



**Departamento de  
Informática e Ingeniería  
de Sistemas**  
**Universidad Zaragoza**

# Proyecto Docente

## Diego Gutiérrez

Plaza: 2018-27  
Categoría: CU



## Índice general

<b>1. Convocatoria</b>	<b>7</b>
1.1. Convocatoria y marco jurídico . . . . .	7
<b>2. Contexto Institucional</b>	<b>9</b>
2.1. Introducción . . . . .	9
2.2. La Universidad: breve repaso histórico . . . . .	10
2.2.1. Orígenes . . . . .	10
2.2.2. El pasado reciente . . . . .	11
2.3. La Universidad: presente . . . . .	12
2.3.1. El alumno universitario . . . . .	13
2.3.2. El profesor universitario . . . . .	14
2.3.3. El catedrático . . . . .	16
2.4. Conclusiones . . . . .	17
2.4.1. Agradecimientos . . . . .	18
<b>3. La Universidad de Zaragoza</b>	<b>19</b>
3.1. La Universidad de Zaragoza; reseña histórica . . . . .	19
3.1.1. La Universidad de Zaragoza hoy . . . . .	20
3.2. La Escuela de Ingeniería y Arquitectura . . . . .	21
3.3. El Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas . . . . .	22
<b>4. Contexto Curricular</b>	<b>25</b>
4.1. Introducción . . . . .	25
4.2. <i>Computing Curricula 2001</i> . . . . .	25
4.3. Las titulaciones en el modelo europeo . . . . .	26
4.3.1. El sistema europeo de créditos ECTS . . . . .	27
4.3.2. Competencias y habilidades . . . . .	28

4.3.3.	Las guías docentes . . . . .	29
4.4.	Grado, Master y Doctorado . . . . .	30
4.4.1.	Grado . . . . .	30
4.4.2.	Máster . . . . .	31
4.4.3.	Doctorado . . . . .	31
4.5.	Grado de Ingeniería Informática . . . . .	32
4.6.	Conclusiones . . . . .	32
<b>5.</b>	<b>Informática Gráfica</b>	<b>35</b>
5.1.	Introducción . . . . .	35
5.2.	Consideraciones iniciales . . . . .	36
5.3.	La especialidad de Computación . . . . .	38
5.4.	Orientación de la asignatura . . . . .	39
5.5.	Descripción general . . . . .	41
5.6.	Programa . . . . .	44
5.6.1.	Bloque I: Introducción . . . . .	45
5.6.2.	Bloque II. La Ecuación de Render . . . . .	47
5.6.3.	Bloque III: Iluminación Global . . . . .	50
5.6.4.	Bloque IV: Imagen Computacional . . . . .	53
5.6.5.	Otros seminarios . . . . .	54
5.7.	Trabajos . . . . .	55
5.7.1.	Trabajo 1: Geometría (voluntario) . . . . .	55
5.7.2.	Trabajo 2: Trazado de rayos (voluntario) . . . . .	58
5.7.3.	Trabajo 3: Path tracing (obligatorio) . . . . .	60
5.7.4.	Trabajo 4: Photon mapping (obligatorio) . . . . .	64
5.7.5.	Trabajo 5: Imagen computacional (voluntario) . . . . .	68
5.8.	Resultados y conclusiones . . . . .	72
<b>A.</b>	<b>Propuesta de un nuevo Máster</b>	<b>75</b>
A.1.	Datos básicos . . . . .	75
A.2.	Criterios generales para la implantación de nuevos másteres . . . . .	76
A.2.1.	Ejes Estratégicos definidos por la Universidad de Zaragoza . . . . .	76
A.2.2.	Demanda de estudiantes suficiente para justificar su implantación y continuidad . . . . .	80
A.2.3.	Coherencia en su diseño interno, entendida como el correcto alinea- miento de la organización, plan de estudios y recursos necesarios con unos objetivos de aprendizaje claros y relevantes. . . . .	80
A.2.4.	Viabilidad económica y suficiencia y capacidad de los recursos hu- manos, tanto PDI como PAS, e instalaciones existentes . . . . .	82

*I never teach my students.  
I only attempt to provide the conditions in which they can learn.*  
Albert Einstein



### 1.1. Convocatoria y marco jurídico

- **Convocatoria:** Concurso público para ingreso al cuerpo de Catedráticos de Universidad
- **Nº de Plaza:** 2018-27
- **Cuerpo:** Catedráticos de Universidad
- **Resolución:** 17 de abril de 2018
- **BOE:** 28 de abril de 2018
- **Departamento:** Informática e Ingeniería de Sistemas.
- **Área de conocimiento:** Lenguajes y Sistemas Informáticos.
- **Institución:** Universidad de Zaragoza.

Con arreglo a las bases que rigen la citada convocatoria, el presente documento aporta el Proyecto Docente del candidato.



## 2.1. Introducción

La Universidad es la institución más sólida de la identidad europea desde aquel lejano 1088 en que un famoso Irneus y un desconocido Pepo, según cuentan los medievalistas, comenzaron a impartir leyes en Bolonia. En sus aulas se han urdido durante siglos sólidos argumentos sobre los que ha tomado asiento un sistema de valores que siguen siendo instrumentos irrenunciables, desde el punto de vista intelectual y ético, para los europeos del siglo XXI: la idea de naturaleza, la idea de razón, la idea de ciencia, la idea de libertad, y sobre todo el concepto de duda y su práctica. Un excelente vademécum para poder afrontar con garantía la espesa incertidumbre que destila el milenario [Gut06, Ser03].

Ante la Universidad han aparecido escenarios nuevos: el espacio europeo, la movilidad, la acreditación, la evaluación institucional y el déficit cero. Las metas que se fijan a las Universidades para el siglo XXI son [UNE18]:

- Formar profesionales altamente cualificados, ciudadanos responsables, que combinen conocimientos teóricos, prácticos y constantemente adaptados a las necesidades presentes y futuras de la sociedad.
- Constituir un espacio abierto para la formación superior que propicie el aprendizaje permanente.
- Formar ciudadanos que participen activamente en la sociedad.
- Promover, generar y difundir conocimientos por medio de la investigación.
- Contribuir a comprender, interpretar, preservar, reforzar, fomentar y difundir las culturas nacionales, regionales, internacionales e históricas.
- Contribuir a proteger y consolidar valores de la sociedad, promocionando perspectivas críticas y objetivas.



Figura 2.1: Biblioteca de la Universidad de Salamanca.

## 2.2. La Universidad: breve repaso histórico

### 2.2.1. Orígenes

La expansión universitaria registra su plétora entre 1540-45 y 1570-75, ámbito de ebullición religiosa y política en los territorios de la Corona de Castilla. En este contexto de expansión y diversidad, las tres universidades mayores castellanas de Salamanca, Valladolid y Alcalá adquirieron la categoría de verdaderas universidades de la Monarquía, y actuaron como centros dinámicos de atracción y proyección, atenuando la incidencia de las fuerzas centrípetas, territoriales y locales. Fue en estas circunstancias cuando se configuró el estereotipo de Salamanca, que, a partir de los siglos XVI y XVII, constituirá, en la imaginación colectiva, una de las más famosas referencias simbólicas de la cultura española.

Las reformas ilustradas del siglo XVIII culminan en el llamado Plan Caballero de 1807, que pretendía aplicar un modelo uniforme a todas las universidades de la Monarquía. Además del control estatal, quedaba reforzada la figura del rector y se concentraban poderes en los claustros de catedráticos. Ese mismo año se suprimieron muchas de las llamadas universidades menores, es decir, las instituciones académicas de proyección más localista; en parte por su excesivo número, y por el deterioro académico y la penuria económica de muchas de ellas.

Mientras tanto, se suceden alternativas de reformas liberales y restauraciones absolutistas, al ritmo de las oscilaciones políticas generales. Y en medio de este tejer y destejer se van desmoronando, progresivamente, las bases estructurales de las universidades tradicionales. En 1837 desaparecen los diezmos eclesiásticos, que constituían su fuente de financiación; y, por el plan de 1838, quedaba establecido que dichas universidades se financiaran a partir de los derechos de matrícula y académicos, así como de cantidades otorgadas por los presupuestos generales del Estado. Desaparecen, también,

los privilegios jurisdiccionales, y, en general, se va imponiendo paulatinamente la política educativa liberal, según normas centralizadas, emanadas y difundidas desde Madrid. De este modo, pasamos de la universidad del Antiguo Régimen, autónoma en lo financiero y organizativo, a la universidad liberal, centralizada, uniforme y jerarquizada, financiada y controlada por el Estado, rama de la administración del Estado y con un profesorado funcionario, a la vez que los estudios eclesiásticos se diluyen [CUN18].

### 2.2.2. El pasado reciente

La Ley de Ordenación Universitaria se promulga para toda España en julio de 1943, y mantuvo su vigencia hasta 1970. La universidad quedó vinculada a las ideologías dominantes de la Falange, el Catolicismo tradicionalista y los principios del Movimiento. Los poderes se concentraron en el rector, nombrado desde el Ministerio, y que debía ser catedrático y militante de la Falange.

A esta precaria universidad de los años 40 y 50 sucedieron las aceleradas transformaciones sociales de los años 60, que cristalizan en el nuevo marco ofrecido por la Ley Villar Palasí de 1970 (Ley General de Educación, LGE). En esencia, se concede cierta autonomía a las universidades en materias de docencia e investigación, impulsándose esta, y se introduce cierta flexibilización en los currículums, con la aparición de las asignaturas optativas. Se potencian los departamentos y los institutos universitarios, y nacen las Universidades Politécnicas a partir de la transformación de los institutos técnicos ya existentes.

La Ley de 1970 tiene una importante significación, ya que da lugar a un modelo diferente de Universidad, un poco más libre y democrática, más dinámica y abierta a la sociedad, que será definido claramente con la Ley de Reforma Universitaria (LRU), aprobada en 1983 [CUN18].

El proceso de descentralización estatal, abierto a raíz de la Constitución de 1978, repercute en la institución universitaria en el sentido de que el referente educativo tiende a ser ahora el marco geográfico de la correspondiente Comunidad Autónoma. La gestión universitaria se transfiere, por tanto, desde el Estado a las autonomías regionales. Paralelamente, se produce una proliferación universitaria sin precedentes que afecta a toda España, debida a condicionantes políticos (descentralización administrativa) y sociales (demanda creciente de estudios superiores). En 1984 existían en España 34 universidades, con un total de 700.000 estudiantes; en 1995 las universidades eran 51, con casi millón y medio de matriculados.<sup>1</sup>

Como consecuencia, la proyección geográfica de las universidades se recorta, salvo algunas excepciones como Madrid. En un proceso paralelo, las modificaciones registradas en el mercado de empleo, los cambios tecnológicos y culturales acelerados, así como las exigencias de integración en la Europa Comunitaria, han conducido a una reestructuración y revisión general de las carreras universitarias, y se ha apostado por nuevas

---

<sup>1</sup> Actualmente, el sistema universitario español está integrado por un total de 82 universidades con las siguientes características: 50 universidades públicas (47 presenciales, 1 no presencial y 2 universidades especiales -UIMP y UNIA-) y 32 universidades privadas (28 presenciales y 4 no presenciales) [XXI18].



Figura 2.2: Mapa de Universidades españolas.

especialidades de ciclo corto, flexibilidad en los conocimientos impartidos y formación continuada y diversificada [RS06].

### 2.3. La Universidad: presente

El 25 de mayo de 1998, los Ministros de Educación de Francia, Alemania, Italia y Reino Unido firmaron en la Sorbona una Declaración instando al desarrollo de un *Espacio Europeo de Educación Superior* [dB]. Ya durante este encuentro, se previó la posibilidad de una reunión de seguimiento en 1999, teniendo en cuenta que la Declaración de la Sorbona era concebida como un primer paso de un proceso político de cambio a largo plazo de la enseñanza superior en Europa [Muñ18].

Se llega así a la celebración de una nueva Conferencia, que dará lugar a la Declaración de Bolonia el 19 de junio de 1999 [Eur99]. Esta Declaración cuenta con una mayor participación que la anterior, siendo suscrita por 30 Estados europeos: no solo los países de la UE, sino también países del Espacio Europeo de Libre Comercio y países del este y centro de Europa.

La Declaración de Bolonia sienta las bases para la construcción de un *Espacio Europeo de Educación Superior*, organizado conforme a ciertos principios (calidad, movilidad,

diversidad, competitividad) y orientado hacia la consecución entre otros de dos objetivos estratégicos: el incremento del empleo en la Unión Europea y la conversión del sistema Europeo de Formación Superior en un polo de atracción para estudiantes y profesores de otras partes del mundo.

Son seis los objetivos recogidos en la Declaración de Bolonia:

1. La adopción de un sistema fácilmente legible y comparable de titulaciones, mediante la implantación, entre otras cuestiones, de un Suplemento al Diploma.
2. La adopción de un sistema basado, fundamentalmente, en dos ciclos principales.
3. El establecimiento de un sistema de créditos, como el sistema ECTS.
4. La promoción de la cooperación Europea para asegurar un nivel de calidad para el desarrollo de criterios y metodologías comparables.
5. La promoción de una necesaria dimensión Europea en la educación superior con particular énfasis en el desarrollo curricular.
6. La promoción de la movilidad y remoción de obstáculos para el ejercicio libre de la misma por los estudiantes, profesores y personal administrativo de las universidades y otras Instituciones de enseñanza superior europea.

El establecimiento de un sistema de créditos ECTS y del Suplemento al Título (Real decreto 1044/2003) juegan un papel fundamental junto al Marco de Cualificaciones para el EEES (informe 2007) y los Criterios y Directrices para la garantía de la Calidad en el EEES. El establecimiento de un Registro Europeo de Agencias de Garantía de Calidad constituye un importante hito.

La Declaración estableció un plazo hasta 2010 para la realización del Espacio Europeo de Educación Superior, con fases bienales de realización, cada una de las cuales termina mediante la correspondiente Conferencia Ministerial que revisa lo conseguido y establece directrices para el futuro. La primera conferencia de seguimiento del proceso de Bolonia tuvo lugar en Praga en mayo de 2001. En ella, los Ministros adoptaron un Comunicado que respaldaba las actuaciones realizadas hasta la fecha, señalaba los pasos a seguir en el futuro, y admitía a Croacia, Chipre y Turquía, como nuevos miembros del proceso.

### **2.3.1. El alumno universitario**

Los alumnos universitarios son aprendices adultos, con connotaciones o rasgos específicos en su forma de adquirir conocimiento. Son los protagonistas del proceso de aprendizaje, y gracias a la formación universitaria van a convertirse en los futuros profesionales que demanda la sociedad. Los alumnos del siglo XXI llegan a la Universidad buscando una formación completa, que los prepare para ser profesionales de la especialidad que han elegido, para ser competentes en una sociedad con una perspectiva cada vez más internacional. En este sentido, cabe destacar la participación cada vez más numerosa de los estudiantes españoles en los programas de intercambio interuniversitarios,

tanto nacionales como, y sobre todo, internacionales, y la presencia cada vez mayor en nuestras Universidades de alumnos de otras nacionalidades.

Aunque la mayor parte de los alumnos universitarios corresponden al nivel de grado, no hay que olvidar que la Universidad también tiene que formar doctores, investigadores y especialistas. Debido al continuo avanzar de la ciencia y el conocimiento, la Universidad tiene una responsabilidad ineludible en el mantenimiento de la competencia de los profesionales que ha formado, convirtiéndolos en parte también en alumnos.

En general, para que se produzca aprendizaje, los alumnos deben poseer capacidad, y voluntad de aprendizaje. Respecto a la capacidad, es indudable que cada alumno posee más o menos capacidad para el aprendizaje, y corresponde al profesor conocer la capacidad de sus alumnos para facilitarles el aprendizaje. Respecto a la voluntad, es una de las responsabilidades del profesor saber incentivarla, motivando a los alumnos a aprender más allá de un examen.

De acuerdo con todo lo anterior, el aprendizaje en la Universidad se caracteriza por los siguientes rasgos [Mar10]:

- Presupone el dominio de un conjunto de conocimientos, métodos y técnicas que deben conducir al alumno a una progresiva autonomía en la adquisición de conocimientos.
- Debe llevar a la integración de los procesos de enseñanza-aprendizaje con la investigación, manteniendo entre ellos una articulación coherente. Ello implicará sustituir una enseñanza esencialmente transmisora por otra en la que se simulen, de forma gradual, los procesos de investigación. Esta integración entre investigación y enseñanza implica una tarea difícilmente asumible si no es en equipo. El trabajo en el aula se convierte así en un proceso también de investigación.

Como veremos, a la hora de diseñar la asignatura de Informática Gráfica, presentada en este documento, estas dos consideraciones están muy presentes. Esto es posible dado que dicha asignatura pertenece al séptimo semestre, con lo que los alumnos ya han desarrollado una cierta capacidad de extrapolar conocimientos, y una cierta autonomía.

### 2.3.2. El profesor universitario

Existen diversas aproximaciones a la idea del profesor universitario. Muchas de ellas coinciden en definir al profesor universitario como aquel que es especialista al más alto nivel en su área de conocimiento y al mismo tiempo es un profesional de la docencia. O dicho de otra manera, la labor docente tiene por objeto poner en contacto dos elementos complejos: el objeto de estudio, que fuerza al docente a reflexionar sobre la naturaleza de la ciencia a impartir, y los estudiantes, cuya diversidad de capacidades, preparación e intereses motiva la reflexión sobre la definición de un modelo o método racional de enseñanza. Esta doble faceta implica formación, experiencia y profesionalidad tanto en el área de conocimiento de que se trate, como en las técnicas y métodos docentes.

La LOU reconoce que el profesor universitario es la piedra angular de la Universidad, el agente que amalgama la actividad universitaria en su totalidad, y sin ninguna duda,

el capital humano es la principal riqueza y fuerza de la Universidad. Por este motivo, junto a la libertad de investigación, la ley reconoce al profesor universitario la “libertad de cátedra, sin más límites que los establecidos en la Constitución y en las leyes y los derivados de la organización de las enseñanzas en sus Universidades” y “se reconoce y garantiza la libertad de investigación en el ámbito universitario” (Artículos 33 y 39 de la LOU, respectivamente).

No cabe duda de que el trabajo del profesor universitario es una labor compleja. Como se ha dicho antes, la labor docente tiene por objeto poner en contacto dos elementos complejos: el objeto de estudio, que fuerza al docente a reflexionar sobre la naturaleza de la ciencia a impartir, y los estudiantes, cuya diversidad de capacidades, preparación e intereses motiva la reflexión sobre la definición de un modelo o método racional de enseñanza [ZBN<sup>+</sup>18].

Ser especialista en su área de conocimiento implica conocer los contenidos, y poseer las destrezas y habilidades necesarias. Pero tal como están organizadas las áreas de conocimiento en la Universidad española, nos encontramos con que algunas de ellas, como es el caso del área de esta plaza, son áreas muy extensas y en continua expansión y evolución, por lo que llegar a ser especialista del área en toda su extensión es sencillamente imposible. La complejidad de un área de conocimiento lleva inevitablemente asociada su fragmentación y la consiguiente aparición de especialidades dentro del área.

En el contexto actual, podemos atrevernos a definir las características de un profesor universitario como sigue:

- Es un especialista en su área de conocimiento y en las materias que imparte.
- Compagina su tiempo entre las tareas de docencia, investigación, y gestión.
- Tiene empatía con los estudiantes, y es tolerante, abierto al diálogo, y justo.
- Es creativo, y posee curiosidad intelectual.
- Sabe comunicar. Entiende que todo su conocimiento tiene valor cero si es incapaz de sacarlo al exterior y transmitirlo.
- Sabe motivar, haciendo que el alumno vea más allá del siguiente examen.

Por tanto, dominar la materia a impartir es necesario, pero no es suficiente para ser un buen profesor universitario. Este ha de saber además transmitir, motivar al alumno no solo a que aprenda, sino a que tenga interés por aprender. En este aspecto me viene a la cabeza la cita de Albert Einstein con la que abro este Proyecto Docente: *“I never teach my students. I only attempt to provide the conditions in which they can learn”*.

### **Retos de la profesión docente**

Los retos que se presentan en la profesión docente en la Universidad del siglo XXI son principalmente tres [Cru03]:

- El proceso educativo consiste en la transmisión, búsqueda y construcción crítica del conocimiento para conseguir que el alumno aprenda. Pero no basta con que el alumno aprenda los contenidos de las asignaturas, además tiene que aprender

a aprender, a tener autonomía personal, a tener pensamiento crítico y a saber trabajar en equipo.

- La profesión docente, como muchas otras, se fundamenta en unos principios científicos, técnicos y éticos. El nuevo rol del profesor es facilitar el aprendizaje y la formación integral de los alumnos, para conseguir una madurez profesional y personal.
- El enfoque colaborativo y cooperativo de la profesión docente, abandonando el enfoque individualista que imperaba hasta la actualidad. El símil más inmediato es el de la investigación: no investigamos solos, investigamos en grupos o equipos, porque en ellos logramos modos de trabajo más eficaces, poderosos y enriquecedores. Junto a esto aparecen los conceptos de interdisciplinaridad y multidisciplinaridad del conocimiento.

### 2.3.3. El catedrático

Formalmente, el catedrático es un profesor e investigador que ha pasado una serie de requisitos para alcanzar dicho puesto, el más alto en el escalafón docente de una universidad. Pero más allá de esta definición, cabe preguntarse qué supone realmente ser catedrático, haber alcanzado este último escalón en la jerarquía universitaria.

Uno de los requisitos obligatorios es haber logrado la acreditación del currículo por parte de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación. Se podría discutir eternamente sobre los criterios para conseguir dicha acreditación (endurecidos recientemente), o sobre si realmente es correcto conseguirla basándose únicamente en unos números del CV, sin una entrevista personal. Pero sí me atrevo a establecer unas pautas y características comunes que, al menos idealmente, deberían compartir todos los catedráticos de universidad:

- Un catedrático es un docente, investigador y gestor, que ha desarrollado y madurado una serie de capacidades que le permiten liderar y tomar decisiones informadas y razonadas en los tres ámbitos.
- Durante su carrera universitaria ha demostrado interés y curiosidad hacia la ciencia, tecnología, cultura y sociedad, y ha hecho aportaciones significativas.
- Un catedrático es generoso, y sabe canalizar este interés para el beneficio de otros, generalmente alumnos a su cargo, o compañeros de profesión en fases menos avanzadas de su carrera.
- Un catedrático sabe que una de sus obligaciones principales es intentar formar a los alumnos lo mejor posible, incluso más allá de los contenidos específicos de la materia impartida o de la investigación desarrollada, dedicándoles trabajo y esfuerzo, y dándoles todo su apoyo.
- Un catedrático aspira a la excelencia, y entiende que ser catedrático no es un fin; al contrario, siempre hay una meta más, un nuevo reto, un problema en el que merece la pena invertir el tiempo.
- Un catedrático tiene la experiencia para saber convencer, pero también para saber ser convencido. Escucha otras ideas y las valora, sin preconcepciones y sin pretender

establecer jerarquía.

