores eran capaces. Catmull, consciente de esta progresión, se limitó a hacer algo que, a pesar de su sencillez, en muchas ocasiones resulta particularmente difícil para la mente humana: extrapolar.

Creo que, en este punto, es importante profundizar un poco más en la vida y orígenes de Edwin Catmull. Enamorado del cine de animación de Disney e inspirado por películas como *Peter Pan* y *Pinocho*, Catmull siempre albergó el sueño de convertirse en animador. Sin embargo, también sentía una afinidad muy fuerte por las matemáticas y la física, por lo que decidió graduarse en la universidad como físico e informático. Aunque inició su carrera científica investigando en el ámbito de los lenguajes de programación, su encuentro con Sutherland en la Universidad de Utah y el Sketchpad que este había ideado le produjeron un profundo impacto. Se convirtió en alumno de este y decidió dedicar su vida a perseguir un sueño que aunaba su amor por la animación y por la computación: crear películas realistas usando únicamente medios digitales. Catmull sabía que, tarde o temprano, las capacidades de los ordenadores estarían a la altura de su sueño, y vislumbró antes que la mayoría un futuro de imágenes sintéticas fotorrealistas.

Espoleado por este sueño, Catmull trabajó, como ya hemos visto, en los conceptos matemáticos necesarios para un renderizado lo más eficiente posible de imágenes tridimensionales. Pero, lejos de limitarse al plano técnico, puso todos los medios de los que disponía al servicio de su gran idea. Así, tras terminar su doctorado, intentó convencer a varios estudios de cine para que le ayudaran a hacer realidad su visión.

Uno tras otro, sistemáticamente, rechazaron su propuesta, hasta que el director George Lucas, que acaba de estrenar *Star Wars*, fundó dentro de su prestigiosa compañía de efectos especiales, Industrial Light & Magic, una división especialmente dedicada a las imágenes generadas por ordenador, que sería dirigida por Catmull y recibiría el nombre de Graphics Group. A pesar del trabajo realizado por este equipo, la tecnología de la época solo permitía la creación de fragmentos de animación muy cortos y desarrollados a un coste comparativamente alto respecto a los efectos especiales tradicionales. Pero esto no importó a George Lucas, que veía al Graphics Group como una semilla de lo que estaba por venir; una semilla que finalmente dio sus frutos en los años 80, en forma de los efectos especiales de películas como *El Retorno del Jedi*, *El Joven Sherlock Holmes*, *Star Trek 2: La Ira de Khan* o *Dentro del Laberinto*. Esta bonanza creativa vino acompañada de muchas innovaciones, como el canal *alpha*, usado para almacenar la información de transparencia de una imagen; el *z-buffer*, una técnica mediante la cual el ordenador solo procesa aquellos objetos que no están ocluidos por otros; o el uso de *splines* entre dos puntos para generar un movimiento fluido entre *keyframes* en una animación, que era precisamente el tema de la tesis doctoral de Catmull.

En 1986 el Graphics Group se escindiría de Industrial Light & Magic, financiados por un Steve Jobs recién salido de Apple y en busca de nuevos proyectos, que entendió la visión de Catmull. La recién nacida empresa fue rebautizada como Pixar, un nombre que hoy en día no necesita presentación alguna.

Como cofundador de Pixar, Catmull tuvo ante sí, por fin, la oportunidad que llevaba esperando 20 años: producir una película de animación creada enteramente usando imágenes en 3D generadas por un ordenador. Esta película, que se acabaría estrenando en 1995, es *Toy Story*. Y su cliente era nada menos que Disney, la empresa creadora de aquellas obras que inspiraron en el joven Catmull el deseo de convertirse en animador.

Catmull es un artista y un ingeniero, un genio de las matemáticas que supo avanzar el estado de la técnica en pos de un fin artístico. Es, hasta la fecha, la única persona que ha recibido al mismo tiempo una Medalla John Von Neumann del

IEEE y un Premio Turing de la ACM, reconocimientos a su excelencia técnica, y cuatro Premios de la Academia, popularmente conocidos como «Óscars», por sus contribuciones al séptimo arte.

En *Toy Story* trabajaron 27 animadores que, empleando más de 400 modelos computacionales, crearon 115.000 imágenes que requirieron de 800.000 horas de ordenador para ser generadas. Pixar, con todo su músculo, solo era capaz de generar 30 segundos de metraje al día. Hoy en día, un ordenador medianamente potente sería capaz de renderizar *Toy Story* en tiempo real.