La imagen del catedrático en la sociedad siempre ha sido buena, asociándola a una persona experta, sabia; un líder en su campo de trabajo, alguien a quien merece la pena escuchar. Aunque existe también (al menos en ciertos ámbitos, y posiblemente motivado por algún mal ejemplo) una imagen negativa del catedrático como una persona que todo lo dirige, todo lo ocupa, todo lo controla. Muy al contrario, como argumento en la lista del párrafo superior, una de las características ideales de un catedrático es su capacidad de ayudar a otros desde su experiencia.

## 2.4. Conclusiones

Tal y como se describe en [Ser03], dos notas definen los ideales de la universidad contemporánea: su carácter científico y su carácter crítico; ambas tienen como denominador común el ejercicio del rigor y de la racionalidad, y ambas se adquieren a través de una formación basada en la investigación sistemática, en el estudio, en la reflexión, en el trabajo en equipo, en el contraste de las teorías elaboradas o de los resultados de la investigación y en la orientación y transmisión de conocimientos por parte de los profesores e investigadores [Muñ18].

Como hemos visto, la investigación en la universidad española constituye una actividad relativamente reciente. Su incorporación ha seguido un proceso largo y discontinuo que se inicia a finales de la década de los sesenta con la organización de los primeros grupos de investigación y culmina con la aprobación en 1983 de la LRU y la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica de 1986, conocida como Ley de la Ciencia. La LRU estableció la doble dimensión de las universidades como centros docentes y como centros de investigación. Desde entonces la investigación se reconoce como actividad básica del personal universitario, que se organiza en los departamentos y que se rige por criterios de calidad investigadora [Gar06].

Esta garantía de calidad en su labor docente e investigadora ha de ser motor de la eficacia y el prestigio de la Universidad. A las universidades les ha correspondido la tarea fundamental de conducir hacia las empresas y otras entidades institucionales, y hacia el conjunto de la sociedad, el elemento más valioso de todo el sistema de producción del conocimiento: individuos bien formados y con capacidad de continuar por sí mismos su propia formación, y de orientarla hacia la creación. Entre las transformaciones radicales que convienen a la institución universitaria se encuentra la sustitución de los viejos métodos de enseñanza, principalmente reactivos, por los nuevos sistemas de aprendizaje con métodos proactivos y la participación esencial del estudiante en el diseño de su currículo [Á102].

Buscar la máxima calidad y aspirar a la excelencia son objetivos clave para garantizar el futuro de la Universidad. A su vez, la sociedad tiene derecho a exigir eficacia a su Universidad, en su labor docente y formativa, en su labor investigadora y de innovación, y en su labor cultural.

### 2.4.1. Agradecimientos

Me gustaría terminar este capítulo agradeciendo explícitamente a mis compañeros Francisco Serón, Adolfo Muñoz y Josechu Guerrero, que amablemente me cedieron sus proyectos docente e investigador; siempre es difícil saber por dónde empezar, y contar con tres ejemplos me ha supuesto una gran ayuda. También quiero agradecer las conversaciones, consejos e ideas a Adolfo Muñoz y Belén Masiá, que me han ayudado a orientar mejor este proyecto docente.

### 3.1. La Universidad de Zaragoza; reseña histórica

La Universidad de Zaragoza tiene su origen en un estudio de artes, creado por la Iglesia en el siglo XII, donde se enseñaban Gramática y Filosofía, y que concedía títulos de bachiller. En 1474 el Papa Sixto IV la elevó a la categoría de *Universitas Magistrorum*, al estilo de la Universidad de París, a solicitud del príncipe Fernando el Católico, entonces rey de Sicilia. La disposición fue ratificada por el mismo Papa dos años más tarde, y por el rey Juan II de Aragón en 1477.

El 10 de septiembre de 1542, el emperador Carlos V, a instancia de los síndicos de Zaragoza, firmaba en las Cortes de Aragón, reunidas en Monzón, un privilegio que elevaba aquel estudio de artes al rango de «Universidad general de todas las ciencias». En 1554 una bula del papa Julio III aprobó esta fundación del «Studium Generale», que fue confirmada por Paulo IV en 1555. Por ello, la Universidad de Zaragoza es la única de las españolas que lleva en su sello la imagen de San Pedro. En noviembre de 1582 Pedro Cerbuna, prior de la catedral de San Salvador de Zaragoza y más tarde obispo de Tarazona, aportó los medios económicos necesarios para abrir la nueva universidad, que se inauguró el 24 de mayo de 1583.

Contaba con las facultades de Teología, Cánones, Leyes, Medicina y Artes. Después de un periodo relativamente brillante, la vida de la Universidad de Zaragoza entró en decadencia a lo largo del siglo XVIII, en que fue incapaz de incorporar nuevos estudios (como los de Matemáticas, Botánica o Economía Política) para los que otras instituciones hubieron de crear cátedras.

Cuando en 1807 fueron suprimidas varias universidades, la de Zaragoza se mantuvo, recibiendo unos estatutos ajustados al modelo de la de Salamanca. En 1845 las facultades se redujeron a las de Filosofía, Jurisprudencia y Teología. En los años siguientes tuvo lugar una reorganización, desapareciendo esta última, recuperándose la de Medicina y creándose la de Ciencias. En los años inmediatamente posteriores a la Primera Guerra Mundial la Universidad vivió un proceso de profunda renovación y de adaptación a las nuevas necesidades del país.

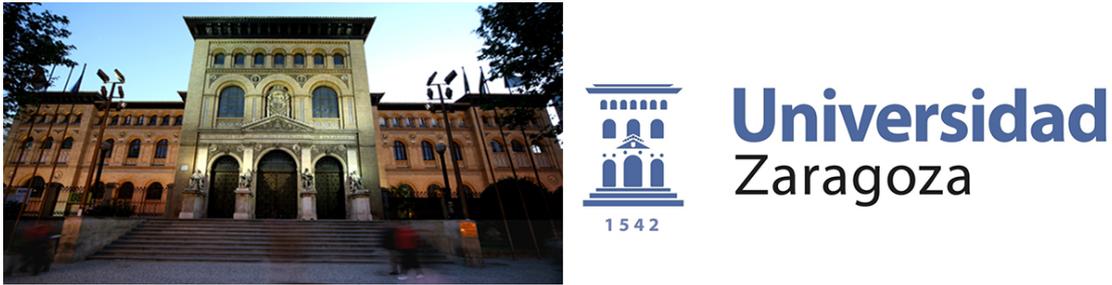


Figura 3.1: Paraninfo de la Universidad de Zaragoza, representado de manera estilizada en el logotipo de la misma.

En 1921 aprobó unos Estatutos autónomos y comenzó a impartir el Doctorado (desde 1845 limitado a la Universidad Central de Madrid), realizando una intensa actividad de difusión y creando en 1927 los Cursos de Verano de Jaca (los primeros de España), destinados a la difusión del español.

A comienzos de los años setenta, la Universidad de Zaragoza incorporó a sus enseñanzas las diplomaturas e ingenierías técnicas y creó colegios universitarios en algunas capitales de provincia de su distrito (en Huesca, Logroño, Soria y Teruel), así como nuevas facultades, que ampliaron notablemente el número de sus profesores y estudiantes y el número de titulaciones impartidas. Desde que a mediados de los años ochenta se recuperó la autonomía universitaria, se produjo una adaptación del ámbito de la Universidad al de la Comunidad Autónoma de Aragón (separándose los centros de La Rioja, Navarra y Soria), aprobándose unos Estatutos en 1985, e iniciando un proceso de descentralización que ha llevado a la creación de facultades en las ciudades de Huesca y Teruel, y a un fuerte crecimiento del número de estudiantes en ambas.

Esta pequeña reseña histórica ha sido extraída a partir de la información existente en la web de la Universidad de Zaragoza [[Uni18](#)].

### 3.1.1. La Universidad de Zaragoza hoy

La Universidad de Zaragoza tiene sus centros distribuidos entre las tres provincias que forman la Comunidad Autónoma Aragonesa de la siguiente manera:

- Campus de Huesca
- Residencia Universitaria de Jaca
- Campus de Zaragoza
- Campus de Teruel

Hoy día, la Universidad de Zaragoza se encuentra entre las diez Universidades españolas más importantes si tenemos en cuenta tanto el número de estudiantes, de profesores, y personal de administración y servicios, como la oferta académica desplegada (enseñanzas de primer y segundo ciclo, programas de doctorado o títulos propios), o su actividad investigadora. La Universidad de Zaragoza, que cuenta con unos 35.000 alumnos y 3.500

profesores, constituye la institución aragonesa más importante en investigación y una de las grandes instituciones y empresas aragonesas en lo que hace a su capital humano y al volumen de recursos destinados a su actividad. En un estudio reciente realizado por el Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas (IVIE) sobre el impacto socioeconómico de la Universidad de Zaragoza, se ha estimado que devuelve a la sociedad en forma de impuestos adicionales 2,63 euros por cada euro que la administración pública destina a su financiación. En cuanto a la contribución al crecimiento económico y al aumento de la renta per cápita, el citado informe concluye que la Universidad de Zaragoza es responsable de un 21 % del crecimiento total medio del PIB regional de los dos últimos decenios, estimándose que sin la contribución acumulada de la Universidad de Zaragoza en estas dos décadas, la renta per cápita de Aragón sería un 22,8 % menor [Gue17].

### 3.2. La Escuela de Ingeniería y Arquitectura

La actual Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA) se origina a partir de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Zaragoza, fundada en 1974. Inicialmente se impartían en ese centro, dentro de la Ingeniería Industrial, las especialidades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica. El resto de la sección presenta un breve resumen de su evolución [adC06, ZBN<sup>+</sup>18, Muñ18].

A partir del 84 se implanta un nuevo plan de estudios de seis años de duración planteando dos primeros cursos de formación común, dos cursos de especialidad eléctrica o mecánica y dos cursos finales de intensificación dentro de cada especialidad. Manteniendo las citadas especialidades, implementa intensificaciones en Diseño de Máquinas, Construcciones Industriales y Calor y Fluidos (especialidad mecánica), además de Electrotecnia y Electrónica e Informática y Control (especialidad eléctrica).

En el verano de 1986 la ETSII se trasladó al polígono ACTUR, en las proximidades de Juslibol, a un edificio de nueva planta con 28.000 metros cuadrados de superficie útil, previsto para dar servicio a 1.500 alumnos. Esta circunstancia de traslado coincide con el despegue de la actividad de I+D y de cooperación con empresas de los departamentos del centro, y con un fuerte incremento de la demanda de los estudios de Ingeniero Industrial, que era entonces la única ingeniería superior en Aragón.

En agosto de 1989 se produce la transformación de la ETSII en un Centro Politécnico Superior. Los objetivos globales perseguidos en esa transformación fueron los de consolidar y ampliar el único centro técnico superior de la Universidad de Zaragoza, dotándolo de una estructura integrada capaz de atender diversos currícula, de forma que se evitase la fuga de estudiantes de carreras técnicas a otras universidades, se generase investigación en un ámbito pluridisciplinar, y se actuase como catalizador del desarrollo industrial del entorno. Así se incorporan la Ingeniería de Telecomunicaciones en el curso 90/91, la Ingeniería Informática en el curso 92/93 y la Ingeniería Química en el curso 94/95.

A finales de la primavera del año 2009, se impulsó el proceso de integración del Centro Politécnico Superior (CPS) y la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial (EUITI), creando así la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA), un nuevo centro

para impartir los estudios de ingeniería y arquitectura en el Campus Río Ebro. En la actualidad, con sus aproximadamente 6.000 alumnos matriculados y 650 profesores, cuenta con una amplia dotación de medios materiales, entre los que destaca una gran cantidad de laboratorios y talleres, tanto propios como financiados por empresas.

Además, se llevan a cabo una gran cantidad de proyectos de Investigación y Desarrollo, a través de todos sus departamentos, así como mediante los institutos, laboratorios y fundaciones que tienen su sede en ella. En el entorno de la EINA conviven otros organismos relacionados con la tecnología y el mundo empresarial, como el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA), el Centro Europeo de Empresas e Innovación (CEEI), el Instituto de Carboquímica (ICB), el Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos (BIFI), el Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), el Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), el Instituto de Investigación en Nanociencia de Aragón (INA), el Laboratorio de Investigación en Tecnologías de la Combustión (LITEC) y la Fundación CIRCE, Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos.

### **3.3. El Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas**

Los Departamentos constituyen las unidades fundamentales de enseñanza e investigación de la Universidad, gozan de autonomía en la gestión y utilización de sus recursos personales y materiales, y a ellos corresponde articular, organizar y desarrollar la investigación y las enseñanzas de sus áreas de conocimiento en los diferentes centros. Entre sus funciones destacan:

- Confección de programas e impartición de la docencia en las áreas de conocimiento de su competencia con la coordinación de los centros involucrados.
- Programación y realización de actividades de investigación.
- Planificación e impartición de cursos de especialización, perfeccionamiento y actualización de los contenidos científicos de los titulados universitarios y de sus propios miembros.
- Promoción de la participación y el asesoramiento en trabajos de carácter científico, técnico o artístico.
- Programación e impartición de los cursos de doctorado, así como coordinación de la elaboración y dirección de Tesis Doctorales.
- Fomento de los programas de enseñanza e investigación interdisciplinares e interdepartamentales.
- Organización y realización de investigaciones acordadas mediante contratos suscritos con personas físicas, entidades públicas o privadas, nacionales o extranjeras.

El Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas tiene sus orígenes en 1987, año en que la Universidad de Zaragoza transforma su organización interna de Cátedras

a Departamentos, constituyéndose entre otros, el de Ingeniería Eléctrica e Informática, formado por las siguientes áreas de conocimiento: Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática, Ingeniería Electrónica, Lenguajes y Sistemas Informáticos, y Tecnología Electrónica.

Entre los años 1987 y 1993 se incorporaron las siguientes nuevas áreas de conocimiento: Arquitectura y Tecnología de Computadores, Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Ingeniería Telemática y Teoría de la Señal y Comunicaciones. Debido al importante aumento del número de áreas y a la implantación de los nuevos planes de estudio (Ingeniería de Telecomunicación e Ingeniería Informática), se solicitó en el año 1992 la división del departamento. Este proceso concluyó el 11 de abril de 1995, tras haber aprobado la Junta de Gobierno de la Universidad de Zaragoza la división del Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática en los Departamentos de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicaciones, e Informática e Ingeniería de Sistemas (DIIS).

Actualmente el DIIS está dividido en cuatro Áreas de Conocimiento:

- Arquitectura y Tecnología de Computadoras (ATC)
- Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial (CCIA)
- Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA)
- Lenguajes y Sistemas Informáticos (LSI)

El DIIS está presente en los centros:

- Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Zaragoza (EINA).
- Escuela Politécnica Superior, Huesca (EPSH).
- Escuela Universitaria de Estudios Empresariales, Huesca (EUEEH).
- Escuela Universitaria de Estudios Empresariales, Zaragoza (EUEEZ).
- Facultad de Ciencias Sociales y del Trabajo, Zaragoza (FCSTZ).
- Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, Teruel (EUPT).
- Facultad de Ciencias, Zaragoza (FC).
- Facultad de Ciencias de la Salud y el Deporte (FCSDH).
- Facultad de Educación, Zaragoza (FEZ).
- Facultad de Ciencias Sociales y Humanas, Teruel (FHCS).
- Facultad de Ciencias de la Salud y el Deporte, Huesca (FCCSD).

Además el DIIS es responsable de un programa de doctorado en “Ingeniería de Sistemas e Informática” que obtuvo la Mención de Calidad por el Ministerio de Educación y Ciencia en la resolución de fecha 28 de mayo de 2003 (referencia MCD2003-00466).



## 4.1. Introducción

En este capítulo repasamos el contexto curricular de esta memoria docente. Primero presentamos brevemente el *Computing Curricula 2001*, que introdujo como nueva área de conocimiento la Informática Gráfica y la Visualización (centrales para la temática de este proyecto docente). Después describimos las titulaciones dentro del marco del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), incluyendo las competencias, habilidades, y las guías docentes. Por último, describimos las enseñanzas de Grado, Máster, y Doctorado, con especial hincapié en el Grado en Ingeniería Informática. Quizá el mayor cambio en el nuevo contexto curricular es el hecho de que el alumno universitario debe ser capaz ahora de dirigir y participar activamente en su propio aprendizaje. La figura del profesor, tras la incorporación del EEES, deja de ser la del maestro clásico, para convertirse en un facilitador del aprendizaje.

## 4.2. *Computing Curricula 2001*

El *Computing Curricula 2001 Project* (CC2001), realizado conjuntamente por la *Computer Society of the Institute for Electrical and Electronic Engineers* (IEEE-CS) y la *Association for Computing Machinery* (ACM), tenía como objetivo ser un recurso y una guía curricular para aquellas escuelas y universidades que pretendan desarrollar o mejorar los programas de primer y segundo ciclo relacionados con la Informática. En 1998 un comité conjunto, formado por encargo de las sociedades IEEE-CS y ACM, recibió el encargo de revisar los documentos curriculares de 1991 relativos a Informática, y desarrollar una nueva versión, que tuviera en cuenta los últimos avances en las tecnologías informáticas y cuya validez previsible cubriera la próxima década. El resultado fue un conjunto de seis informes [For06a].

El 15 de Diciembre de 2001, se presentó el informe final de la disciplina informática denominada *Computer Science* [For06b], que es la que está directamente relacionada con el contexto curricular de este proyecto docente. Uno de los principales problemas

detectados en la evaluación del informe CC1991 es que este se articulaba entorno a la definición de un conjunto de áreas y unidades de conocimiento en las que se organizaban los contenidos, mientras que se ofrecían muy pocos detalles sobre la descripción de los posibles cursos, es decir, sobre las posibles implementaciones finales del informe. Para resolver este problema y ofrecer mayor apoyo en el diseño de los currícula, el informe CC2001 propuso varias alternativas para la organización de las unidades de conocimiento en cursos coherentes.

La propuesta final del *Computing Curricula 2001* definió 14 áreas de conocimiento frente a las 9 del informe anterior *Computing Curricula 1991* [CGR02]:

- Matemática discreta
- Fundamentos de programación
- Algoritmos y complejidad
- Arquitectura y organización
- Sistemas operativos
- Computación en redes
- Lenguajes de programación
- Interacción persona/ordenador
- Informática gráfica y visualización
- Sistemas inteligentes
- Gestión de la información
- Aspectos sociales y profesionales
- Ingeniería del software
- Informática para la Ciencia

Uno de los cambios más sustanciales entre ambos informes fue la aparición de nuevas áreas de conocimiento, como la Informática Gráfica y Visualización, en respuesta a la relevancia que habían cobrado estos temas en los últimos años. Esta continúa presente en sucesivas revisiones, como *Computing Curricula 2005*.

### 4.3. Las titulaciones en el modelo europeo

En esta sección resumimos la estructura de las enseñanzas y títulos oficiales universitarios en la actualidad. Las principales fuentes de información han sido [Gue17, BOE18].

La **Declaración de Bolonia** sentó las bases para la construcción de un Espacio Europeo de Educación Superior, organizado conforme a ciertos principios (calidad, movilidad, diversidad, competitividad) y orientado hacia la consecución entre otros de dos objetivos estratégicos: el incremento del empleo en la Unión Europea y la conversión del sistema Europeo de Formación Superior en un polo de atracción para estudiantes y profesores de otras partes del mundo.

La progresiva homogeneización de los sistemas universitarios asociado al EEES ha hecho necesario ordenar las enseñanzas universitarias oficiales. En España, esta ordenación se ha venido fraguando con idas y venidas, al menos, durante los últimos años. La

Ley Orgánica 6/2001, de 21 de diciembre, de Universidades, en su nueva redacción dada por la Ley Orgánica 4/2007, de 12 de abril, por la que se modifica la anterior, define la estructura de las enseñanzas universitarias en tres ciclos: Grado, Máster y Doctorado. En el Real Decreto 1393/2007 de 29 de octubre, con las modificaciones introducidas en el Real Decreto 861/2010, de 2 de julio se refleja la estructuración de las enseñanzas y títulos universitarios oficiales que permite reorientar el proceso de convergencia de nuestras enseñanzas universitarias con los principios de la construcción del Espacio Europeo de Educación Superior.

Un aspecto clave del Espacio Europeo de Educación Superior afecta a la estructura de las titulaciones, puesto que con las normativas nacionales es heterogénea y dificulta la comparabilidad. Para tratar de homogeneizar la situación, se establece un sistema basado en niveles o ciclos. En la Declaración de Bergen (2005) se destaca que: “La Educación Superior Europea se estructura alrededor de tres ciclos, donde cada nivel tiene la función de preparar al estudiante para el mercado laboral, para construir futuras competencias y para formarlo como ciudadano activo”.

Se han establecido dos ciclos principales: el Grado (primer ciclo) y el Máster (segundo ciclo), pero no se establece una norma general en cuanto a la duración de los ciclos se refiere (las estructuras más generalizadas son de tipo 3+2, 4+1 y 4+2). El Grado se obtendrá al acabar el primer ciclo y capacitará para el ejercicio profesional, mientras que el Máster se orientará o bien a formación específica en una determinada área para mejorar alguna capacidad profesional o bien a iniciar una carrera investigadora con el objetivo de obtener un Doctorado (tercer ciclo); en general, el acceso al Doctorado es directo tras completar los dos ciclos anteriores. Este sistema pretende permitir al egresado ingresar en el mercado laboral una vez realice el Grado y fomentar la formación continua a lo largo de toda la vida, compatibilizándola con el ejercicio profesional.

#### 4.3.1. El sistema europeo de créditos ECTS

La noción de crédito propugnada por la declaración de Bolonia y que está sirviendo de pieza básica en la armonización de las enseñanzas universitarias, tiene notables diferencias conceptuales con el concepto de crédito tradicional en el actual sistema universitario español, definido en función de las horas de docencia, teórica o práctica, impartidas por los profesores.

El sistema de créditos europeos, conocido como ECTS (European Credits Transfer System), nace y se desarrolla con los programas de movilidad de estudiantes como un sistema de equivalencias y de reconocimiento de los estudios cursados en otros países. La generalización de esta unidad de medida académica para todos los estudiantes es un objetivo fundamental para la creación del EEES, de forma que el trabajo desarrollado por un estudiante en cualquiera de las universidades de los estados miembros sea fácilmente reconocible en cuanto a nivel, calidad y relevancia.

El crédito europeo se define como la unidad de valoración de la actividad académica en la que se integran las enseñanzas teóricas y prácticas, así como otras actividades académicas dirigidas y el volumen de trabajo que el estudiante debe realizar para alcanzar los objetivos educativos. No es una medida de duración temporal de las clases impartidas

por el profesor, sino una unidad de valoración del volumen de trabajo total del alumno, expresado en horas, que incluye tanto las clases, teóricas o prácticas, como el esfuerzo dedicado al estudio y a la preparación y realización de exámenes. Como se ve, se distingue entre *enseñanza* (centrada en el profesor, en su capacidad de transmitir conceptos, en su dominio de la materia y en su preparación de las clases) y *aprendizaje* (centrado en el alumno, en su capacidad para asimilar y dominar los temas con capacidad crítica de análisis y síntesis).

El sistema ECTS establece en 60 créditos el volumen de trabajo total de un estudiante a tiempo completo durante un curso académico. Por lo tanto, un semestre equivale a 30 créditos. Considerando una actividad académica aproximada de 40 semanas/año y una carga de trabajo en torno a 40 horas/semana, se establece para el crédito europeo un volumen de trabajo entre 25 y 30 horas (1.500-1.800 horas de trabajo del estudiante/año).

Las programaciones de cada una de las materias que conformen el plan de estudios de una titulación oficial deben acogerse a esta unidad de medida integrando en la asignación de los créditos que a cada una le correspondan las clases docentes teóricas y prácticas, la preparación y realización de exámenes, horas de estudio que precisen, y los trabajos que los alumnos deban realizar para alcanzar los objetivos formativos de dichas materias. Asimismo, el reconocimiento de la labor docente de los profesores deberá incluir no solo las horas dedicadas a impartir su docencia, sino también las dedicadas a organizar, orientar y supervisar el trabajo de los alumnos.

### 4.3.2. Competencias y habilidades

Una de las aportaciones fundamentales del proceso de Bolonia es situar el concepto de competencias en el centro de la formación de los estudiantes universitarios y de educación superior. El aprendizaje se basa en competencias que reflejan la capacidad del estudiante para poner en práctica de manera integrada habilidades, conocimientos y actitudes para enfrentarse y poder resolver problemas y situaciones [Ae07]. Podemos aportar varias definiciones de competencia [Ber]:

- Capacidad de un buen desempeño en contextos complejos y auténticos. Se basa en la integración y activación de conocimientos, habilidades y destrezas, actitudes y valores (Universidad de Deusto).
- Capacidad de aplicar conocimientos, destrezas y actitudes al desempeño de la ocupación que se trate, incluyendo la capacidad de respuesta a problemas, imprevistos, la autonomía, la flexibilidad, la colaboración con el entorno profesional y con la organización del trabajo (RD 797/1995 Ministerio Trabajo y Seguridad Social que establece las directrices sobre certificados de profesionalidad).
- Un saber hacer complejo resultado de la integración, movilización y adecuación de capacidades y habilidades y de conocimientos (conocimientos, actitudes y habilidades), utilizados eficazmente en situaciones que tengan un carácter común [Las00].
- El conjunto de conocimientos y capacidades que permitan el ejercicio de la actividad profesional conforme a las exigencias de la producción y el empleo (Ley Org. 5/2002 de las Cualificaciones y de la Formación Profesional).

- Una combinación dinámica de atributos -con respecto al conocimiento y su aplicación, a las actitudes y a las responsabilidades- que describen los resultados del aprendizaje de un determinado programa, o cómo los estudiantes serán capaces de desenvolverse al finalizar el proceso educativo (Universidad de Navarra [dN07]).

De todas ellas podemos extraer la idea fundamental de que una competencia hace referencia a un [Ber]:

- Saber conceptual -aprender a conocer-. Competencia técnica/Conocimientos: aprender a comprender el mundo que nos rodea, desarrollando las capacidades profesionales pertinentes.
- Saber procedimental -aprender a hacer-. Competencia metodológica/Habilidades: poner en práctica los conocimientos adquiridos.
- Saber actitudinal -aprender a convivir-. Competencia social/Actitudes: potenciar proyectos colaborativos para que los diferentes participantes obtengan beneficio práctico del trabajo en común.
- Saber metacognitivo -aprender a ser-. Competencia personal/Actitudes: se debe tener pensamiento autónomo y crítico y comportarse con responsabilidad y equidad en la vida.

Se trata por tanto de conocer y comprender (conocimiento teórico de un campo académico), de saber cómo actuar (aplicación práctica y operativa del conocimiento) y de saber cómo ser (los valores como forma de percibir y vivir).

### 4.3.3. Las guías docentes

Con la incorporación del Espacio Europeo de Educación Superior a la enseñanza de la Informática en la Universidad de Zaragoza y la creación del Grado en Ingeniería Informática, se introdujeron las guías docentes [Par13] dentro de la metodología de planificación y coordinación de cada asignatura, en base a la totalidad del grado. En esta sección se recoge un resumen de las mismas, tal y como aparecen descritas en [Muñ18].

El objetivo es lograr la transparencia imprescindible para:

- Hacer posible la coordinación de la titulación.
- El aseguramiento y acreditación de la titulación.
- Permitir la autonomía del estudiante.

Por tanto, todas las asignaturas disponen de una guía docente. Para cada una de ellas, se incluye una serie de competencias de la asignatura que forman parte de la planificación global de la titulación, y que por tanto son inamovibles (salvo que la propia titulación sea modificada). Todas las guías docentes se corresponden con un modelo/formulario que debe ser rellenado. Las competencias vienen fijadas por la titulación, pero el resto está en blanco. El modelo de guía docente que se propone parte de la base de que las competencias indican unos resultados de aprendizaje específicos, y esos resultados de

aprendizaje específicos se alinean con el resto de la asignatura, tanto en la evaluación como en las actividades de enseñanza/aprendizaje.

Las guías docentes permiten al alumno conocer en poco tiempo para qué le va a servir una asignatura, va a tener una idea del contenido y de cómo va a ser evaluado. Una guía docente bien redactada informa al alumno de todo lo que necesita saber acerca de una asignatura, para comprender qué va a necesitar hacer, para motivarle, para decidir (o no) matricularse...

Además, obliga al profesor (o profesores) a planificar y acordar una serie de mínimos básicos en varios aspectos, de objetivos de la asignatura, método de evaluación, metodología... a grandes rasgos, la asignatura queda plenamente definida. Adicionalmente, la estructura de la guía docente obliga a hacer una planificación muy lógica: a partir de las competencias, se extraen unos resultados de aprendizaje, que llevan al método de evaluación, a partir de lo cual se puede desarrollar la metodología de trabajo. Al redactar y acordar la guía docente, todos los profesores en realidad están acordando a priori todo su contenido, lo cual ayuda a una mejor coordinación entre todos ellos. Además, como el contenido de la guía ha de cumplirse, esto provoca que cosas como el método de evaluación sean comunes e independientes de quién esté dando la asignatura.

## 4.4. Grado, Master y Doctorado

### 4.4.1. Grado

Las enseñanzas de Grado tienen como finalidad la obtención por parte del estudiante de una formación general, en una o varias disciplinas, orientada a la preparación para el ejercicio de actividades de carácter profesional. La superación de las enseñanzas previstas da derecho a la obtención del título de Graduado o Graduada, con la denominación específica que figure en el RUCT (Registro de Universidades, Centros y Títulos). Los planes de estudios de Grado tienen 240 créditos y contienen toda la formación teórica y práctica que el estudiante debe adquirir: aspectos básicos de la rama de conocimiento, materias obligatorias u optativas, seminarios, prácticas externas, trabajos dirigidos, trabajo de fin de Grado u otras actividades formativas. Estas enseñanzas concluyen con la defensa de un trabajo fin de Grado. El plan de estudios debe contener un mínimo de 60 créditos de formación básica, de los que, al menos, 36 estarán vinculados a algunas de las materias básicas para la rama de conocimiento a la que se pretenda adscribir el título.

Para el caso de Ingeniería y Arquitectura son: Empresa, Expresión Gráfica, Física, Informática, Matemáticas y Química. Estas materias deben concretarse en asignaturas con un mínimo de 6 créditos cada una y ser ofertadas en la primera mitad del plan de estudios. Los créditos restantes hasta 60, en su caso, deberán estar configurados por materias básicas que justifiquen el carácter básico para la formación. Cuando se trata de títulos que habilitan para el ejercicio de actividades profesionales reguladas en España, el Gobierno establece las condiciones a las que deben adecuarse los correspondientes planes de estudios, que además deben ajustarse a la normativa europea aplicable. Estos planes

de estudios deben diseñarse de forma que permitan obtener las competencias necesarias para ejercer esa profesión. A tales efectos la Universidad debe justificar la adecuación del plan de estudios a dichas condiciones.

#### 4.4.2. Máster

Las enseñanzas de Máster tienen como finalidad la adquisición por el estudiante de una formación avanzada, de carácter especializado o multidisciplinar, orientada a la especialización académica o profesional, o bien a promover la iniciación en tareas investigadoras.

Los planes de estudios conducentes a la obtención del título de Máster Universitario, son elaborados por las universidades y verificados de acuerdo con lo establecido. Tienen entre 60 y 120 créditos, y contienen toda la formación teórica y práctica que el estudiante debe adquirir: materias obligatorias, materias optativas, seminarios, prácticas externas, trabajos dirigidos, trabajo de fin de Máster y actividades de evaluación. Estas enseñanzas concluyen con la elaboración y defensa pública de un trabajo de fin de Máster, que tiene entre 6 y 30 créditos.

Para acceder a las enseñanzas oficiales de Máster es necesario estar en posesión de un título universitario oficial español u otro expedido por una institución de educación superior del Espacio Europeo de Educación Superior que facultan en el país expedidor del título para el acceso a enseñanzas de Máster. Si son de sistemas educativos ajenos al Espacio Europeo de Educación Superior, la Universidad debe comprobar que poseen un nivel de formación equivalente a los correspondientes títulos universitarios.

#### 4.4.3. Doctorado

Las enseñanzas de Doctorado tienen como finalidad la formación avanzada del estudiante en las técnicas y metodología de investigación. Pueden incorporar cursos, seminarios y otras actividades orientadas a la formación investigadora e incluyen la elaboración y presentación de la correspondiente tesis doctoral, consistente en un trabajo original de investigación. La superación de las enseñanzas previstas da derecho a la obtención del título de Doctor o Doctora.

Para obtener el título de Doctor o Doctora es necesario haber superado un periodo de formación y un periodo de investigación organizado. Al conjunto organizado de todas las actividades formativas y de investigación conducentes a la obtención del título se le denomina Programa de Doctorado. Para acceder al Programa de Doctorado en su periodo de formación, es necesario cumplir las mismas condiciones que para el acceso a las enseñanzas oficiales de Máster. Para acceder al Programa de Doctorado en su periodo de investigación es necesario estar en posesión de un título oficial de Máster Universitario, u otro del mismo nivel expedido por una institución de educación superior del Espacio Europeo de Educación Superior. Asimismo, pueden acceder quienes hayan superado 60 créditos incluidos en uno o varios Máster Universitarios, de acuerdo con la oferta de la Universidad, o quienes estén en posesión de un título de Graduado o Graduada cuya duración, conforme a normas de derecho comunitario sea de, al menos, 300 créditos.

El último Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado ha sido la culminación de la adaptación en España al EEES. Se incluye la previsión de que los tribunales encargados de evaluar las tesis doctorales deberán estar conformados en su mayoría por doctores externos a la Universidad y a las instituciones colaboradoras. También se recogen aspectos relativos a la protección de datos confidenciales y garantías de eventuales patentes de los trabajos de investigación y se establece la posibilidad de incluir en el título la mención de Doctor Internacional.

## 4.5. Grado de Ingeniería Informática

El estudio y la formación en los siguientes campos constituyen los pilares básicos sobre los que se construye la formación específica de un Ingeniero en Informática:

- Los dispositivos hardware que son el soporte físico de los sistemas informáticos.
- La programación de ordenadores, desde los fundamentos del diseño de algoritmos hasta el desarrollo de grandes proyectos software.
- Las bases de datos y los sistemas de información.
- Los sistemas operativos.
- Las redes de computadores y los sistemas informáticos distribuidos.

El estudiante alcanza un cierto grado de especialización en la recta final de los estudios, pudiendo elegir uno de los siguientes ámbitos para profundizar en su formación:

- Computación para quienes deseen reforzar su formación en algorítmica y programación con objeto de capacitarles para enfrentarse a problemas de diseño complejos en campos de aplicación tan diversos como los sistemas inteligentes, la bioingeniería, la robótica, la visión artificial, la informática gráfica, los videojuegos, etc.
- Ingeniería de Computadores para quienes estén especialmente interesados en el diseño, la puesta en marcha y la explotación de computadores, sistemas empuotrados, redes de computadores, centros de proceso de datos, etc.
- Ingeniería del Software para quienes estén especialmente interesados en participar en el desarrollo de grandes proyectos software.
- Sistemas de Información para quienes estén especialmente interesados en diseñar y administrar los sistemas de información que utilizan las organizaciones (empresas, administraciones y organismos públicos, etc.) para cumplir sus fines.
- Tecnologías de la Información para quienes estén especialmente interesados en seleccionar, integrar y organizar el funcionamiento de los equipos, sistemas, aplicaciones y procesos que requieren las organizaciones (empresas, administraciones y organismos públicos, etc.) para cumplir sus fines.

## 4.6. Conclusiones

Comenzando con un breve resumen del *Computing Curricula 2001*, se ha contextualizado el resto de este proyecto docente dentro del Espacio Europeo de Educación Superior

(EEES), describiendo la utilización de los créditos ECTS como medida temporal de la docencia, haciendo hincapié en el paso del concepto de enseñanza al de aprendizaje. También se han discutido los conceptos de competencias y habilidades y las guías docentes, para terminar describiendo las titulaciones de Grado, Master y Doctorado en la universidad española actual.

Una de las conclusiones más importantes de este capítulo es el hecho de que el alumno universitario debe ser capaz de dirigir y participar en su propio aprendizaje. La tarea del profesor, tras la incorporación del EEES, pasa a ser de maestro a facilitador del aprendizaje.



## 5.1. Introducción

Durante mi carrera universitaria, comenzando como becario de investigación en 1999, pasando a profesor asociado en 2001, colaborador en 2006, contratado doctor en 2007, y titular en 2008, he impartido clases en doce asignaturas distintas. Tres de ellas corresponden al antiguo conjunto de asignaturas que abarcaba la informática gráfica: Informática Gráfica, Modelado Geométrico, y Modelado Visual y Animación, ahora fusionadas en una sola en los nuevos planes de estudio: Informática Gráfica (obligatoria en Ingeniería Informática, especialidad de Computación).

La antigua asignatura de Informática Gráfica explicaba por qué y cómo se utiliza el computador para generar gráficos e imágenes sintéticas. Se pretendía ofrecer la formación básica necesaria para que el alumno pudiera conocer de forma profesional las posibilidades que ofrece hoy en día este campo. En Modelado Geométrico se explicaba cómo se describe matemática y algorítmicamente la información de la forma geométrica de cualquier tipo de objeto, ya sea natural o artificial, de cara a ser interpretada por un computador. Por último, la asignatura de Modelado Visual y Animación explicaba cómo se describe matemática y algorítmicamente la información de la apariencia visual de cualquier tipo de objeto de cara a ser interpretada por un computador. Aunque en un principio la asignatura de Modelado Visual y Animación englobaba aspectos tanto de los algoritmos de render de imágenes sintéticas hasta conceptos de animación, el peso que se daba a la primera parte (Modelado Visual) era mucho mayor que a la segunda (Animación). Idealmente un alumno cursaría las tres asignaturas de manera secuencial, aunque no había restricciones en cuanto a requisitos previos para ninguna.

Durante estos casi veinte años de docencia universitaria, siempre he impartido alguna asignatura de este campo; unido a mi actividades como investigador, la decisión de particularizar este proyecto docente en la nueva asignatura de Informática Gráfica (grado de Ingeniería Informática) parece obvia.

## 5.2. Consideraciones iniciales

La Informática Gráfica se puede definir como la Tecnología de la Información y de la Comunicación que utiliza el ordenador para crear, memorizar y manipular de forma automática, gráficos, imágenes reales e imágenes sintéticas. La tecnología de los gráficos por ordenador es, hoy por hoy, una de las ramas más atractivas; no en vano, las imágenes sintéticas no pertenecen solo al ámbito del cine y los videojuegos (industrias ya de por sí potencialmente atractivas para un estudiante de la rama de Computación), sino que están presentes en casi todos los ámbitos profesionales de una sociedad moderna: medicina, arquitectura, ingeniería...

La imagen sintética nace a principios de los años 60. Los gráficos y las imágenes generadas por ordenador inicialmente son fijas y bidimensionales, pero a través de la pléyade de científicos y técnicos que se dedican a esta rama del conocimiento, estas imágenes se animan muy pronto, adquieren la tercera dimensión, y finalmente son dotadas progresivamente de realismo (ver Figura 5.1). Utilizada primero para representar las formas de las cosas, pasa rápidamente a crear escenas de ficción o de fantasía; posteriormente la imagen sintética ha resultado ser un poderoso instrumento para reproducir los fenómenos naturales a partir de la visualización de los datos generados por simulaciones numéricas [Ser03].



Figura 5.1: Evolución de la informática gráfica. Izquierda: fotograma de la que es quizá la primera animación por ordenador ("Orbit", AT&T, 1963). Derecha: fotograma de una reciente película de animación ("Big Hero Six", Pixar, 2014).

Francisco Serón y yo fuimos los principales encargados de colapsar las tres asignaturas originales en una sola, lo cual no fue tarea sencilla. Ante la imposibilidad evidente de poder dar el mismo contenido en un tercio del tiempo, las primeras preguntas que nos hicimos fueron: ¿Intentamos mantener todo el espectro de temas, o eliminamos temas y nos centramos en unos pocos? ¿En cuáles? ¿Aprovechamos la oportunidad para dar un giro total a la asignatura y centrarla, por ejemplo, en Web3D, o algún otro estándar gráfico?

Tras sopesar pros y contras, al final tomamos la decisión de centrarla en aquello en lo que el grupo en general (y los profesores asignados en particular) tenían más

experiencia, y más posibilidades de aportar puntos de vista novedosos e interesantes. Esto correspondía sobre todo con la antigua asignatura de Modelado Visual, que se convertiría así en el bloque principal de la nueva asignatura de Informática Gráfica. Pero esta decisión basada en nuestra experiencia no hay que verla como una decisión cómoda; cualquiera de los profesores podría haberse adaptado perfectamente a cualquier otra decisión. Uno de los factores decisivos fue nuestra apuesta por crear una asignatura que, más allá de enseñar conceptos, motivara al alumno e incluso le abriera una serie de posibilidades quizá desconocidas para él, tanto en el mundo de la investigación como en el empresarial. La asignatura es de cuarto año; para muchos, el último semestre con asignaturas, antes de meterse de lleno con el Trabajo Fin de Grado. Es importante ofrecer opciones al alumno, y que sepa que está en situación de poder dedicarse a trabajos que en un principio, por desconocimiento, considera fuera de su alcance, tanto dentro como fuera de España.

Además, en la definición de Computación (*Computer Science*) por parte de la ACM (Association for Computing Machinery) se describen "desarrollos punteros", creación de nuevo conocimiento", "trabajos de programador llenos de desafíos", "nuevas formas de manejar los ordenadores"... para terminar con "*Computer Science* ofrece unos fundamentos exhaustivos que permiten al graduado adaptarse a nuevas tecnologías y nuevas ideas"(el texto original aparece al final de este capítulo). Parece claro por tanto que es preferible en este contexto ofrecer a los alumnos un enfoque lo más avanzado posible, teniendo en cuenta además la presencia de otras asignaturas en la especialidad con las que pueden aprender otros conceptos complementarios (ver Sección 5.3).

Además, dada la evolución del campo, se decidió abrir la puerta a la imagen computacional, no tanto para convertir a los alumnos en expertos en el tema, sino para ofrecerles una visión más completa y actualizada, incluyendo las dos caras de la moneda de campos que muchas veces van de la mano y se complementan el uno al otro. Hoy por hoy los algoritmos de generación de imágenes están bastante maduros y es cada vez más difícil hacer una aportación disruptiva; la informática gráfica en ese sentido se ha ido por tanto trasladando del dominio de los algoritmos al de la captura de datos que alimenten dichos algoritmos; dicho de otra manera, evitar obtener la solución correcta (algoritmos) al problema equivocado (datos). Tras unos años compartiendo la asignatura con Francisco Serón, en la actualidad la imparto con Adolfo Muñoz.

La adecuación de la elección de esta asignatura para el proyecto docente se justifica por los siguientes puntos:

- Aparece como uno de los tópicos técnicos recomendados desde el Computing Curricula.
- Es un área multidisciplinar.
- Se requiere el uso del lenguaje matemático.
- Se utiliza el método científico.
- Ofrece al alumno un estudio con detenimiento de una de las aplicaciones más impactantes del mundo de la Informática.
- Coincide con las actividades paralelas de investigación, desarrollo e innovación realizadas en el grupo del que soy miembro.

### 5.3. La especialidad de Computación

En la actualidad, se ofrecen cinco especialidades en la carrera de Ingeniería Informática:

- Ingeniería de Computadores.
- Ingeniería del Software.
- Sistemas de Información.
- Tecnologías de la Información.
- Computación.

Las cinco siguen la propuesta de la ACM. La asignatura de Informática Gráfica se enmarca dentro de la última, la especialidad de Computación. Basándonos en la definición de la ACM (ver Anexo al final de este capítulo), esta especialidad:

- Diseña y desarrolla software complejo que conlleva retos e innovación.
- Propone nuevas aplicaciones y contribuye al avance de la informática.
- Desarrolla nuevas soluciones.
- Desarrolla criterios críticos de eficiencia, fiabilidad y seguridad.

La Figura 5.2 muestra el mapa completo del Grado en Ingeniería Informática, con las asignaturas divididas por semestres. Como se ve, las asignaturas de la especialidad están repartidas en los tres últimos semestres. En Computación, las asignaturas de especialidad obligatorias son: Algoritmia Básica, Procesadores de Lenguajes, y Aprendizaje Automático en el sexto semestre, y Algoritmia para Problemas Difíciles, Recuperación de Información, e Informática Gráfica en el séptimo. Las optativas, ofertadas en el octavo semestre, son Bioinformática, Robótica, Videojuegos, y Visión por Computador.