Esta discrepancia no se debe exclusivamente a los avances en la capacidad de cálculo en bruto de los ordenadores ni a los ingeniosos algoritmos y modelos matemáticos empleados, sino también a un desarrollo paralelo en el *hardware* que daba soporte a la creación de imágenes por ordenador, especialmente cuando estas debían ser generadas en tiempo real.

El proceso de renderización de imágenes se compone de tres pasos principales, que se ejecutan uno tras otro:

- En primer lugar, la transformación, que consiste en generar una vista en 2D de una escena en 3D desde el punto de vista del observador.
- Después, el *clipping*, que consiste en descartar aquellas partes de la escena que han quedado ocultas tras la proyección en 2D. Es decir, aquellos objetos que el observador no puede ver al estar ocultos por otro objeto más cercano.
- Por último, la iluminación, que consiste en alterar los colores de las superficies de los objetos en función de cómo incide la luz sobre ellos.

Se trata de un proceso computacionalmente costoso, pero eminentemente paralelizable, pues puede llevarse a cabo sobre diferentes partes de la imagen al mismo tiempo y por separado. Por ello, a finales de los años 80 comenzaron a aparecer microprocesadores de propósito específico, especialmente optimizados para realizar las operaciones matemáticas concretas que se emplean en estos tres pasos, lo que se vino a llamar «aceleración 3D por *hardware*». Hoy en día estos dispositivos reciben el nombre de GPUs (*Graphical Processing Units*) y son una parte fundamental de ordenadores y consolas de videojuegos.

Silicon Graphics, una *spin-off* de la Universidad de Stanford, fue la empresa pionera en la creación de GPUs. Su primer producto, lanzado en 1984, fue el IRIS, una estación de trabajo basada en su Geometry Engine. Estos ordenadores, debido a su elevado precio, solo estaban disponibles en entornos industriales, militares o de investigación. Debido a ello, el primer contacto que tuvo el gran público

con un *hardware* especialmente diseñado para la renderización de imágenes 3D fue, una vez más, a través de dispositivos diseñados con la creación de mundos virtuales en mente: las placas Sega Model 1 y Namco System 22, que llegaron a los salones de máquinas recreativas en 1992 y se hicieron famosas por ejecutar los videojuegos *Virtua Racing* y *Ridge Racer*, respectivamente. Como curiosidad, quiero comentar que la Namco System 22 empleaba la GPU TR3 de la empresa Evans & Sutherland, fundada por el mismo Sutherland que inventó el Sketchpad y la Espada de Damocles.

Llegados a este punto, las posibilidades que la imagen sintética ofrecía habían calado en la imaginación colectiva. A veces, es la tecnología la que persigue a los sueños, pero en otras ocasiones son los artistas quienes se ven inspirados por los avances tecnológicos. En la literatura especulativa y de ciencia-ficción se empezó a meditar sobre las implicaciones de mundos virtuales cada vez más realistas. En 1992 fue publicada *Snow Crash*, una novela de Neal Stephenson que inicialmente fue ideada como el guion de un cómic confeccionado a partir de imágenes generadas por ordenador. En *Snow Crash* los personajes accedían a un mundo virtual llamado el «metaverso» usando un visor especial y unos auriculares. Permítanme leer un breve extracto:

Dibujando una imagen ligeramente distinta frente a cada ojo se puede producir el efecto de una visión tridimensional. Cambiando la imagen setenta y dos veces por segundo, esta se mueve. Dibujando la imagen tridimensional en movimiento con una resolución de 2K píxeles en cada dimensión, se puede lograr que sea tan nítida como el ojo es capaz de percibir, y enviando sonido estéreo digital a través de los pequeños auriculares, la película en 3D dispone de una banda sonora perfectamente realista. [...] Está en un universo generado informáticamente, que el ordenador dibuja sobre el visor y le lanza a través de los auriculares. En la jerga de los entendidos, ese lugar imaginario se denomina Metaverso. [...] La Calle es el Broadway del Metaverso, sus Campos Elíseos. Es el bulevar brillantemente iluminado que se distingue, un reflejo miniaturizado e invertido, en los cristales de su visor. En realidad no existe, pero en ese mismo instante la recorren millones de personas.

Este fragmento es asombrosamente similar a la descripción de las características técnicas que podríamos dar de un dispositivo de realidad virtual como los disponibles hoy en día, hasta el punto de que los detalles técnicos concretos son parecidos. En 2016, casi 25 años después de la publicación de esta novela, la tecnología había vuelto a alcanzar a la imaginación humana, y Oculus puso a la venta el Oculus Rift V1, el primer dispositivo de realidad virtual auténtica disponible para el gran público. Innumerables avances, pequeños pero constantes, en los campos de la captura de movimientos, los algoritmos de generación de imágenes sintéticas, las

interfaces persona-computador y la miniaturización de componentes electrónicos lo habían hecho posible.