La asignatura de Informática Gráfica tiene relación directa con la de Videojuegos. La existencia de esta asignatura también motivó la orientación de la de Informática Gráfica, para hacerlas no solo compatibles, sino complementarias. Mientras que en Informática Gráfica se ven técnicas de generación de imágenes *offline* (mediante simulación precisa de la física), Videojuegos se centra en tiempo real. Dentro de Informática Gráfica, en las primeras clases, se ofrecen conceptos generales del proceso de generación de una imagen sintética, que serán aprovechados por los estudiantes que decidan cursar la asignatura de Videojuegos (tales como descripciones de escenas), y otros que serán ampliados (tales como la rasterización o el pipeline gráfico). La asignatura de Videojuegos continúa luego centrándose en la GPU, su arquitectura, los framebuffer, y su uso para gráficos en tiempo real, algo no cubierto en Informática Gráfica. Es también reseñable el hecho de que ambos mundos, el render *offline* y el de tiempo real, se están acercando cada vez más; con el constante aumento de la capacidad de cálculo de los ordenadores, la madurez de los algoritmos de muestreo, la irrupción de técnicas de eliminación de ruido y de deep learning... la posibilidad de producir imágenes altamente fotorrealistas y físicamente correctas en tiempo real está cada más cerca (ver Figura 5.3). Quizá en un futuro no tan lejano, esta realidad obligue a un replanteamiento de ambas asignaturas.

GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA – 240 CRÉDITOS					
Cuatrimestre 1º			Cuatrimestre 2º		
Matemáticas 1	Matemáticas 2	Fund. Admón Empresas	Matemática Discreta	Estadística	Física y Electrónica
Introducción Computadores	Programación 1		Arq. y Org. Computad. 1	Programación 2	
Cuatrimestre 3º			Cuatrimestre 4º		
Teoría de la Computación	Estructuras de datos y algoritmos	Prog. de sist. concurrentes y distribuidos	Tecnología de la programación	Interacción persona ordenador	Bases de datos
Redes de computadores	Sistemas operativos		Arq. y Org. Computad. 2	Administración de sistemas	
Cuatrimestre 5º			Cuatrimestre 6º		
Ingeniería del software	Inteligencia artificial	Sistemas de información	Especialidad	Especialidad	Especialidad
Proyecto hardware	Sistemas distribuidos		Proyecto software	Optativa	
Cuatrimestre 7º			Cuatrimestre 8º		
Especialidad	Especialidad	Especialidad	Especialidad	Especialidad	Optativa
Seguridad informática	Optativa		Inglés – B1	Trabajo fin de grado	

Figura 5.2: Asignaturas del Grado en Ingeniería Informática.

Además, existe un creciente solapamiento en los campos de la Informática Gráfica y la Visión por Computador, donde cada más trabajos de un campo se apoyan en avances del otro (esto queda patente echando un vistazo a las actas recientes de los mejores congresos de ambos campos, como SIGGRAPH y CVPR, donde cada vez hay un mayor número de trabajos presentados en uno de ellos que podría haber tenido cabida en el otro). Este acercamiento entre dos disciplinas maduras (la Figura 5.4 muestra un ejemplo reciente [MBGS15]) se refleja por tanto en las asignaturas correspondientes de la especialidad, que sin presentar gran solapamiento, sí son altamente complementarias.

## 5.4. Orientación de la asignatura

Recordemos que el aprendizaje en la Universidad se caracteriza por los siguientes rasgos [Mar10]:

- Presupone el dominio de un conjunto de conocimientos, métodos y técnicas que deben de conducir al alumno a una progresiva autonomía en la adquisición de conocimientos.
- Debe llevar a la integración de los procesos de enseñanza-aprendizaje con la investigación, manteniendo entre ellos una articulación coherente. Ello implicará sustituir una enseñanza esencialmente transmisora por otra en la que se simulen, de forma gradual, los procesos de investigación. Esta integración entre investigación y ense-



Figura 5.3: Fotograma del corto *Reflections*, de *Unreal*, mostrando trazado de rayos de alta calidad (incluyendo profundidad de campo y reflejos) en tiempo real usando tecnología RTX sobre GPUs Volta (NVIDIA). Vídeo publicado el 21 de marzo de 2018. Desarrollado en colaboración con NVIDIA e ILMxLAB.

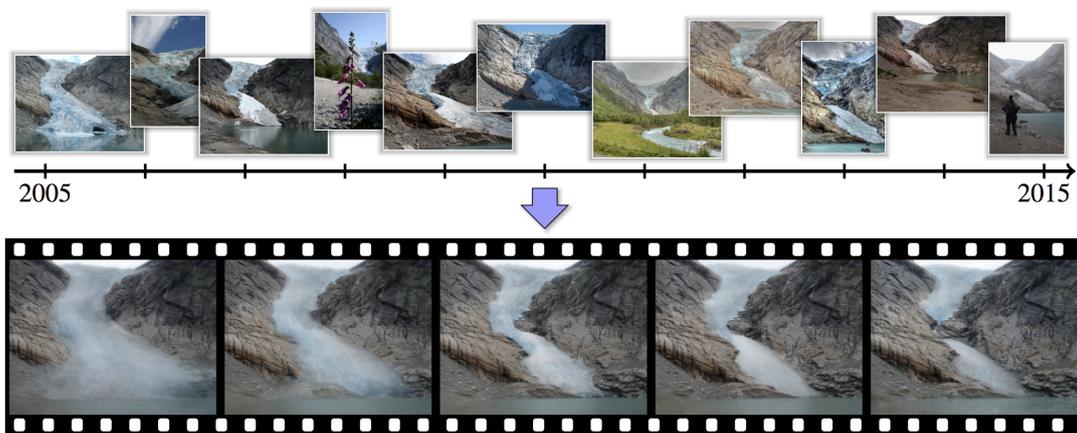


Figura 5.4: Imagen representativa de un trabajo presentado por Google, a caballo entre gráficos y visión, utilizando colecciones de fotos de internet para generar videos *time-lapse* de diferentes lugares del mundo a lo largo de los años [MBGS15].

ñanza implica una tarea difícilmente asumible si no es en equipo. El trabajo en el aula se convierte así en un proceso también de investigación.

Esto está muy presente en el diseño de la asignatura, que intenta estimular al alumno a aprender, no limitándose el profesor a enseñar una serie de conceptos basándose solo en clases magistrales. Esto es posible dado que dicha asignatura pertenece al séptimo semestre, con lo que los alumnos ya han desarrollado una cierta capacidad de extrapolar conocimientos, y una cierta autonomía. Primero se introducen una serie de conceptos básicos que permiten al alumno tener una visión global del campo (pipeline de visualización, modelado geométrico, aplicaciones...), para posteriormente centrarnos ya en la parte central: la apariencia visual.

Esta parte está basada en los dos algoritmos principales de generación de imágenes (render) en la actualidad: trazado de rayos, y photon mapping. Los estudiantes desarrollarán ambos sistemas tanto en las prácticas como en los trabajos obligatorios, a partir de un código base proporcionado. Al dar ambos métodos de manera continuada, el alumno obtiene además una comparación directa de las ventajas e inconvenientes de ambos (ej: ruido contra sesgo). Las últimas clases se utilizan para introducir el campo de la imagen computacional, a la vez que se presentan distintos temas avanzados (que varían de año a año) cuyo objetivo es dar una visión mucho más amplia del campo, más allá de lo que puede ser razonablemente cubierto en una asignatura. Estos últimos temas se presentan en forma de seminarios, están abiertos a todos los estudiantes y profesores del departamento, y pueden centrarse en algún artículo reciente presentado en SIGGRAPH, o contar incluso con ponentes invitados. Este enfoque ha resultado bastante exitoso, como demuestran las encuestas realizadas, las charlas con los alumnos, la calidad de muchos de los trabajos presentados, o el número de alumnos que cada año realizan el Trabajo Fin de Grado, prácticas en empresa, o incluso labores más avanzadas de investigación con nosotros.

Aunque las clases hasta ahora se han dado en español desde la fusión de las tres asignaturas originales en una sola, la mayoría del material proporcionado está en inglés; esto favorece la reusabilidad del material por parte de profesores y alumnos, y contribuye a la internacionalización y visibilidad de la Universidad de Zaragoza. La antigua asignatura de Modelado Visual fue impartida en inglés los últimos tres años, y es posible que Informática Gráfica también pase a ser impartida en inglés en un futuro próximo si los alumnos lo prefieren.

## 5.5. Descripción general

Esta asignatura presenta al alumno el área de la Informática Gráfica y la Imagen Computacional. La propuesta que se hace pretende ofrecer la formación básica necesaria para poder cubrir los aspectos relacionados con los estudiantes que: a) solo buscan conocer las posibilidades de esta área de conocimiento; b) Los que pretenden en su día desarrollar aplicaciones; y c) Los que investigarán nuevos algoritmos. Con los conocimientos adquiridos, se preparará al estudiante para industrias donde las imágenes sintéticas

jueguen un papel relevante, tales como la del entretenimiento o la visualización científica de datos, o para incorporarse a grupos de trabajo relacionados con la síntesis y análisis de la imagen sintética y la imagen real. Como recomendación para cursar la asignatura, el alumno ha de contar con conocimientos básicos de programación. El resumen en números de la asignatura es:

- Centro académico: Escuela de Ingeniería y Arquitectura.
- Titulación: Graduado en Ingeniería Informática.
- Créditos: 6.0.
- Curso: 4.
- Clase de asignatura: Obligatoria (especialidad Computación).

**Objetivos:** El objetivo de la asignatura es familiarizar al estudiante con el mundo de los gráficos generados por computador, tanto en su papel de conocimientos relacionados con el mundo de las Ciencias de la Computación, a la vez que como posible salida profesional. Se presentará el estado actual del mundo de la Informática Gráfica en el sentido ampliado, incluyendo el mundo de la Imagen Computacional. Durante el desarrollo de la asignatura se ejemplificará siempre desde un punto de vista que permita hablar tanto de investigación, como desarrollo, como innovación.

**Contexto y sentido de la asignatura en la titulación:** Cualquier persona que esté relacionada con una disciplina analítica o creativa, tanto si fabrica automóviles o naves espaciales, desarrolla teorías acerca del espacio intergaláctico o la materia subatómica, diseña recipientes o catálogos en color... para todos ellos, la habilidad para visualizar su trabajo es esencial. El mundo de la empresa, la industria, la ciencia, la educación, el arte, el entretenimiento, etc. han encontrado en la Informática Gráfica una gran aliada. De una manera más estructurada, los usuarios de los sistemas gráficos informatizados pueden dividirse en dos grandes grupos: a) Aquellos para quienes lo importante es la imagen en sí misma (los diseñadores, los directores de cine, los ilustradores...). En este caso la imagen es el producto; y b) Aquellos para quienes la imagen no es más que un medio para condensar y transmitir información (los científicos, los ingenieros o los analistas de empresas, por ejemplo). En este caso los usuarios encuentran en las imágenes un apoyo que permite la comprensión de relaciones complejas. Por todo ello no se puede ignorar la importancia a muchos niveles de este tipo de conocimientos informáticos, por lo cual el carácter de esta asignatura es importante tanto desde el punto de vista de las Ciencias de la Computación como de sus aplicaciones inmediatas.

**Competencias:** Al superar la asignatura, el estudiante será más competente para:

- Combinar los conocimientos generalistas y los especializados de ingeniería para generar propuestas innovadoras y competitivas en la actividad profesional.
- Resolver problemas y tomar decisiones con iniciativa, creatividad y razonamiento crítico.

- Desarrollar y evaluar sistemas (incluyendo sistemas interactivos y de presentación de información compleja) y su aplicación a la resolución de problemas de diversa índole.
- Conocer y desarrollar técnicas de aprendizaje computacional y diseñar e implementar aplicaciones y sistemas que las utilicen, incluyendo las dedicadas a extracción automática de información y conocimiento a partir de grandes volúmenes de datos.

**Resultados de aprendizaje:** El estudiante, para superar esta asignatura, deberá demostrar los siguientes resultados:

- Es capaz de diseñar y llevar a cabo visualizaciones de escenas bi- y tridimensionales y analizar los resultados.
- Es capaz de integrarse en un grupo de trabajo que requiera el desarrollo de aplicaciones gráficas.
- Es capaz de analizar las prestaciones de un determinado sistema gráfico y de evaluar las prestaciones de las herramientas disponibles para el diseño de visualizaciones.
- Tiene iniciativa: es resolutivo, sabe tomar decisiones y actuar para solucionar un problema.
- Es capaz de relacionar y estructurar información de varias fuentes, para integrar ideas y conocimientos.
- Es capaz de trabajar efectivamente en grupos pequeños de personas para la resolución de un problema de dificultad media.
- Tiene creatividad, así como apertura y curiosidad intelectual.
- Tiene capacidad de adaptación: Sabe cambiar para afrontar de forma activa nuevas situaciones derivadas de cambios organizativos o tecnológicos.

El conjunto de los resultados de aprendizaje se puede resumir diciendo que el alumno será capaz de enfrentarse al problema de entender, utilizar, diseñar e implementar un entorno de visualización de alta calidad de imagen. Todo ello jugando un papel concreto dentro de un equipo de trabajo multidisciplinar donde no todos los componentes serán ingenieros informáticos (también habrá físicos, matemáticos, artistas, diseñadores, etc.). Es precisamente este carácter multidisciplinar uno de los aspectos que constituyen el gran atractivo de esta asignatura para cualquier futuro ingeniero informático, se acabe dedicando o no profesionalmente al mundo de la Informática Gráfica.

**Actividades y recursos:** El proceso de aprendizaje que se ha diseñado para esta asignatura se basa en:

- La presentación de los contenidos de la asignatura por parte de los profesores.
- El desarrollo de los trabajos prácticos propuestos por parte de los alumnos, guiados por los profesores, que desarrollan los conocimientos teóricos.
- Presentación en grupo de los trabajos propuestos.

Se debe tener en cuenta que, aunque la asignatura tiene una orientación fundamentalmente práctica, es necesario adquirir los conocimientos teóricos previos. Por ello, el

proceso de aprendizaje pone énfasis tanto en los conceptos teóricos y en el estudio individualizado como en la realización de los ejercicios prácticos planteados.

El programa que se ofrece al estudiante para ayudarle a lograr los resultados previstos comprende las siguientes actividades:

- En las clases impartidas en el aula se desarrollará el programa de la asignatura.
- En las clases de problemas se resolverán las dudas que surjan en el desarrollo de los trabajos propuestos que estarán diseñados como aplicación de los conceptos y técnicas presentadas en el programa de la asignatura.
- Las sesiones de prácticas se desarrollarán en un laboratorio informático. En dichas sesiones el alumno podrá realizar los trabajos prácticos relacionados con la asignatura.

**Evaluación:** El estudiante deberá demostrar que ha alcanzado los resultados de aprendizaje previstos mediante las siguientes actividades de evaluación:

- Dos trabajos prácticos (2 x 25 = 50 %): Se realizarán trabajos que podrán ser en grupos de dos, y se llevará un seguimiento del progreso del aprendizaje de alumnos durante el cuatrimestre. Deberá entregarse un documento escrito con el trabajo realizado y realizar presentación pública del mismo. Se valorará el funcionamiento según especificaciones, la calidad de su diseño y su presentación, la adecuada aplicación de los métodos de resolución, así como la capacidad para explicar y justificar el trabajo realizado.
- Examen (50 %). Se valorarán los conocimientos de toda la asignatura, la capacidad de análisis, las respuestas a las preguntas planteadas y la capacidad de unir y asociar conceptos vistos en clase.

Los trabajos prácticos se centran en un trazador de rayos y un sistema de photon mapping. La calificación final se obtendrá mediante la media ponderada de los apartados anteriores. Hay que aprobar cada prueba por separado. En caso de no superar alguna de las pruebas la calificación máxima que puede obtenerse es de 4.5 puntos sobre 10.

## 5.6. Programa

Como se ha comentado, esta asignatura nace de la fusión obligada de las antiguas asignaturas que componían la materia de Informática Gráfica:

- Informática Gráfica.
- Modelado Geométrico.
- Modelado Visual y Animación.

Los temas que incluye el programa son:

- 1. Introducción a la Informática Gráfica.

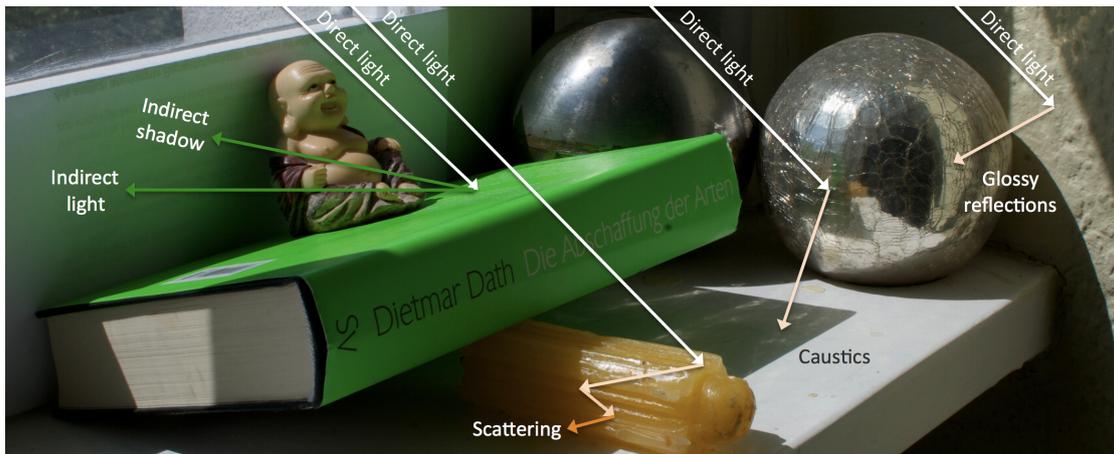


Figura 5.5: Fotografía de una escena con iluminación global [RDGK12].

- 2. Modelado Geométrico.
- 3. Iluminación.
- 4. Rasterización.
- 5. Trazado de rayos.
- 6. Monte Carlo.
- 7. Path tracing.
- 8. Texturas.
- 9. Iluminación global.
- 10. Photon mapping.
- 11. Scattering.
- 12. Introducción a la Imagen Computacional.
- 13. Otros seminarios.

Esta estructura está dividida informalmente en cuatro bloques: el **Bloque I: Introducción** lo componen los cuatro primeros temas; el **Bloque II. La Ecuación de Render** comprende los Temas 5, 6, 7 y 8. El **Bloque III: Iluminación Global** incluye los Temas 9, 10 y 11, mientras que el **Bloque IV: Imagen Computacional** lo forma exclusivamente el Tema 12. Los seminarios pueden considerarse un quinto bloque horizontal, impartido durante toda la asignatura de manera esporádica. La Figura 5.5 muestra un ejemplo del tipo de imagen motivacional mostrada a los alumnos durante las primeras clases, para que comprendan el ámbito y el alcance de la asignatura.

### 5.6.1. Bloque I: Introducción

En la parte de introducción se presentan los conceptos básicos de la generación de una imagen por ordenador. Se introduce el concepto de escena como el modelo básico sobre el que actuarán los algoritmos, y se plantea qué datos debería contener dicha escena para que un ordenador pueda generar una imagen a partir de ella: geometría, fuentes de luz,

materiales y (para el caso de escenas dinámicas) especificación del movimiento. Después nos centramos en el problema de la visualización esquemática de escenas tridimensionales sobre una pantalla bidimensional. Para ello se introducen las ideas de transformaciones en el espacio, su representación matricial, así como los problemas del recorte 3D y de la eliminación de superficies ocultas. La especificación geométrica se presenta en forma implícita y paramétrica, analizando pros y contras. La luz reflejada desde un punto de la superficie de un objeto se caracteriza por la función bidireccional de distribución de la reflectancia (BRDF). Esta función pone de manifiesto que la luz reflejada en una dirección particular depende de la dirección de entrada de la luz, de la dirección de observación del punto de la superficie y de la longitud de onda. A partir de este concepto básico, se anticipan tanto la ecuación de render como el concepto de apariencia visual de los materiales. Esta parte termina con el proceso de rasterización de una imagen, incluyendo el algoritmo de Bresenham para rellenar un triángulo, el concepto del z-buffer, y modelos básicos de iluminación y sombreado (Figura 5.6).

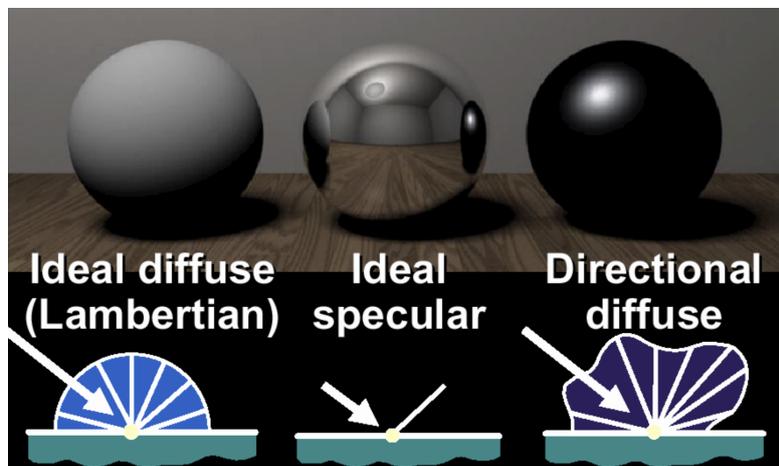


Figura 5.6: Distintos tipos de apariencia de materiales, utilizados para presentar el concepto de BRDF.

Además de la propia presentación de información, esta introducción tiene unos objetivos horizontales muy claros:

- Quitar el miedo a las matemáticas que algunos alumnos de Ingeniería Informática parecen tener, al no estar acostumbrados a ciertas expresiones de apariencia relativamente compleja como la ecuación de render.
- Hacerles ver que deben entender las ideas, no memorizar conceptos.
- Hacerles ver que las matemáticas son mucho más sencillas cuando pueden ser visualizadas.
- Introducirles en la cultura de leer otros trabajos para completar la información vista en clase.
- Conseguir esos momentos de fascinación cuando todas las piezas encajan y los conceptos *se entienden*.

Se les dan también ciertas pautas de programación para el resto del curso, como no exagerar el diseño y la generalidad de las soluciones propuestas, o no preocuparse en exceso de optimizar memoria u otros algoritmos<sup>1</sup>, ya que este tipo de diseños excesivos pueden entorpecer la consecución de los objetivos específicos de cada trabajo (esto queda reflejado en el chiste del informático al que se le pide el salero durante una comida...).

Para asentar los conceptos de este bloque, se propone además un trabajo voluntario de carácter práctico. Su implementación sirve además para guiar al alumno en el progreso de la asignatura, con el fin de asegurar una buena implementación de los trabajos obligatorios; de esta manera, un alumno que no haya entregado el trabajo voluntario en la fecha propuesta (23 de octubre en el último año) sabe que va retrasado conforme al avance ideal. Este trabajo, junto con el resto de trabajos propuestos a lo largo de la asignatura, aparecen descritos en la Sección 5.7.

### 5.6.2. Bloque II. La Ecuación de Render

El comienzo de este bloque propone una serie de fenómenos del transporte de luz difíciles de simular con lo aprendido hasta entonces, tales como interreflexiones difusas, cáusticas, etc. Esto sirve para motivar la necesidad de un enfoque distinto, a partir de una definición similar de la escena. Este enfoque es el trazado de rayos.

En 1986 Kajiya introdujo la ecuación general de transporte de la luz para un medio no participativo que encapsula la iluminación global de un punto sobre una superficie en una escena iluminada por un conjunto de luminarias [Kaj86]. A esa ecuación la denominó ecuación de render, aunque su nombre más adecuado sería ecuación de transporte de la radiancia en el vacío. La ecuación implica que el modelo de iluminación debe tener en cuenta:

- Un modelo de la luz emitida por una superficie.
- Una representación de la BRDF para cada superficie.
- Un método de evaluar la función de visibilidad.

A su vez, los aspectos más importantes que hay que considerar son:

- La complejidad de la integral, lo que significa que no se puede evaluar analíticamente; por ello normalmente se utilizan métodos de Monte Carlo.
- El resultado es dependiente de la situación del punto y la dirección de visualización.
- La ecuación es recursiva, ya que para conocer la luz que proviene de un punto de la escena y sale en una dirección, hay que calcular la luz que llega a ese punto de la escena desde el resto de los puntos de la misma.

Es importante que los alumnos vayan viendo no solo las soluciones progresivamente más complejas que se van planteando, sino su motivación y limitaciones, sus ventajas y sus inconvenientes. Se comienza por el trazado de rayos propuesto por Whitted [Whi80],

---

<sup>1</sup>Como dijo Donald Knuth, profesor emérito de Stanford y autor del libro *The Art of Computer Programming*: "Premature optimization is the source of all evil".

que traza la luz en la dirección inversa a la trayectoria seguida por los rayos de luz, es decir de ojo a fuente. Es un algoritmo dependiente del punto de vista y tiene en cuenta solo interacciones del tipo especular. El algoritmo normal de trazado de rayos funciona del modo siguiente: 1) Se sigue un rayo desde el ojo hacia la escena pasando a través de un píxel determinado del plano de visualización. 2) Se calculan todas las posibles intersecciones con los elementos de la escena y se selecciona la más cercana. 3) De cada punto de intersección con un objeto (por ejemplo transparente), pueden salir dos rayos: el reflejado y el transmitido, que deben seguirse de modo análogo al primer paso (proceso recursivo). Este proceso recursivo termina al intersectar con una superficie difusa, o alcanzar un nivel de recursión determinado, o al decaer la energía del rayo (radiancia) por debajo de un umbral.

Dado este carácter recursivo, se presentan métodos de aceleración para el cálculo de intersecciones (como las jerarquías de geometría), los rayos de sombra (clustering de luces...), el antialiasing (técnicas de antialiasing morfológico...) motivando la necesidad de las técnicas de Monte Carlo. Las técnicas de Monte Carlo se utilizan para estimar el valor de integrales sobre dominios complejos. Poseen la propiedad de que el error en la estimación es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de muestras utilizadas en la evaluación de cada variable de la integral. Para dividir por dos la estimación son necesarias cuatro veces el número de muestras, lo que se traduce en la necesidad de estrategias que intenten reducir la varianza (ruido). La estrategia más común para seleccionar las muestras es el muestreo por importancia, que tiende a seleccionar muestras en regiones importantes para el integrando. Ello implica un conocimiento previo de la función que se va a estimar, lo que puede parecer extraño de entrada. Lo que ocurre es que en el problema de la ecuación de transporte de la luz, el integrando está formado por el producto de dos funciones, una de las cuales, la función BRDF, es normalmente conocida. En general las muestras se distribuyen de manera que sus densidades son más altas en las regiones en las que la función tiene valores mayores o donde varía de forma más significativa y rápida (ver Figura 5.7). Se introduce también el algoritmo de la ruleta rusa (que será reutilizado más adelante en photon mapping) como nuevo criterio de parada, así como el concepto asociado de la cadena de Markov.

A continuación, una vez más, se desafía a los alumnos a pensar en qué fenómenos del transporte de luz (o desde otro punto de vista, de la toma de fotografías) no pueden ser simulados de manera eficiente con lo visto hasta entonces. Esto lleva a la presentación de los fenómenos de profundidad de campo, motion blur, cáusticas... Motivados por estas limitaciones, se pasa del concepto de rayo como unidad de medida en ray tracing, al de un camino (path) entero de la cámara a la fuente de luz, lo cual nos lleva al algoritmo de path tracing (ver Figura 5.8). Se pierde por tanto el concepto de rayo secundario utilizado en ray tracing para componentes indirectas, y se introducen la técnica de la estimación del siguiente evento (trazar rayos de sombra) para facilitar la localización de las fuentes de luz, así como path tracing bidireccional. Se motiva la importancia de esta familia de algoritmos con referencias a la industria del cine en la actualidad (ver Figura 5.9). Siempre que es posible, se ha contado con la participación en un seminario de Marcos Fajardo de SolidAngle (empresa ganadora de un Technical Achievement Award

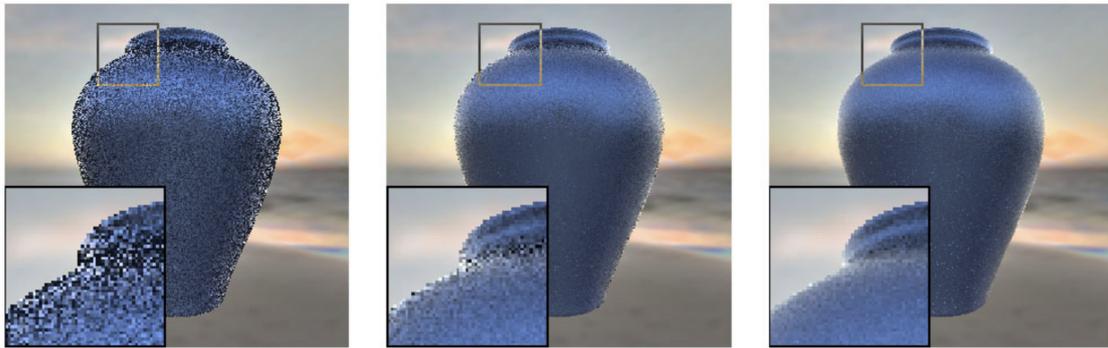


Figura 5.7: Resultado de un muestreo uniforme (izquierda) frente a dos técnicas de muestreo por importancia (centro y derecha), para un número igual de muestras.

en 2017); esto permite ofrecer a los alumnos una perspectiva distinta, a la vez que se dan cuenta de que los algoritmos que ellos mismos van a programar están siendo utilizados en la industria del cine de Hollywood.

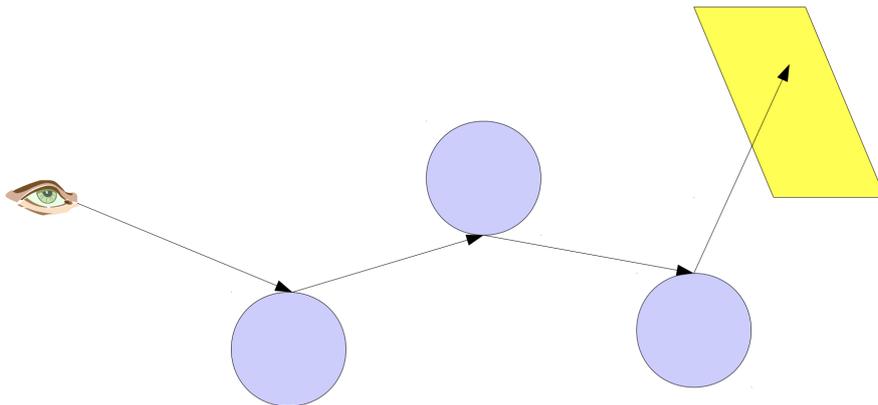


Figura 5.8: Esquema del algoritmo básico de path tracing, donde la unidad de medida pasa a ser el camino cámara-luz.

Por último, este bloque incluye las técnicas de texturizado, desarrolladas fundamentalmente durante la década de los 80 para aumentar la calidad de las imágenes. El desarrollo de estas técnicas coincidió en el tiempo con el desarrollo de los algoritmos de iluminación global denominados trazado de rayos y radiosidad (que se veía en la asignatura hasta el predominio del photon mapping). El significado de la palabra texturizar en el campo de la Informática Gráfica es el de modular el color de un punto de la superficie de un objeto, a través de los coeficientes del término de iluminación difusa, utilizando para ello un mapa de textura (normalmente bidimensional). Las propiedades de un modelo gráfico que pueden modularse utilizando las variaciones de un mapa de textura no se limitan al color, sino que incluyen otros aspectos como normales, transparencia, etc.



Figura 5.9: Fotograma de la película Gravity, renderizado completamente mediante la técnica de path tracing.

(ver Figura 5.10).

Para asentar los conceptos de este bloque, se propone además un segundo trabajo práctico de carácter voluntario sobre ray tracing (ver Sección 5.7). Al igual que el primero, este no es evaluado (aunque sí corregido y discutido con todo aquel que lo entregue); su implementación sirve para seguir guiando al alumno en el progreso de la asignatura. La fecha propuesta de entrega el año pasado fue el 13 de Noviembre. Además, en este bloque se introduce ya el primer trabajo obligatorio sobre path tracing (Sección 5.7). La fecha para entregarlo es un día antes del día del examen; sin embargo, se recomienda que esté terminado antes de las vacaciones de Navidad, para poder distribuir la carga del segundo trabajo obligatorio en las últimas semanas de manera más cómoda. Desde la implantación de las dos prácticas voluntarias hemos encontrado que la mayoría de los alumnos consiguen cumplir con esta recomendación, lo que a su vez se ha visto reflejado en un aumento de la calidad de los resultados conseguidos.

### 5.6.3. Bloque III: Iluminación Global

La principal novedad de este bloque es la transición del path tracing al algoritmo de photon mapping, como alternativa para poder calcular la aportación de ciertos caminos complejos del transporte de luz. Se hará especial hincapié en los medios participativos. Ya en 1997 Walter y sus coautores reconocieron la ventaja de separar el problema global del transporte de la luz de su representación [WHS97]. Primero se emiten partículas desde las fuentes de luz, que viajan por el entorno. Cada vez que encuentran una superficie, se almacenan los datos de la interacción. Posteriormente se calcula una nueva dirección de reflexión/transmisión en función de la BRDF de la superficie. El movimiento de una partícula termina después de que se han realizado un mínimo de interacciones o hasta que haya sido absorbida. De este modo una partícula genera una historia de interacciones.

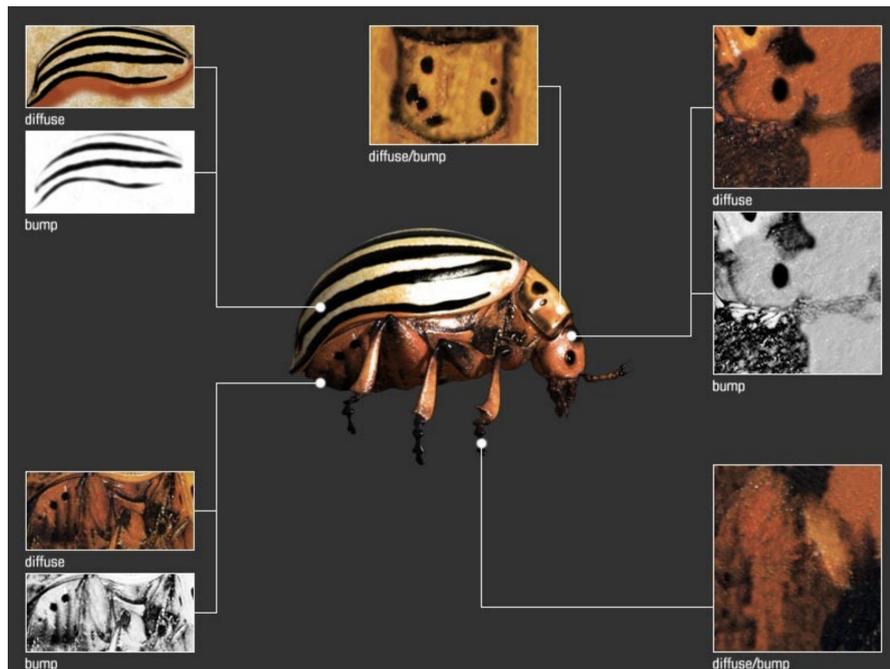


Figura 5.10: Distintos mapas de texturas y su resultado sobre un modelo geométrico.

Tras el trazado de todas las partículas, los puntos de interacción sobre las superficies se usan para construir la iluminación sobre la superficie en base a la densidad espacial de esos puntos (proceso de estimación de densidad).

Esta idea es central al algoritmo que presentó, en 1996, H.W. Jensen, al que denominó photon mapping [Jen96], y que pasa a convertirse en el centro de este bloque. La idea es, de nuevo, desacoplar la información de la luz de la geometría, guardándola en un mapa de fotones. A su vez, solamente las interacciones difusas (luz indirecta) son guardadas en dicho mapa; la contribución directa se calcula con trazado de rayos tradicional, añadiéndose a la solución indirecta (ver Figura 5.11).

Enseñar photon mapping permite introducir a los alumnos el compromiso clásico en iluminación global: varianza contra sesgo. Photon mapping elimina el ruido típico de Monte Carlo durante la estimación de luz indirecta por estimación de densidad, pero el precio a pagar es la introducción de sesgo en la solución final. Este tipo de compromisos son muy habituales en muchas ramas de la ciencia y la ingeniería; si no los hubiera, en este caso, uno de los dos algoritmos habría superado claramente al segundo<sup>2</sup>.

Durante la explicación del algoritmo básico de photon mapping, se hace especial hincapié en las similitudes (seguimiento de caminos, criterios de parada...) y diferencias (flujo de un fotón vs. radiancia de un rayo, estimación de radiancia...) con path tracing. A

<sup>2</sup>Con el impulso de la industria del cine, la madurez de los algoritmos, y las mejores prestaciones del hardware, parece que poco a poco el path tracing se va imponiendo, relegando a las técnicas basadas en photon mapping a situaciones cada vez más específicas del transporte del luz.



Figura 5.11: Izquierda: Representación de la información contenida en el mapa de fotones. Derecha: imagen final, tras la estimación de radiancia y añadiendo la luz directa por ray tracing.

continuación, se presentan los medios participativos, y se explica la problemática computacional que encierran. Se introducen por paralelismo los algoritmos de ray marching, para en seguida presentar una variación del algoritmo original de photon mapping que permite calcular estimaciones de radiancia volumétrica para la luz indirecta [GJJD09].

Por último, se presenta en este bloque el tema del subsurface scattering; la extensión de esta última parte es adaptable al ritmo que haya tenido la asignatura hasta el momento, pudiendo dedicarse dos clases enteras (tres horas), o hacer únicamente una mención y dar una intuición de cómo resolver el problema. El subsurface scattering explica la translucencia de algunos materiales como la piel, leche, hojas... La interacción de la luz con estos materiales ya no puede explicarse desde el punto de vista de una BRDF, que asume que la luz sale del mismo punto de incidencia sobre la superficie, sino que hay que introducir la nueva BSSRDF, que modela cómo la luz al incidir sobre la superficie penetra en ella, para salir por puntos distintos. Para ayudar a motivar al alumno, se utiliza el render de piel como hilo conductor del tema, explicando el progreso en la cada vez más realista apariencia de personajes digitales de las películas, como Golum de *El Señor de los Anillos* (Figura 5.13).

Con este bloque se presenta el segundo trabajo obligatorio, que consiste en la implementación del algoritmo de photon mapping (ver Sección 5.7). Los alumnos pueden escoger entre utilizar como base su path tracer del trabajo anterior, o un esqueleto de código que se les proporciona (escoger una opción u otra no influye de manera directa en la nota). Dado que a estas alturas de curso el alumno ya ha adquirido una madurez y soltura en los conceptos, este trabajo propone además una serie de tareas opcionales relativamente avanzadas, que requieren la lectura adicional de otros trabajos. Casi todos los alumnos intentan al menos una de las opciones, y varios acaban desarrollando una gran parte de ellas.

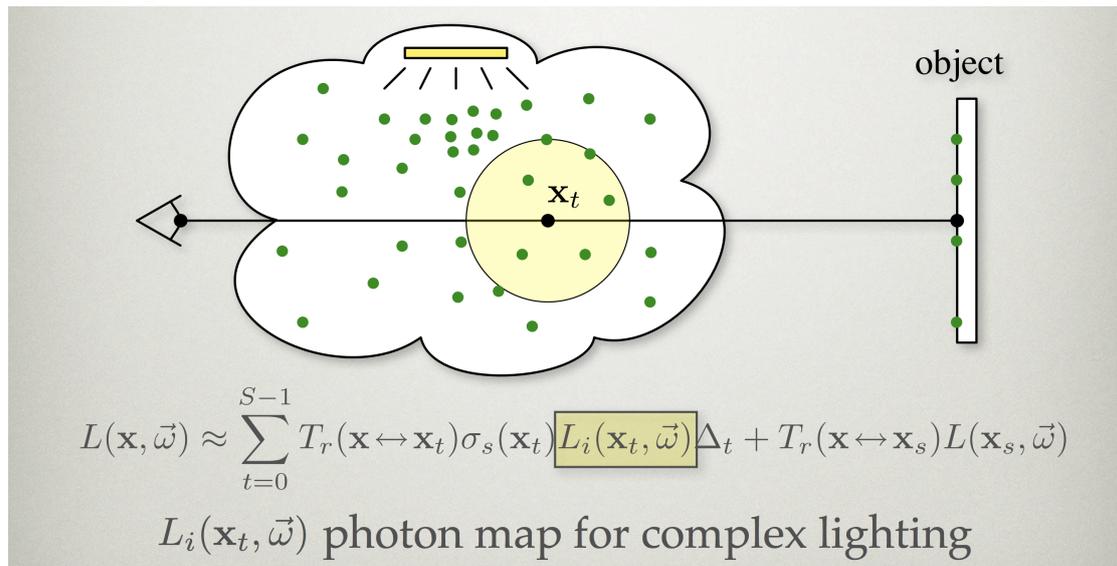


Figura 5.12: Estimación de radiancia en el photon mapping volumétrico [GJJD09].

#### 5.6.4. Bloque IV: Imagen Computacional

Este bloque no pretende profundizar en la materia, sino únicamente introducir el campo, motivar su existencia, y dar unas pinceladas a modo de ejemplo del tipo de cosas que pueden conseguirse mediante la imagen computacional. En los últimos años, el campo ha evolucionado enormemente, y se ha establecido como complementario a la informática gráfica, y es esa visión dual la que se pretende transmitir. Los contenidos presentados no entran en examen, y el trabajo es voluntario; las clases suelen darse después de las vacaciones de Navidad, antes de terminar el cuatrimestre. Aún así, todos los alumnos acuden a clase y muchos hacen los trabajos, lo cual es indicio del interés que despierta el bloque.

Gran parte de este interés viene motivado por la novedad del campo. Los alumnos de la especialidad por supuesto han oído hablar de informática gráfica y de visión por computador. Pero la imagen computacional es algo novedoso, un poco a caballo entre las dos, un poco ninguna de las dos, un poco computación, fotografía, electrónica, óptica.

Tras una introducción general al campo, los dos temas utilizados como ejemplos e hilo conductor del resto de charlas son la femtofotografía y las aperturas codificadas. Se escogen estos temas porque representan ejemplos canónicos de lo que es la imagen computacional: capturar información visual codificada, de manera que al decodificarla obtengamos más información que la que es posible obtener por medios convencionales. Además, corresponden con dos trabajos donde han participado directamente componentes del grupo [VWJ<sup>+</sup>13, MPCG12] (ver Figura 5.14)

La técnica de la femtofotografía permite capturar imágenes a una frecuencia efectiva de un billón de fotogramas por segundo. Esto es tan rápido que puede verse el avance de un frente de luz por una escena, y *observar incluso en escenas reales* todos los fenómenos



Figura 5.13: Los personajes digitales realistas de las películas deben su existencia, entre otros, al desarrollo de las técnicas de subsurface scattering.

que han estudiado en la asignatura como reflexiones, dispersión, subsurface scattering... La información es capturada en forma de *streak images*, que codifican el tiempo de llegada de cada fotón en la dimensión espacial  $y$  del sensor. Barriendo la escena a lo largo de dicha dimensión se logra reconstruir el cubo  $(x, y, t)$  que define un vídeo. Por su parte, las aperturas codificadas son máscaras que modifican la forma circular de las aperturas convencionales, cuyo comportamiento en el dominio de la frecuencia impide la recuperación de información fuera de foco. Estas máscaras codifican ópticamente la luz que llega al sensor, permitiendo decodificarla y recuperar zonas borrosas mucho mejor que con aperturas convencionales. Este segundo tema sirve de base para el trabajo voluntario de este bloque.

#### 5.6.5. Otros seminarios

A lo largo del cuatrimestre, se intenta invitar a otros ponentes que puedan ampliar conocimientos de un tema dado desde otro punto de vista, añadiendo así riqueza a la asignatura. Estos puntos de vista distintos pueden ser desde experiencias profesionales, a ejemplos de aplicación de conceptos, por ejemplo. Estos seminarios, por su propia naturaleza, no están planeados de antemano al comenzar la asignatura, sino que se buscan oportunidades durante el cuatrimestre para traer a uno o dos ponentes por año. Son además abiertos a estudiantes y profesores externos a la asignatura, anunciándose en la lista del departamento.