Llegados a este punto, la capacidad para sumergirse en primera persona en un mundo concebido por la imaginación humana y construido mediante herramientas informáticas ya estaba al alcance de todo el mundo. Es, por tanto, natural que se haya empezado a utilizar la palabra «metaverso», anteriormente confinada a la novela *Snow Crash*.

No obstante, como todo término de uso reciente, muchas veces no es empleado correctamente, y su significado exacto puede ser confuso, algo de lo que actores interesados incluso llegan a aprovecharse para crear el tan deseado *hype*. Por tanto, hablemos con propiedad, esforzándonos por aclarar lo que significa el término «metaverso» antes de que la palabra acabe perdiendo su significado por culpa de un uso erróneo.

El metaverso es un entorno digital simulado y persistente que el usuario habita en primera persona, de forma inmersiva. Es un espacio conectado y común a todos sus usuarios, pudiéndose por tanto experimentar de forma colectiva. Varias aplicaciones y experiencias pueden formar parte del metaverso, igual que nuestro mundo real acoge espacios diferentes, siempre y cuando estos cumplan con las características antes nombradas. No obstante, no es necesario que un objeto del metaverso sea la representación virtual de una contrapartida real, aunque podría serlo. Este es el ámbito de los gemelos digitales, un concepto que, si bien es adyacente al de los mundos virtuales, no es sinónimo.

Así, una aplicación con la que se interactúa a través de una pantalla de ordenador o de un teléfono móvil no formaría parte del metaverso, pues el modo de interacción ya no es el propio cuerpo. Tampoco podría considerarse parte del metaverso una aplicación *offline* o monousuario, ni un entorno cuyos elementos desaparecen al desconectarse el usuario, por poner algunos ejemplos.

El metaverso es, en otras palabras, una Internet «encarnada», un universo virtual multiusuario experimentado a través de la realidad virtual o aumentada.

Para finalizar esta lección magistral me gustaría reproducirles un vídeo creado recientemente, en diciembre de 2021, que se ejecuta en tiempo real sobre las consolas de videojuegos actuales. El objeto del vídeo es promocionar el motor gráfico Unreal Engine 5, y para ello recrea escenas de la película *The Matrix*, estrenada en 1999, pero usando enteramente imágenes generadas por ordenador en lugar de actores y entornos reales. El vídeo es prácticamente indistinguible del metraje

original, y en él aparecen modelos tridimensionales de actores completamente generados por ordenador que, quiero insistir, están siendo renderizados en tiempo real y, por tanto, son interactivos.

Que la elegida para esta demostración técnica sea esta película, cuyo *leitmotiv* era precisamente que la realidad en la que nos encontramos no es sino una simulación, no debe pasarse por alto.

Hoy, el sueño de los autores anónimos de las pinturas rupestres, de Heilig, de Sutherland, de Catmull, de Stephenson y de incontables artistas e ingenieros se ha hecho realidad. Los seres humanos podemos habitar mundos surgidos de nuestra imaginación, hechos posibles gracias a la «magia» de nuestra era: los ordenadores que la curiosidad, la inventiva y el ingenio humanos han creado.

Les agradezco profundamente su tiempo y atención. Gracias por acompañarme en este viaje.

**RODRIGO GARCÍA CARMONA.** Es profesor adjunto de la Universidad CEU San Pablo y Director del Grado en Arte Digital, el Grado en Ingeniería en Tecnologías para Animación y Videojuegos, el Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación y el Máster Propio en Realidad Virtual con PlayStation. Finalizó sus estudios de Ingeniería de Telecomunicación en 2007, en la Universidad Politécnica de Madrid. Recibió el título de Doctor en Ingeniería Telemática por la Universidad Politécnica de Madrid en 2015.

Su línea de investigación se centra en la aplicación de las tecnologías inmersivas a la rehabilitación y la docencia, en el diseño de juegos aplicado a la docencia y en los interfaces persona-computador, y forma parte del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica de la Universidad CEU San Pablo. Es autor y coautor de más de 30 publicaciones científicas en revistas, libros y congresos internacionales. Ha participado en varios proyectos de investigación nacionales e internacionales, en uno de ellos como Investigador Principal por parte de la Universidad CEU San Pablo. Ha recibido dos premios a la innovación docente.

En su faceta como diseñador de juegos, ha trabajado para numerosas empresas, entre las que se encuentran Corvus Belli, Kobold Press, TSR, Star Line Publishing, Edge Entertainment y Other Selves, esta última una editorial de la que es fundador.