Algunos de los invitados externos a la Universidad de Zaragoza en los últimos años

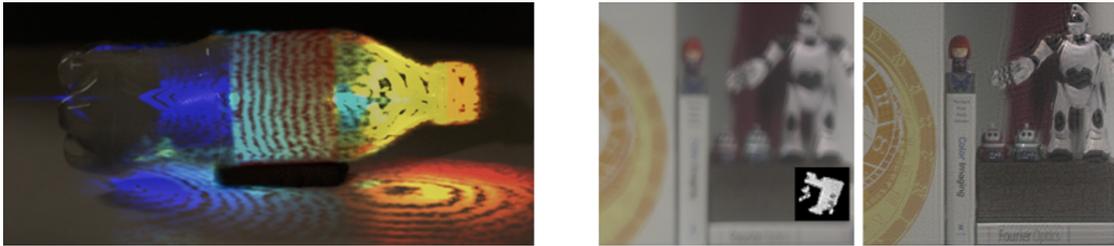


Figura 5.14: Izquierda: Visualización del transporte de luz a un billón de fotogramas por segundo [VWJ<sup>+</sup>13]. Derecha: Recuperación de información utilizando aperturas codificadas [MPCG12].

incluyen:

- Marcos Fajardo (SolidAngle)
- Jorge Jiménez (Activision)
- Henrik Wann Jensen (UCSD)
- Daniel Maskit (Digital Domain)

## 5.7. Trabajos

La asignatura apuesta claramente por el concepto de “aprender haciendo”. Así, gran parte del esfuerzo de los estudiantes se centra en el desarrollo de varios trabajos durante el cuatrimestre. Los dos primeros y el último son opcionales (geometría, ray tracing básico, e imagen computacional), mientras que los otros dos son obligatorios (path tracing y photon mapping). Describimos a continuación estos cinco trabajos.

### 5.7.1. Trabajo 1: Geometría (voluntario)

Los objetivos de este trabajo son aplicar el conocimiento teórico sobre geometría, y diseñar e implementar estructuras geométricas básicas que se utilizarán para trabajos posteriores.

**Descripción de problema:** Los avances recientes en viajes interplanetarios han alcanzado velocidades más rápidas que la luz (FTL por sus siglas en inglés, *Faster Than Light*). Las naves con hiperimpulsores FTL están alcanzando tres veces la velocidad de la luz ( $3c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío), mientras que los viajes a través de agujeros de gusano (portales espaciales) han alcanzado un pico de  $10c$  sin comprometer su estabilidad. Los portales se construyen en parejas conectadas, y esa conexión no se puede cambiar. Una vez se destruye un portal, su correspondiente portal conectado se vuelve inútil. Esto complica la logística y la infraestructura de portales se vuelve muy cara.

Trabajas para una compañía denominada FTL Dynamics, con base en España, que invierte una gran cantidad de dinero y recursos en investigación y desarrollo (esto debe-

ría darte una pista de que esto es ciencia ficción). Los investigadores han desarrollado una nueva tecnología FTL, denominada catapulta cuántica, que tiene el potencial de alcanzar 20c, y una sola estación puede ser conectada con cualquier otra estación en el universo. Esto es un gran hito tecnológico, y cuando se produzca de forma industrial se convertirá en un nuevo amanecer para los viajes interplanetarios. Mientras el departamento de marketing busca un nombre un poco más comercial, estás a cargo de diseñar e implementar el software de control del dispositivo. Este software tiene que proporcionar:

- La dirección saliente de la estación de lanzamiento (desde el punto de vista de la estación de lanzamiento).
- La dirección entrante en la estación receptora (desde el punto de vista de la estación receptora).

Esto no es trivial, porque la conexión ocurre a través del Universo y sólo se puede medir en el Sistema de Coordenadas del Universo (UCS por sus siglas en inglés), mientras que cada estación trabaja en su propio sistema de coordenadas local.

**Planetas:** Los planetas se modelan como esferas perfectas. Están definidos por:

- Centro: Un punto en el espacio, medido en el Sistema de Coordenadas del Universo (UCS).
- Eje: La dirección que conecta el Polo Sur con el Polo Norte del planeta. Su módulo debe ser, por tanto, el doble del radio del planeta.
- Ciudad de referencia: La posición en el espacio de la ciudad de referencia para el planeta, desde la que el azimuth (longitud) se mide, medida en el UCS. En la Tierra, esta ciudad es Greenwich. La distancia entre esta ciudad de referencia y el centro del planeta es el radio del planeta.

Cuando tenga que introducir la información de un planeta, el usuario deberá introducir estos tres vectores. El sistema debe comprobar que el radio definido por el eje y por la distancia entre el centro y la ciudad de referencia es el mismo (con un error máximo de  $10^{-6}$ ). Un diagrama representativo en el que se incluyen los tres vectores se muestra en la Figura 5.15, izquierda.

**Estación planetaria:** Una estación planetaria está posicionada en una localización específica en la superficie del planeta, definida por:

- Inclinación  $\theta$ : El ángulo respecto al eje planetario (que conecta el Polo Sur con el Polo Norte), similar a la latitud en la Tierra pero medida desde el eje en vez del Ecuador. Se mide en radianes, en el rango  $(0, \pi)$ .
- Azimuth  $\phi$ : El ángulo alrededor del globo respecto a un meridiano-0 específico, similar a la longitud en la Tierra, pero el meridiano de referencia no es Greenwich, porque Greenwich es una ciudad terrestre. Se mide en radianes, en el rango  $(-\pi, \pi]$ .

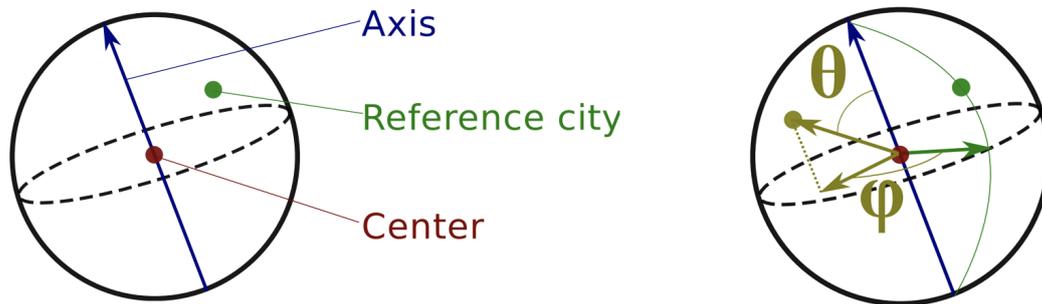


Figura 5.15: Izquierda: Elementos que definen un planeta. Derecha: Posicionamiento de una estación en la superficie del planeta mediante los ángulos  $\theta$  y  $\phi$ .

A partir de la inclinación y el azimuth de una estación, se puede calcular la posición UCS (ver Figura 5.15, derecha), así como su sistema de coordenadas local. En concreto, se puede deducir la siguiente información:

- La posición de la estación en el Sistema de Coordenadas del Universo (UCS).
- La normal a la superficie del planeta en esa posición (cuyo módulo es 1).
- La dirección tangente a la latitud, que es la dirección tangente a la superficie del planeta, y perpendicular al eje del planeta (módulo unitario). Esta tangente sigue la variación positiva del azimuth (sin variación de la inclinación).
- La dirección tangente a la longitud, que es la dirección tangente a la superficie del planeta, y perpendicular a la otra dirección tangente (módulo unitario). Esta tangente sigue la variación negativa de la inclinación (sin variación del azimuth):  $(-\pi, \pi]$ .

El sistema de coordenadas de la estación está definido por: la dirección tangente a la latitud como el vector  $\mathbf{i}$  (primer eje), la dirección tangente a la longitud como el vector  $\mathbf{j}$  (segundo eje) y la normal a la superficie como el vector  $\mathbf{k}$  (tercer eje). Las tres direcciones son linealmente independientes (ortogonales). Al ser preguntado por una estación planetaria, el usuario introducirá primero el planeta (los tres vectores), seguido por la inclinación y azimuth de la estación. El sistema calculará la posición de la estación y el correspondiente sistema de coordenadas.

**Conexión interplanetaria:** Dadas dos estaciones, la conexión en el UCS es la dirección desde la posición de la estación de lanzamiento a la posición de la estación receptora (ver Figura 5.16). Sin embargo, para que el transporte funcione correctamente, cada estación necesita la conexión descrita en su propio sistema de coordenadas.

Hay una desventaja. La catapulta cuántica necesita entre 1 y 2 segundos para alcanzar su velocidad punta de  $20c$ . A esa velocidad punta, la materia transportada está completamente fuera de fase en su propia frecuencia específica, y no puede colisionar

con otra materia, como planetas, estrellas, o incluso otra materia transportada fuera de fase. Sin embargo, antes de que esto ocurra, la materia tiene un peligro muy alto de colisión en fase. Esto es especialmente peligroso cuando el sistema de lanzamiento de la catapulta cuántica está apuntando hacia el interior de su propio planeta, por lo que, como mecanismo de seguridad, el sistema de lanzamiento no funcionará si está apuntando en esa dirección. Lo mismo ocurre en la parte receptora: el sistema de recepción de la catapulta cuántica necesita entre 1 y 2 segundos para reducir la velocidad, y durante esos momentos la materia transportada puede colisionar. Por tanto, el receptor cuántico no funcionará si la materia alcanza la estación atravesando su propio planeta.

El prototipo completo pedirá dos estaciones, y mostrará por pantalla la conexión entre ellas en los dos sistemas de coordenadas locales de las dos estaciones. También mostrará una advertencia si la trayectoria de la materia atraviesa cualquiera de los dos planetas.

**Entrega:** Este trabajo no se entregará para su calificación. Sin embargo, se recomienda que esté terminado para la fecha establecida, para regular adecuadamente la carga de trabajo.

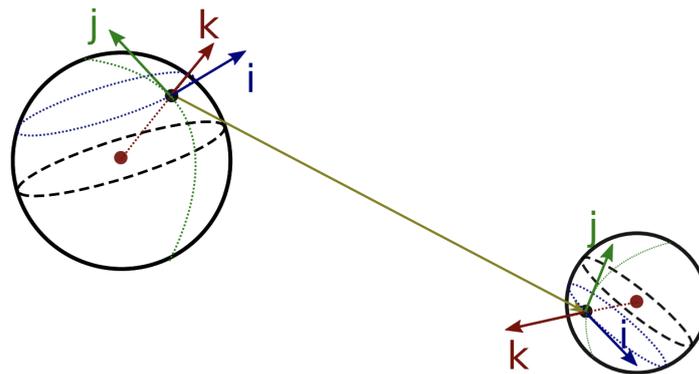


Figura 5.16: Conexión entre dos estaciones, incluyendo los sistemas de coordenadas locales de cada una.

### 5.7.2. Trabajo 2: Trazado de rayos (voluntario)

Los objetivos de este trabajo son:

- Desarrollar las estructuras y funciones clave para algoritmos de rendering.
- Enlazar conceptos matemáticos con su implementación en código.
- Crear un *benchmark* de pruebas para potenciales nuevas primitivas, sensores, o estructuras de aceleración.

**Sensor:** Los rayos se lanzarán desde un modelo de cámara con sensor. El modelo a seguir es una cámara tipo *pinhole* (ver Figura 5.17). Hay que tener en cuenta que el

tamaño del plano de proyección (dado por los vectores *up* y *left*) debe ser proporcional a la resolución de la imagen (en píxeles). En otro caso, la geometría aparecerá distorsionada según el *aspect ratio*. La cámara lanzará sólo un rayo por píxel, en su centro exacto (al menos en esta primera versión). Para tener *antialiasing*, se pueden lanzar múltiples rayos por píxel, de forma aleatoria dentro del área del píxel.

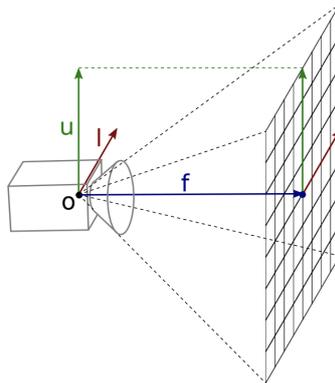


Figura 5.17: Elementos de una cámara tipo *pinhole*.

**Primitivas geométricas:** La geometría consistirá en las siguientes primitivas:

- Esfera: dada por su centro y su radio.
- Planos: plano infinito dado por su normal y su distancia al origen.

Cada primitiva puede ser intersectada por un rayo: el cálculo de la intersección resulta en un sistema de ecuaciones en el que el rayo viene dado por la ecuación de una recta, y la primitiva geométrica en cuestión por su ecuación implícita. El sistema debe ser resuelto por sustitución para obtener el parámetro de un rayo, que dará el punto de intersección. Además de su información geométrica, cada primitiva tendrá una propiedad de emisión, y una tupla rojo-verde-azul (RGB), que representa el color de la misma. Esta aplicación es un buen punto de partida para experimentar con estas nuevas primitivas.

**Rendering:** La aplicación será un renderizador que lanza un único rayo por píxel y pone en la correspondiente coordenada de píxel la emisión de la primitiva intersectada más próxima. Las escenas estarán incluidas en el código fuente, por lo que no hay necesidad de desarrollar un formato de archivo específico. La imagen se guardará para su visualización futura. Se recomienda experimentar con el efecto de diferente número de objetos y resolución de imagen en el tiempo de rendering.

**Extensiones opcionales:** Se pueden elegir una (o más) de las siguientes extensiones, que ayudarán y mejorarán futuros trabajos evaluables:

- Otras primitivas geométricas. Añadir otras primitivas geométricas diferentes definidas por su ecuación implícita, como conos, cilindros, elipsoides, discos o triángulos. Se puede ser tan creativo como se quiera.
- Estructuras de aceleración. Para escenas con muchos objetos, se pueden implementar *Bounding Volume Hierarchies* o *Kd-trees* para acelerar el rendering. Si se implementan, se debe evaluar la mejora resultante en el tiempo de rendering.
- Texturas. Se pueden añadir texturas que modulen la emisión de un objeto.
- Otras extensiones. Cualquier otra extensión propuesta por el estudiante se debe discutir primero con el profesor, fundamentalmente para evitar extensiones que requieran demasiado trabajo.

**Detalles de implementación:** Se puede elegir cualquier lenguaje de programación. Sin embargo, recomendamos C++ por las siguientes razones:

- El código compilado debería ser más eficiente que en otros lenguajes.
- El código que se proporcionará para el segundo trabajo práctico está en C++ (a no ser que se opte por utilizar código propio para ambos).
- C++ permite definir operadores como `+` o `*` para cualquier nuevo tipo de datos. Esto hace que el código sea más legible para tipos de datos como los vectores.

El uso de cualquier librería externa o código fuente descargado está prohibido. Sólo se podrá utilizar la biblioteca estándar del lenguaje de programación elegido. Recomendamos utilizar el formato de imagen `.ppm` para escribir la salida del trazador de rayos a una imagen. Es un fichero de texto muy sencillo que se puede leer con la mayoría de los visores, y es sencillo de escribir y leer. Se pueden encontrar los detalles en: <http://netpbm.sourceforge.net/doc/ppm.html>. También se puede utilizar para cargar imágenes como entrada si se incluye la extensión opcional del uso de texturas. Si se decide incluir la extensión opcional de mallas de triángulos y se quieren cargar, recomendamos el formato de fichero `.ply`. Es un fichero de texto muy simple. La descripción del formato, junto con algunos modelos `.ply` gratis, se puede encontrar en: <https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/data/ply/ply.html>.

### 5.7.3. Trabajo 3: Path tracing (obligatorio)

El objetivo de este trabajo es implementar un *path tracer* [Kaj86, FHF<sup>+</sup>17]<sup>3</sup> desde cero. Se puede hacer individualmente, o en grupos de dos personas.

**Trabajo anterior:** El path tracer se construirá a partir del trabajo anterior, del que tomará lo siguiente:

- Un modelo de cámara tipo *pinhole*.
- La rutina de descripción y guardado de imagen.
- Esferas y planos infinitos como primitivas geométricas.

<sup>3</sup><https://jo.dreggn.org/path-tracing-in-production/>

- La propiedad de emisión (tupla RGB) para cada primitiva.

Este trabajo añadirá propiedades de reflectancia y el algoritmo de rendering capaz de manejar estas propiedades.

**Path tracer:** El path tracer permitirá una simulación completa del transporte de luz. Cada primitiva incluirá por tanto propiedades de reflectancia que serán utilizadas por el algoritmo. En concreto, cada primitiva incluirá una BRDF de Phong (físicamente correcta, tal y como aparece en las notas de la asignatura) como el modelo de apariencia, añadido a la emisión. Si es necesario, se puede asumir que un objeto emisor no refleja luz (i.e., no tiene una BRDF), y que un objeto reflectante no emite luz.

El path tracer tendrá un único parámetro específico (fijado por línea de comandos): el **número de caminos –o paths– por píxel**. Las interacciones de los caminos seguirán el muestreo de Monte Carlo con Ruleta Rusa. Cada path tendrá las condiciones de terminación estándar (no interceptar con nada, interceptar un objeto sin propiedades de reflectancia, o una condición de terminación de la Ruleta Rusa). La imagen de salida también tendrá sus propios parámetros dados por línea de comandos: ancho, alto y nombre de fichero.

No se requiere cargar la geometría desde fichero. Por tanto, las escenas pueden estar definidas en el código fuente. Una de las escenas (la escena *por defecto*) debe ser una caja de Cornell o **Cornell Box**: cinco paredes formando una caja (con un lado abierto para que la cámara pueda observar la escena), todas ellas grises excepto la de la izquierda (roja) y la de la derecha (verde). Dentro de esa caja, debe haber una fuente de luz (en algún lugar de la mitad superior de la caja, puede ser la pared superior, o techo, completa), y dos esferas en el suelo. El modelo de material de las esferas deben ser BRDFs de Phong muy especulares y con diferentes parámetros.

**Luces puntuales y estimación del próximo evento (*next event estimation*):**

Una vez que el path tracing estándar está hecho, se añadirán luces puntuales al modelo. Cada luz puntual tendrá una potencia (tupla RGB) y una posición específica en el espacio, y la escena puede tener tantas fuentes de luz como sea necesario.

En cada interacción de cada path, el path tracer estimará la luz directa desde todas las fuentes de luz puntuales lanzando rayos de sombra y teniendo en cuenta la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Nótese que el número de fuentes de luz afectará al tiempo de rendering.

Para comparar el efecto de *next event estimation*, otra escena de prueba puede ser una **Cornell Box** en la que la fuente de luz es una luz puntual en la mitad superior de la caja (en vez de una primitiva planar completa).

Si todas estas características requeridas (path tracer + *next event estimation* con luces puntuales) se logran correctamente, la calificación obtenida será de 7. Para obtener una calificación superior, se deben realizar cualquiera de las extensiones opcionales.

**Extensiones opcionales:** Se pueden elegir una (o más) de las siguientes extensiones (incluyendo las del trabajo previo):

- **Otras primitivas geométricas.** Añadir otras (varias) primitivas geométricas distintas definidas por su ecuación implícita, como conos, cilindros, elipsoides, discos o triángulos. Se puede ser tan creativo como se quiera.
- **Estructuras de aceleración.** Para escenas con muchos objetos, se pueden implementar *Bounding Volume Hierarchies* o *Kd-trees* para acelerar el rendering. Si se implementan, se debe evaluar la mejora resultante en el tiempo de rendering.
- **Texturas.** Se pueden añadir texturas que modulen la emisión de un objeto, o su coeficiente difuso de la BRDF de Phong. También se pueden añadir otras texturas (bump maps o mapas de normales, por ejemplo), pero son más difíciles de modelar porque requieren de las tangentes para su utilización.
- **BSDFs.** Se pueden añadir nuevos modelos de BSDF (BRDFs o BTDFs) que permitan representar otros fenómenos: interacciones dieléctricas de Fresnel (incluyendo reflexión y refracción perfecta), modelos de microfacetas... También se pueden añadir BTDFs anisotrópicas, pero suponen más trabajo porque requieren de las tangentes para su utilización.
- **Estimación del siguiente evento por muestreo por importancia.** En vez de calcular todas las fuentes de luz, encontrar una forma de tener en cuenta su contribución en cada interacción por muestreo por importancia, y quizá incluir luces de área (objetos emisores) en la estimación del siguiente evento.
- **Bidirectional path tracing.** Implementar una versión sencilla de bidirectional path tracing, en el que los paths se generan también desde la fuente de luz, con los correspondientes rayos de sombra.
- **Medios participativos.** Extender path tracing para que pueda manejar medios participativos como niebla, humo o agua, incluyendo eventos de absorción y scattering (dispersión).
- **Otras extensiones.** Cualquier otra extensión propuesta por el estudiante se debe discutir primero con el profesor.

En general, antes de abordar una extensión opcional, se debe contactar al profesor para que les asesore sobre la forma óptima de enfocar esa extensión específica, y la extensión se puede modular si sobrepasa la carga de trabajo esperada.

#### Detalles de implementación:

**Lenguaje de programación.** Se puede elegir cualquier lenguaje de programación. Sin embargo, recomendamos C++ por las siguientes razones:

- El código compilado debería ser más eficiente que en otros lenguajes.
- El código que se proporcionará para el segundo trabajo práctico está en C++ (a no ser que se opte por utilizar código propio para ambos).
- C++ permite definir operadores como  $+$  o  $*$  para cualquier nuevo tipo de datos. Esto hace que el código sea más legible para tipos de datos como los vectores.

**Librerías externas.** El uso de cualquier librería externa o código fuente descargado está prohibido. Sólo se podrá utilizar la biblioteca estándar del lenguaje de programación elegido.

**Formatos de fichero.** Recomendamos utilizar el formato de imagen .ppm para escribir la salida del trazador de rayos a una imagen. Es un fichero de texto muy sencillo que se puede leer con la mayoría de los visores, y es sencillo de escribir y leer. Se pueden encontrar los detalles en: <http://netpbm.sourceforge.net/doc/ppm.html>. También se puede utilizar para cargar imágenes como entrada si se incluye la extensión opcional del uso de texturas o mapas de entorno.

Si se decide incluir la extensión opcional de mallas de triángulos y se quieren cargar, recomendamos el formato de fichero .ply. Es un fichero de texto muy simple. La descripción del formato, junto con algunos modelos .ply gratis, se puede encontrar en: <https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/data/ply/ply.html>.

**Informe:** Como resultado de este trabajo, se debe entregar un informe donde se explique el diseño e implementación del path tracer. No hay requisitos en cuanto a número de páginas, estructura, o contenido de dicho informe. Sin embargo, hacemos las siguientes recomendaciones:

- **Estructurad** vuestro documento antes de escribirlo. Evitaréis redundancias u omisiones de información.
- Analizad vuestra carga de trabajo: cómo os habéis gestionado, qué tarea ha realizado cada miembro del grupo...
- Anotad, estructurad y describid vuestras **decisiones**, relacionándolas con los materiales de clase, e ilustrándolas con imágenes (renders) de diferentes escenas que motiven o justifiquen esas decisiones de diseño.
- Discutid todas las **versiones implementadas**, de nuevo relacionándolas o ilustrándolas con imágenes (renders).
- Al incluir renders, **discutidlos**. ¿Qué están ilustrando? ¿Qué fenómenos son relevantes?
- Puede ser útil **comparar renders** para ilustrar una característica específica (con y sin ella).
- **No incluyáis el código fuente.** Vais a tener que entregar el código fuente aparte.
- Es normal inspirarse en fuentes externas (artículos científicos, información online, Wikipedia, o incluso código fuente). Cuando esto sucede, **añadid referencias**

**bibliográficas** a los artículos, libros, o material en el que os habéis inspirado. Notad que hay una diferencia entre “inspirarse” y “copiar y pegar código”.

La calidad y corrección el informe también se tendrá en cuenta en la evaluación. Un informe más largo no es necesariamente un mejor informe.

**Entrega:** La entrega debe realizarse a través de Moodle (<https://moodle2.unizar.es/add>) por parte de uno (y sólo uno) de los alumnos de cada equipo.

**Código fuente.** Todo el código fuente del trazador de rayos debe comprimirse en un fichero `.zip`, con el siguiente nombre de archivo:

- `pathtracer_<nip1>_<nip2>.zip` (donde `<nip1>` and `<nip2>` son los 6 dígitos del identificador de los alumnos) si el trabajo ha sido realizado por dos alumnos.
- `pathtracer_<nip>.zip` (donde `<nip>` son los 6 dígitos del identificador del alumno) si el trabajo ha sido realizado individualmente.

También debe incluir un fichero `readme` con instrucciones de compilación y ejecución claras.

**Informe.** El informe debe entregarse como un fichero `.pdf`, con el siguiente nombre:

- `pathtracer_<nip1>_<nip2>.pdf` (donde `<nip1>` and `<nip2>` son los 6 dígitos del identificador de los alumnos) si el trabajo ha sido realizado por dos alumnos.
- `pathtracer_<nip>.pdf` (donde `<nip>` son los 6 dígitos del identificador del alumno) si el trabajo ha sido realizado individualmente.

#### 5.7.4. Trabajo 4: Photon mapping (obligatorio)

El objetivo de este trabajo es extender un trazador de rayos simple para que soporte iluminación global usando el algoritmo de photon mapping, y en particular la versión original de Jensen [Jen96]. Podéis utilizar el ray tracer que se os proporciona, o el que habéis implementado en el trabajo práctico anterior.

**Ejercicios obligatorios:** El trabajo obligatorio está dividido en dos partes, una para cada uno de los pasos del algoritmo de photon mapping:

1. La primera parte consiste en desarrollar la construcción de los mapas de fotones. Para ello, debéis muestrear la fuente de luz (o fuentes de luz) de la escena, y comenzar el *random walk* desde la luz muestreada, guardando las intersecciones de los fotones. Estas intersecciones se utilizarán después para construir el mapa de fotones.
2. La segunda parte del ejercicio requiere utilizar el mapa de fotones para calcular la ecuación de render en el punto de intersección.

**Generación del mapa de fotones:** Para construir los mapas de fotones de la escena, los usuarios deberán muestrear una fuente de luz en la escena para comenzar el *random walk*. Esto supone elegir una fuente de luz de la escena, y muestrear una posición y dirección desde la fuente de luz muestreada. El rayo definido por la posición y dirección muestreadas será el origen del *random walk*, mientras que la energía muestreada de la fuente de luz será la potencia inicial. En cada intersección del *random walk* se guardará un fotón en el mapa de fotones, que deberá ser generado al final del proceso.

**Pregunta 1.1** En el trazador de rayos que os proporcionamos, el *photon random walk* ya está implementado (función `PhotonMapping::trace_ray` en `PhotonMapping.cpp`, junto con un KD-tree para acelerar los look-ups de los fotones. Si decidís utilizar el código que os proporcionamos, tendréis que explicar exhaustivamente qué hace la función `trace_ray` y por qué. Cuanto más descriptivos seáis, mejor mostraréis que sabéis qué está sucediendo en esa función. Alternativamente, si utilizáis vuestro propio trazador, también se espera que expliquéis de forma exhaustiva el *random walk* que habéis implementado.

**Estimación de radiancia:** En la segunda parte del ejercicio tendréis que calcular la apariencia (*shading*) de un punto utilizando el mapa de fotones. Esto requerirá encontrar los  $k$  fotones más próximos al punto que se está calculando, y utilizarlos para calcular la radiancia reflejada en ese punto. Además, tendréis que incluir iluminación directa por trazado de rayos, y las reflexiones especular y de transmisión. Esto es similar a lo que habéis implementado en el trabajo anterior.

**Pregunta 2.1** Renderizad dos imágenes de una escena con sólo iluminación directa (DI), una de ellas con DI calculada con trazado de rayos, y otra con photon mapping. ¿Cuáles son las diferencias entre iluminación directa calculada con trazado de rayos y con photon mapping? ¿Cuál crees que es más precisa y por qué?

**Pregunta 2.2** En la escena mostrada en la Figura 5.18 podéis ver un toro difuso (Lambertiano) dentro de un cubo de cristal, iluminado por una fuente de luz puntual. ¿Cuál sería la diferencia (en una escena que hubiese convergido) entre renderizar la iluminación directa con trazado de rayos y con photon mapping? Cread una versión más simple de la escena de la figura con una esfera difusa dentro de una esfera refractante, y renderizadla con iluminación directa calculada con trazado de rayos y con photon mapping.

**Pregunta 2.3** En la escena de la Cornell box, haced que la apariencia de las esferas esté modeladas utilizando Phong, cada una de ellas con un grado diferente de especularidad (una moderadamente especular,  $n < 10$ , otra muy especular,  $n > 20$ ). Explica el resultado y las diferencias entre las esferas.

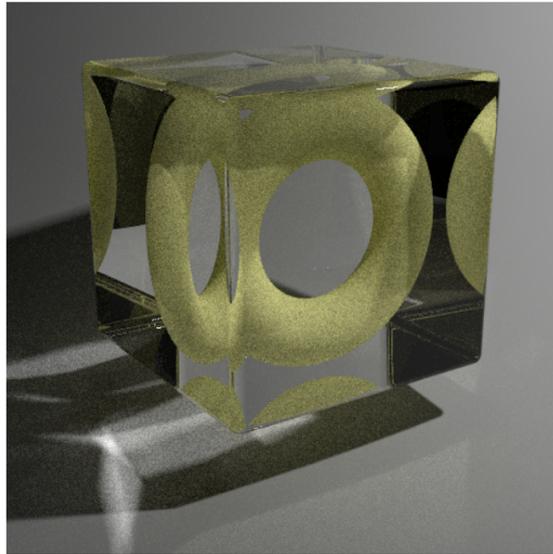


Figura 5.18: Toro Lambertiano embebido en un cubo de cristal, renderizado utilizando iluminación global robusta mediante photon mapping.

**Extensiones opcionales:** Además de las partes obligatorias, también podéis implementar una parte opcional. A continuación se incluyen varias sugerencias para esta parte opcional, pero también podéis proponer otras extensiones que creáis que pueden ser interesantes. En cualquier caso, antes de empezar cualquier implementación opcional, preguntadnos primero para que nos pongamos de acuerdo en algo que tenga sentido (podéis encontrar los correos electrónicos de contacto al final de este documento). Extensiones triviales o no relacionadas (e.g., paralelizar el código en múltiples threads) no serán consideradas como una extensión.

- Extender photon mapping para poder manejar **medios participativos** [JC98].
- Implementar un renderizador con iluminación global basada en **Virtual Point Lights (VPL)** [Kel97]. Estos métodos están muy relacionados con photon mapping, especialmente su generalización a las llamadas *Virtual Spherical Lights* [HKWB09].
- **Progressive photon mapping** [HOJ08], para obtener una solución consistente sin necesidad de almacenar un número infinito de fotones. Una versión del método más sencilla de implementar (pero más difícil de entender) puede encontrarse en [KZ11].
- Implementar un **kernel adaptativo (i.e., el radio) para la estimación de radiancia**: Un enfoque relativamente simple para hacer eso son los *photon differentials* [FSES14], aunque la implementación puede ser compleja. Un enfoque más formal y matemáticamente complejo (aunque más fácil de implementar) es el trabajo de Kaplanyan y Dachsbacher [KD13].
- Desarrollar **photon mapping para estado transitorio**, basándose en nuestro trabajo [JMMn<sup>+</sup>14].

- Analizar el **comportamiento de varios kernels sofisticados** (e.g., Perlin, Epe-nechnikov...) en la estimación de radiancia [Sil86]. Supone analizar filtros avanzados más allá de filtros de caja o de triángulo, si no, no se considerará una extensión.

**Detalles de implementación:** El trazador de rayos que se os proporciona está implementado en C++, y se dan varias librerías precompiladas con el núcleo (core) del trazador y soluciones de Visual Studio para diferentes versiones del IDE (VS 2013 y 2015). Se puede encontrar en:

- <http://giga.cps.unizar.es/~ajarabo/download/IG2016/SmallPM.zip>

Todo lo implementado en las tareas obligatorias debe implementarse en `photonmapping.cpp`. Podéis encontrar una serie de escenas ya preparadas en `main.cpp`.

El renderizador que os proporcionamos genera imágenes en `.hdr`, un formato lineal de alto rango dinámico (HDR) soportado por la mayoría del software de imagen general (e.g., Photoshop), y por software específico como *HDR Shop*. Para insertar estas imágenes `.hdr` en el informe final tendréis que aplicarles un proceso de reproducción de tono (o tone mapping).

En el caso de que utilizéis vuestro propio trazador de rayos al implementar photon mapping, los mismos detalles de implementación del trabajo previo son de aplicación.

**Informe:** Como resultado de este trabajo, se debe entregar un informe donde se explique el diseño e implementación de photon mapping. Puede estar escrito en inglés o en castellano, y no hay requisitos en cuanto a número de páginas, estructura, o contenido de dicho informe, aunque las preguntas específicas de este enunciado deben responderse. Además, hacemos las siguientes recomendaciones:

- **Estructurad** vuestro documento antes de escribirlo. Evitaréis redundancias u omisiones de información.
- Anotad, estructurad y describid vuestras **decisiones de diseño**, relacionándolas con los materiales de clase, e ilustrándolas con imágenes (renders) de diferentes escenas que motiven o justifiquen esas decisiones de diseño.
- Discutid todas las **extensiones implementadas**, de nuevo relacionándolas o ilustrándolas con imágenes (renders).
- Al incluir renders, **discutidlos**. ¿Qué están ilustrando? ¿Qué fenómenos son relevantes?
- Puede ser útil **comparar renders** para ilustrar una característica específica (con y sin ella).
- **No incluyáis el código fuente**. Vais a tener que entregar el código fuente aparte.
- Cuando uséis bibliografía externa, **añadid referencias bibliográficas** a los artículos, libros, o material en el que os habéis inspirado.

La calidad y corrección el informe también se tendrá en cuenta en la evaluación. Un informe más largo no es necesariamente un mejor informe. Por último, la evaluación se hará en base a vuestro informe, así que cuanto más demostréis que sabéis **en papel**,

mejor os evaluaremos. Esto significa explicaciones, discusión de resultados, decisiones de diseño, o análisis del algoritmo al variar los parámetros.

**Entrega:** La entrega debe realizarse a través de Moodle (<https://moodle2.unizar.es/add>) por parte de uno (y sólo uno) de los alumnos de cada equipo.

**Código fuente.** Todo el código fuente del trazador de rayos debe comprimirse en un fichero `.zip`, con el siguiente nombre de archivo:

- `photonmapping_<nip1>_<nip2>.zip` (donde `<nip1>` and `<nip2>` son los 6 dígitos del identificador de los alumnos) si el trabajo ha sido realizado por dos alumnos.
- `photonmapping_<nip>.zip` (donde `<nip>` son los 6 dígitos del identificador del alumno) si el trabajo ha sido realizado individualmente.

Si utilizáis vuestro código para el trazador, se deben seguir las mismas instrucciones explicadas en el trabajo de ray tracing deben seguirse (i.e., compilar con el comando `make` y ejecutar con el comando `ray-trace`). Si usáis el código que os proporcionamos, sólo deben enviarse los ficheros de código fuente modificados.

También debe incluir un fichero `readme` con instrucciones de compilación y ejecución claras.

**Informe.** El informe debe entregarse como un fichero `.pdf`, con el siguiente nombre:

- `photonmapping_<nip1>_<nip2>.pdf` (donde `<nip1>` and `<nip2>` son los 6 dígitos del identificador de los alumnos) si el trabajo ha sido realizado por dos alumnos.
- `photonmapping_<nip>.pdf` (donde `<nip>` son los 6 dígitos del identificador del alumno) si el trabajo ha sido realizado individualmente.

**Evaluación:** La valoración de la parte obligatoria será de un máximo de 7 puntos. Para obtener una nota más alta deberéis implementar alguna de las extensiones opcionales propuestas. Aunque el código entregado debe compilar, la evaluación se hace en base al informe entregado. Esto significa que en el informe debéis explicar qué habéis hecho y demostrar que entendéis la técnica.

Todas las preguntas enumeradas en este enunciado deben ser respondidas. No se os valorará con una nota más alta por el hecho de utilizar vuestro propio trazador de rayos. Realizar mal los cálculos de conservación de energía o normalización se considerará un error grave; una escritura pobre también. Por último, experimentar con varias escenas y diferentes valores de los parámetros (e.g., radio del kernel, número de fotones) se valorará positivamente.

### 5.7.5. Trabajo 5: Imagen computacional (voluntario)

El último trabajo tiene de nuevo carácter voluntario, y se centra en la imagen computacional. Dentro de este campo, se ha elegido el tema de las aperturas codificadas, ya que

representa un ejemplo casi canónico de lo que la imagen computacional pretende conseguir: superar los límites del hardware, incluso de la física, y desarrollar nuevos métodos de captura codificada de información visual, de manera que al decodificarla podamos obtener más información que con métodos tradicionales. Además, es un tema explícitamente presentado en clase, tenemos experiencia directa en el campo [PMG12, MPCG12], y es fácil de simular en Matlab sin necesidad de manipular hardware real.

Esta práctica tiene una carga relativamente baja de programación (casi todas las funciones a utilizar vienen dadas en el guión); tiene más un carácter exploratorio, cuyo objetivo es que el alumno llegue a comprender el proceso analizando parámetros y sus resultados. A continuación se describe el guión de la práctica.

El proceso de captura de una fotografía puede modelarse como una convolución entre la denominada PSF (point spread function, estrechamente relacionada con la apertura) y la imagen nítida de la escena más ruido que modelaremos como ruido gaussiano  $\eta$  de media cero y varianza  $\sigma^2$ :

$$y = f_k * x + \eta \quad (5.1)$$

donde  $y$  representa la imagen capturada,  $f_k$  es la PSF del sistema, y  $x$  es la imagen nítida que se quiere capturar (ver Figura 5.19).

$$\begin{array}{c}
 \underbrace{y}_{\text{Imagen capturada}} = \underbrace{f_k}_{\text{PSF}} * \underbrace{x}_{\text{Imagen nítida}} + \eta \\
 \text{GAUSSIANO } N(0, \sigma^2) \\
 \text{Imagen capturada} = \text{PSF} * \text{Imagen nítida} + \eta
 \end{array}$$

Figura 5.19: Ecuación que representa el proceso de captura de una imagen.

Si pasamos la ecuación anterior al dominio frecuencial, la convolución pasa a ser una multiplicación de Transformadas de Fourier:

$$Y = F \cdot X + \zeta \quad (5.2)$$

donde  $Y$ ,  $F$ , y  $\zeta$  son las magnitudes correspondientes, en el dominio de la frecuencia, a las especificadas en la Ecuación 5.1.

Uno de los problemas inherentes de la fotografía es la limitada profundidad de campo, que, dependiendo de la escena y la apertura, puede provocar la aparición de zonas borrosas (como el ejemplo mostrado arriba). Dado un modelo simplificado de la óptica de la cámara, la Figura 5.20 representa este fenómeno.

Vemos que un punto situado sobre el plano focal  $D$  se corresponde con un punto en el sensor de la cámara (rayo verde) resultando una imagen nítida; en cambio un punto

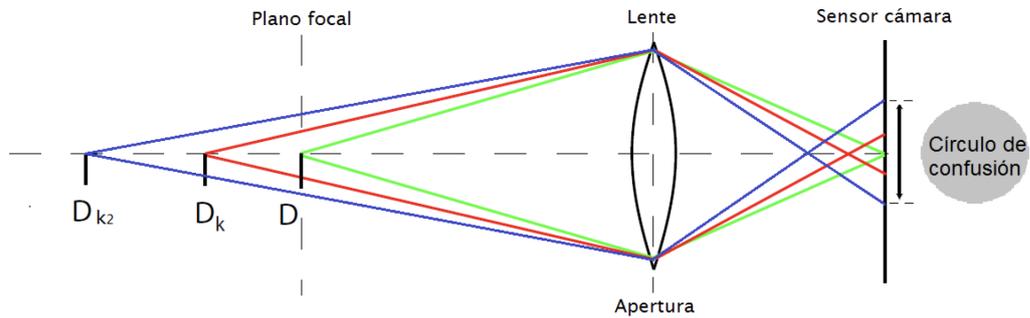


Figura 5.20: Esquema de la óptica de una cámara y la aparición de la profundidad de campo.

que dista del plano focal ( $D_{k_2}$ ) aparece desenfocado en el sensor de la cámara, dando lugar a un círculo en vez de un punto (rayo azul). Ese círculo, denominado círculo de confusión, es el responsable del blur o desenfoque de la imagen. El grado de desenfoque depende (entre otras cosas) de:

- La distancia  $k$  respecto del plano focal guía el tamaño del desenfoque o blur
- El patrón y diámetro de la apertura guían la forma del blur (círculo para apertura convencional; ver Figura 5.21)



Figura 5.21: La forma de la apertura está correlada con la forma del blur. Izquierda, de arriba a abajo: imagen ideal de un punto, imagen del mismo punto desenfocada con una apertura convencional (circular), e imagen del mismo punto desenfocada con una apertura codificada. Derecha: la apertura codificada usada en el ejemplo (imagen de [MCPG11]).

**Simulación del proceso de captura y recuperación de imágenes desenfocadas:** Partiendo del archivo *deblurring\_demo.m* simular el desenfoque en imágenes y

la recuperación de la imagen nítida para una apertura circular convencional. Analizar e identificar en el código la simulación del desenfoque y la recuperación de la imagen enfocada.

- Cargar la apertura mediante `im2double(imread('./apertures/...'))` - El archivo `deblurring_demo` utiliza un cierto tipo de deconvolución para obtener la imagen reenfocada. En concreto, una deconvolución de Wiener con prior de imágenes naturales (que ahora para para nosotros será una caja negra). Obtener la imagen reenfocada con este método y probar otros métodos de deconvolución existentes como `deconvlucy` o `deconvwnr`, seleccionando los parámetros adecuados (número de iteraciones, estimación de ruido...). Para conocer más sobre los parámetros de estas funciones: `help deconvlucy` o `help deconvwnr`. - Variar parámetros de ruido (sigma, desviación típica) y comentar su efecto en la imagen reenfocada. - Mostrar y explicar cómo varía la imagen reenfocada al variar la distancia de la escena al plano focal (o lo que es lo mismo en nuestra simulación, con el tamaño de blur). Con probar tres distancias basta.

Como habréis comprobado, la recuperación con la apertura circular de la cámara es mala. Representar el power spectrum de la apertura circular haciendo uso de `power_spect_demo.m` y fundamentar con la expresión de la captura de una imagen en el dominio frecuencial por qué está ocurriendo esto.

**Aperturas codificadas:** Las aperturas codificadas nos permiten recuperar imágenes nítidas de mejor calidad. Repetir el apartado 1) para las aperturas codificadas de Zhou y Raskar disponibles en el material. ¿Qué cambia en el power spectra de las aperturas codificadas respecto de la circular?

**Priors de imágenes:** El archivo `deblurring_demo` utilizado antes contiene una implementación de la deconvolución de Wiener con prior de imágenes naturales. En él hace uso del conocimiento previo que tenemos de las imágenes naturales e introduce esta variable en el proceso de deconvolución. Este prior se calcula con la función `eMakePrior.m`; explicar cómo se calcula y representar de forma adecuada el prior calculado para comprender cómo es esta variable.

**Imágenes en color:** Hasta ahora se ha trabajado con imágenes en escala de grises. Modificar el código para poder recuperar la imagen en color, para ello se debe tratar cada canal por separado. Con un ejemplo de una imagen recuperada es suficiente.

**Métricas de imagen:** Aparte de poder hacerlo por inspección visual, hay formas más rigurosas de evaluar la calidad de los distintos reenfoques, es decir, el error de la imagen reenfocada. Representa gráficamente el error de reenfoque en función de los distintos parámetros explorados para al menos dos métricas de error diferentes.

**Anotaciones adicionales:** Es importante que expliquéis las conclusiones derivadas de la práctica. Éstas incluyen qué apertura de las tres y qué tipo de deconvolución son los más apropiados para el problema de corrección de desenfoque. Hay que explicar esto para el caso de un ruido de imagen bajo (e.g.  $\sigma = 0.005$ ) y para un ruido elevado (e.g.

$\sigma = 0.15$ ). En algunos casos damos valores orientativos de los parámetros y en otros no. En los que no, recae en vosotros razonar o buscar qué valores tienen sentido.

## 5.8. Resultados y conclusiones

Aparte de los resultados positivos en las encuestas a los alumnos, la sensación es que esta metodología, que lleva ya varios años implantada con algunos retoques cada año, está dando sus frutos. Los alumnos se ven motivados a hacer los trabajos, tanto voluntarios como obligatorios, añadiendo funcionalidades más allá de lo estrictamente obligatorio. Siempre recomendamos trabajar en parejas, lo cual suele incentivar más y permite el intercambio de ideas y trabajo en equipo. A continuación mostramos algunas de las imágenes de los trabajos del último año de impartición de la asignatura (Figura 5.22).

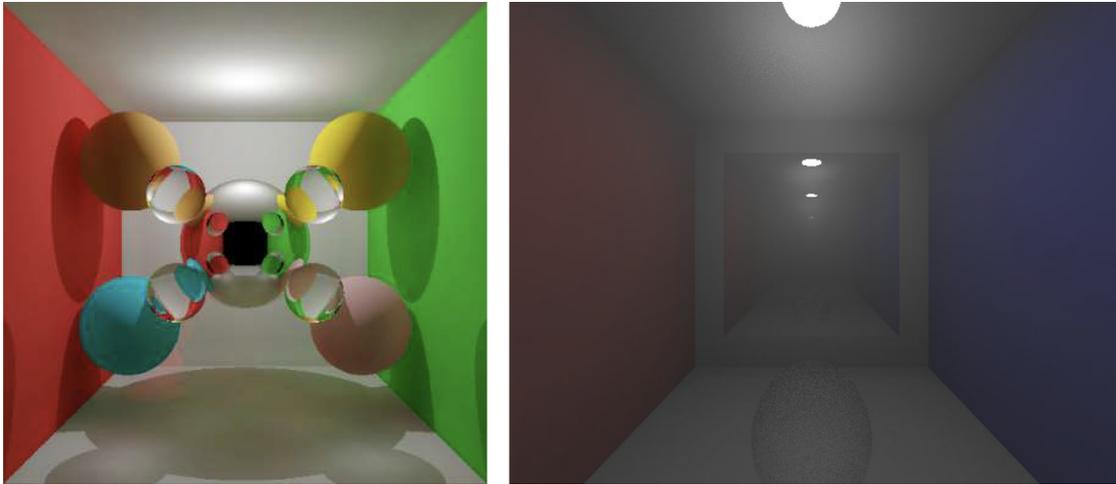


Figura 5.22: Ejemplos representativos de los resultados presentados en los trabajos, incluyendo reflejos múltiples, cáusticas, o medios participativos.

Además, los últimos años hemos creado un concurso de render; de manera optativa, los alumnos pueden elegir una imagen para el concurso, y explicar brevemente la complejidad algorítmica que encierra. Los profesores de la asignatura elegimos al ganador, que recibe como premio un ejemplar del libro *The Magic of Computer Graphics*, de Noriko Kurachi.

Varios alumnos cada año deciden hacer su Trabajo Fin de Grado en Informática Gráfica, o incluso un Máster o una Tesis Doctoral después. Creo que esto es también reflejo de una buena labor docente; como he argumentado antes, considero importante aprovechar que la asignatura es del séptimo cuatrimestre para intentar mirar un poco más allá. Los alumnos que la cursan saldrán muy pronto a la calle a buscar trabajos, y más allá de la transmisión de conocimiento de un tema dado, es importante darles el mayor número de opciones. Durante estos años he escuchado muchas veces (y estoy

seguro de que Francisco Serón o Adolfo Muñoz también) frases como “no sabía que podía dedicarme a esto en España”, o “no sabía que se podía hacer esto aquí”. Sería un error en mi opinión no mostrarles estas opciones.

Por último, resaltar que aunque todo lo cubierto en la asignatura está descrito en los powerpoints que se suben a moodle, se ofrece una pequeña lista bibliográfica de acceso gratuito que puede servir tanto de apoyo como para profundizar más en algunas partes de la materia:

Estado del arte de iluminación global:

<https://people.mpi-inf.mpg.de/~ritschel/Papers/GISTAR.pdf>

Cursos de SIGGRAPH sobre de transporte de luz:

<http://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/papers/2013-ltscourse/index.htm>

<http://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/papers/2014-ltscourse/index.htm>

Curso de SIGGRAPH sobre path tracing:

<https://jo.dreggn.org/path-tracing-in-production/>

Curso de SIGGRAPH sobre photon mapping:

<http://users-cs.au.dk/toshiya/starpm2013a/>

## Anexo: Computación según la ACM

Se reproduce a continuación la definición original de *Computer Science* por la ACM, dentro de su *Computing Curricula*:

*Computer Science spans a wide range, from its theoretical and algorithmic foundations to cutting-edge developments in robotics, computer vision, intelligent systems, bio-informatics, and other exciting areas. We can think of the work of computer scientists as falling into three categories.*

- *They design and implement software. Computer scientists take on challenging programming jobs. They also supervise other programmers, keeping them aware of new approaches.*
- *They devise new ways to use computers. Progress in the Computer Science areas of networking, database, and human-computer interfaces enabled the development of the World Wide Web. Now Computer Science researchers are working with scientists from other fields to make robots become practical and intelligent aides, to use databases to create new knowledge, and to use computers to help decipher the secrets of our DNA.*
- *They develop effective ways to solve computing problems. For example, computer scientists develop the best possible ways to store information in databases, send data over networks, and display complex images. Their theoretical background allows them to determine the best performance possible, and their study of algorithms helps them to develop new approaches that provide better performance.*

*Computer Science spans the range from theory through programming. Curricula that reflect this breadth are sometimes criticized for failing to prepare graduates for specific*

*jobs. While other disciplines may produce graduates with more immediately relevant job-related skills, computer science offers a comprehensive foundation that permits graduates to adapt to new technologies and new ideas.*



## Propuesta de un nuevo Máster

Se presenta a continuación una propuesta para un nuevo *Máster Universitario en Robotics, Graphics, and Computer Vision*. Esta propuesta ha sido liderada por los catedráticos Domingo Tardós y José Neira, en colaboración con los profesores Adolfo Muñoz, Ana Cris Murillo, y yo mismo. La propuesta ha sido recientemente aprobada en Junta de Escuela; idealmente, el máster podría comenzar en el curso 2019-2020.

La principal motivación ha sido la de intentar retener talento interesado en estos temas de investigación. Todos los años, tanto el grupo de robótica como el nuestro ve cómo muchos alumnos optan por irse a otras ciudades o incluso al extranjero ante la ausencia de un máster Universitario en Zaragoza que les anime a quedarse. Algunos hacen un máster adecuado a sus intereses fuera y vuelven, pero la mayoría ya no. Además, la creación de un máster como el aquí descrito puede ayudar de manera indirecta a otros, como el Máster de Ingeniería de Sistemas e Informática impartido en el Departamento, mediante la creación de asignaturas de especialización comunes u otras sinergias. Esta posible colaboración con el máster del Departamento está todavía en fase embrionaria de discusión en el momento de escribir esta memoria.

Se describe a continuación esta propuesta del *Máster Universitario en Robotics, Graphics, and Computer Vision*, tal y como se presentó a la Junta de Escuela en Abril de 2018.

### A.1. Datos básicos

**Título:** Máster Universitario en Robotics, Graphics and Computer Vision

**Órgano proponente:** EINA

**Órgano de gestión:** EINA

**ECTS Obligatorios:** 36

**ECTS Optativos:** 9

**ECTS Trabajo Fin de Máster:** 15

**ECTS totales:** 60

**Rama a la que se adscribirá el título:** Ingeniería y Arquitectura

**Relación con los grados ofertados por la UZ:** Por su carácter investigador y por la formación especializada en temas de robótica, visión por computador e informática gráfica, es un estudio de máster único en la UZ, que admitirá estudiantes de los siguientes grados:

- Ing. de Electrónica y Automática
- Ing. Tecnologías Industriales
- Ing. Mecatrónica
- Ing. Informática
- Ing. de Telecomunicaciones
- Ing. Eléctrica
- Ing. Mecánica
- Otros grados de ingeniería y ciencias

**Relación con los programas de doctorado de la UZ:** Se espera que un 50 % de los egresados cursen el programa de doctorado en Informática e Ingeniería de Sistemas.

**Modalidad de impartición:** Presencial.

**Idioma de impartición:** Inglés.

**¿Es título conjunto?** No.

**¿Puede dar lugar a una doble titulación?** No se contempla esa posibilidad.

**Nº de plazas ofertadas para alumnos de nuevo ingreso el primer año de implantación (año 0):** 15

**Nº de plazas ofertadas en los cursos sucesivos:** 30

**Justificación del nuevo estudio:** Esta justificación estará basada en los Criterios Generales y Criterios Específicos reflejados en el Artículo 2 y en el Anexo I del Acuerdo de 11 de noviembre de 2013, del Consejo de Gobierno de la Universidad de Zaragoza, de oferta, modificación y supresión de másteres de la Universidad de Zaragoza.

## **A.2. Criterios generales para la implantación de nuevos másteres**

### **A.2.1. Ejes Estratégicos definidos por la Universidad de Zaragoza**

Los sectores de la robótica, vehículos autónomos, drones, visión por computador, aprendizaje automático, informática gráfica, realidad virtual y aumentada (AR/VR), e imagen computacional están en fuerte expansión y tienen una enorme proyección futura, incluyendo aplicaciones de gran interés económico y social, tales como sistemas de ayuda

a la conducción, y sistemas de realidad aumentada para medicina. En la última década se ha producido un aumento continuo de la confluencia entre estos sectores: los vehículos autónomos necesitan técnicas de robótica y de visión para navegar, y se entrenan por aprendizaje automático en entornos virtuales; los sistemas de AR/VR usan técnicas de robótica y visión para aprender el entorno y estimar la posición del usuario; la imagen computacional combina técnicas de visión e informática gráfica para obtener y procesar imágenes imposibles de conseguir con métodos tradicionales... Sin embargo, prácticamente no existen másteres a nivel nacional ni internacional que ofrezcan una formación avanzada integrada que explote estas sinergias.

**a) Contribución de manera clara y decidida a la proyección y desarrollo profesional de los estudiantes, preferentemente en contacto con instituciones y empresas**

Actualmente la demanda de profesionales con formación avanzada en estos temas, capaces de investigar y desarrollar nuevas técnicas y productos, es enorme, y se prevé un aumento muy sostenido a medio y largo plazo. En la actualidad las empresas tecnológicas altamente innovadoras, nacionales e internacionales están muy interesadas por el perfil formativo propuesto. Se adjuntan cartas de interés de las siguientes empresas (no incluidas en este proyecto docente):

- España: Ábaco Digital, Atria Innovation, BitBrain, Exovite, EyeLinx, Gas Natural, Infaimón, IT Corporate, MyBrama, Robotnik, Scati Labs, Solid Angle, Tecnitop, Telnet.
- Internacionales: Adobe, Alibaba, Boeing, Disney, Epic Games, Google, Kuka, Meta, Microsoft, nuTonomy, Nvidia, Oculus VR, Panasonic.

En algunas de estas expresiones de interés se resalta que la escasez de profesionales formados en estas tecnologías es el principal factor limitante para el desarrollo de las mismas y que se prevé una demanda continuada en el futuro.

**b) Carácter transversal y novedoso en el planteamiento que suponga un impulso a la innovación, la investigación y el desarrollo en ámbitos relevantes de la actividad económica, profesional o académica**

El máster propuesto tiene como objetivo general proporcionar una formación en investigación, desarrollo, e innovación especializada en tres disciplinas cruciales para concebir y desarrollar sistemas y aplicaciones en los ámbitos de:

- La robótica, que estudia el desarrollo y funcionamiento de sistemas articulados y/o móviles autónomos,
- La visión por computador, que estudia técnicas de procesamiento de imágenes digitales para extraer información útil de ellas,
- La informática gráfica, que estudia técnicas de modelado y representación de imágenes y entornos virtuales.

Claramente estas tres disciplinas tienen importantes sinergias. A diferencia de otros másteres nacionales y europeos, este título tiene la vocación decidida de explotar es-

tas sinergias, ofreciendo una formación interdisciplinar que prácticamente no aparece en otras ofertas de másteres de iniciación a la investigación. Se prevé que una parte significativa de los egresados del máster propuesto realice estudios de doctorado en temas relacionados. Tanto durante la realización de las tesis doctorales como en periodos postdoctorales, los investigadores que proponen el máster colaboran de manera asidua con algunas de las instituciones académicas más reconocidas a nivel internacional, entre las que se encuentran MIT, Stanford, Berkeley, Yale, UC San Diego, U. Pennsylvania, Oxford, Imperial College, ETH Zurich, KTH Stockholm, TU Munich, U. Friburgo, I. Max Planck, U. Roma La Sapienza, U. Sydney... Las diferencias principales con otros títulos de máster ofertados por la Universidad de Zaragoza radican en que este máster ofrecerá una formación especializada en los ámbitos de la robótica, la visión por computador y la informática gráfica, y en su orientación de investigación, desarrollo e innovación. En este sentido, este máster complementa la oferta actual de la Universidad de Zaragoza en la macroárea de Ingeniería y Arquitectura, que ofrece másteres profesionales con enfoque generalista, siendo los más próximos a esta propuesta los de Ingeniería Industrial, Ingeniería de Telecomunicaciones, e Ingeniería Informática, y másteres especializados en temas en los que la Universidad de Zaragoza puede ofrecer conocimiento propio y diferenciado, tales como Ingeniería Biomédica, o Energías Renovables y Eficiencia Energética. El máster propuesto se enmarcaría dentro de este segundo grupo.

**c) Relevancia o excelencia académica avalada por un reconocimiento nacional o internacional en propuestas en las que la Universidad de Zaragoza esté en disposición de ofrecer un conocimiento propio y diferenciado o unas oportunidades de aprendizaje capaces de atraer a estudiantes formados en otras comunidades y países**

Con una trayectoria de más de 30 años, el Grupo de Robótica de la Universidad de Zaragoza es el grupo de investigación de España con mayor impacto internacional en el ámbito de la robótica y uno de los de mayor impacto de Europa. Es el grupo español más citado a nivel mundial según el ISI WEB, incluyendo siete de los diez artículos más citados de la robótica española, entre los cuales está el artículo más citado de la robótica mundial de los últimos cinco años (JD Tardós, JM Martínez Montiel). El Graphics and Imaging Lab, de creación mucho más reciente, ya tiene un gran reconocimiento nacional e internacional: ha recibido una de las pocas ERC Consolidator Grants de la Unión Europea en temas de informática gráfica (D. Gutiérrez, también candidato a Aragonés del año 2018), y alberga a la primera investigadora española que recibe el Eurographics Young Researcher Award (B. Masiá). La excelencia y reconocimiento internacional de ambos grupos hacen que la Universidad de Zaragoza esté en una posición única para ofrecer este título, que sin duda atraerá estudiantes de otras comunidades y de otros países. El Máster se impartirá totalmente en inglés, para potenciar la demanda por parte de alumnos extranjeros. En la actualidad, la oferta de docencia en inglés tiene una altísima demanda entre los estudiantes de las instituciones socias de los programas de movilidad, lo que hace previsible el aumento del número de los estudiantes que vienen a la UZ, contribuyendo así a mejorar el balance de los acuerdos, y por tanto la estabilidad

y futuro de los mismos.

**d) Implantación de estudios interuniversitarios en el contexto de alianzas estratégicas como Campus Iberus o Campus Transfronterizo EBROs**

El Grupo de Robótica tiene una larga trayectoria de colaboración con el Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) en Toulouse, incluyendo proyectos de investigación conjuntos (FP7), estancias de investigación, y participación en tribunales doctorales. A través del LAAS, se propondrá la firma de un acuerdo de movilidad de estudiantes y de profesores, en el marco del programa Erasmus+, con la universidad asociada al LAAS, l'Université Paul Sabatier, para el máster Robotique: Décision et Commande (120 ECTS). La EINA ya tiene un acuerdo de movilidad con esta universidad para algunos de sus grados y másters, por lo que la ampliación de este acuerdo se considera altamente viable.

**e) Dimensión internacional en las actividades y acciones de movilidad que se ofrecen a los estudiantes o al profesorado implicado en el estudio**

La EINA tiene una amplia tradición de participación activa en programas de movilidad: una cuarta parte de los acuerdos de la UZ con otras universidades (más de 300) son para estudios en la EINA. En este programa de máster se continuará y profundizará en actividades de movilidad, estableciendo acuerdos específicos para la movilidad de estudiantes y profesores, principalmente (pero no solo) a través del programa Erasmus+. Entre otros, los siguientes son los estudios para los que se propondrán acciones de movilidad:

- Massachusetts Institute of Technology Master Program in Electrical Engineering and Computer Science (120 ECTS)
- Yale University Master Program in Computer Science (120 ECTS)
- Oxford University, MSc by Research in Engineering Science (120 ECTS)
- Imperial College London, MSc Visual Computing and Robotics (60 ECTS)
- ETH Zurich, Master Programme in Robotics, Systems and Control (90 ECTS)
- KTH Stockholm, Master Programme in Machine Learning (120 ECTS), Master Programme in Systems, Control and Robotics (120 ECTS)
- Università di Pisa, Master in Computer Engineering, specialization in Automated Systems and Robotics (120 ECTS)
- TU Munich, Masters Programme in Robotics, Cognition and Intelligence (120 ECTS)
- University of Freiburg, Master of Science Embedded Systems Engineering (120 ECTS)
- TU Vienna, Master Program Visual Computing (120 ECTS)
- Università Roma La Sapienza, Master of Science in Engineering in Artificial Intelligence and Robotics (120 ECTS)
- Technical University of Denmark, MSc Eng Mathematical Modeling and Computation - Image Analysis and Computer Graphics (120 ECTS)
- Max-Planck Institut Informatik Master of Science in Visual Computing (through Saarland University (120 ECTS)

- University of Sydney, Master Program in Robotics and Intelligent Systems (120 ECTS)

De manera similar al punto d), es importante recalcar que los grupos de investigación que proponen este máster tienen estrechos lazos de colaboración con los correspondientes grupos de investigación en las universidades con las que se propone colaborar, incluyendo proyectos de investigación conjuntos, estancias de investigación, y publicación de artículos conjuntos. La EINA tiene ya acuerdos de movilidad con algunas de estas instituciones para alguno de los estudios que ya ofrece, por lo que la ampliación de estos acuerdos se considera altamente viable. Se adjuntan cartas de interés en el máster de la gran mayoría de estas instituciones (no incluidas en este proyecto docente).

### **A.2.2. Demanda de estudiantes suficiente para justificar su implantación y continuidad**

Se ha realizado una encuesta online a los alumnos de la EINA que cursan asignaturas relacionadas, preguntando si tendrían interés en cursar este máster y se han recibido 197 respuestas positivas. Para estimar la demanda previsible por año, el número de alumnos que están actualmente en tercer curso y están interesados en cursarlo, a los que habría que añadir alumnos de Ingeniería Informática y de Ingeniería en Electrónica y Automática de la EUPT, y de Ingeniería Mecatrónica de la EUPLA, es el siguiente:

- Ingeniería Electrónica y Automática: 38
- Ingeniería de Tecnologías Industriales: 25
- Ingeniería Informática: 17
- Ingeniería Mecánica: 12
- Otros: 8
- **Total: 100**

Los grupos de investigación que respaldan el Máster ofrecerán financiación para que cinco alumnos que cursen el máster puedan colaborar en diferentes proyectos a través de empresas o de los propios grupos de investigación. Esto aumentará el atractivo del Máster para alumnos con excelente currículum de otras universidades.

### **A.2.3. Coherencia en su diseño interno, entendida como el correcto alineamiento de la organización, plan de estudios y recursos necesarios con unos objetivos de aprendizaje claros y relevantes.**

El objetivo del Máster es proporcionar una formación de investigación y desarrollo en los ámbitos de robótica, visión por computador e informática gráfica. Tanto las competencias generales y específicas como el programa deberá ser desarrollado en la correspondiente memoria de verificación por la Comisión nombrada a tal efecto. A título orientativo su trabajo podría partir del siguiente esquema:

**Competencias generales:**

- Adquirir los conocimientos avanzados en los temas del máster que les permitan ser innovadores en un contexto de investigación, desarrollo e innovación.
- Saber aplicar los conocimientos adquiridos y su capacidad de resolución de problemas en entornos nuevos o desconocidos.
- Saber comunicar sus resultados de investigación en inglés a públicos especializados y no especializados de un modo claro.
- Poseer habilidades de aprendizaje que les permitan continuar estudiando e investigando de forma autónoma.

**Competencias específicas:**

- Capacidad para aplicar métodos matemáticos y de inteligencia artificial para modelar, diseñar y desarrollar sistemas y aplicaciones de robótica, de visión por computador y de informática gráfica.
- Capacidad para diseñar y desarrollar nuevos métodos y algoritmos aplicables a sistemas autónomos o de realidad virtual y aumentada.
- Capacidad de aplicar técnicas de aprendizaje automático para la comprensión del entorno en el que operan sistemas móviles autónomos, y para la mejora de su comportamiento.
- Capacidad para aplicar sistemas de computación de altas prestaciones y métodos numéricos o computacionales a problemas de robótica, visión por computador e informática gráfica.
- Capacidad para comprender los fenómenos de transporte de luz y aplicarlos al desarrollo de nuevas técnicas de imagen computacional.

**Asignaturas obligatorias:** se plantea un grupo de asignaturas de 6 créditos ECTS que cubran los siguientes temas:

- Autonomous Robots
- Multirobot Systems
- Machine Learning, Neural Networks and Deep Learning
- Visual Perception and Understanding
- 3D Computer Vision
- Light Transport Algorithms
- Computational Imaging
- High Performance Architectures for Robotics and Graphics
- Applications: Virtual and Augmented Reality, Autonomous Vehicles, Drones...
- Conducting Research, Development and Innovation

**Asignaturas optativas:** dado el carácter investigador del máster, se plantea un pequeño conjunto de asignaturas optativas de 3 créditos ECTS, para ofrecer de forma dinámica temas de investigación emergentes, o prácticas en empresas o laboratorios de investigación.

El **Trabajo Fin de Máster** (TFM) equivalente a 15 créditos ECTS, tiene por objetivo desarrollar un trabajo de iniciación a la investigación. El resultado se plasmará en una memoria en forma de artículo de investigación, escrito en inglés, y su defensa consistirá en la presentación de dicho trabajo de la misma forma que se presenta en los congresos especializados en los temas del máster. El TFM podrá llevarse a cabo en la EINA, en una empresa asociada al programa de Máster (BitBrain, Libelium, Exovite, ScatiLabs, Google, Facebook, Intel...), o en una de las universidades con las que se establezcan acuerdos de movilidad.

#### **A.2.4. Viabilidad económica y suficiencia y capacidad de los recursos humanos, tanto PDI como PAS, e instalaciones existentes**

##### **PDI:**

La mayor parte de la docencia será impartida por profesores de los grupos de investigación que respaldan el Máster, con colaboraciones puntuales de otro profesorado, incluyendo profesores visitantes invitados de otras universidades o empresas. El profesorado pertenece a las áreas de Ingeniería de Sistemas y Automática (55 %), Lenguajes y Sistemas Informáticos (40 %) y Arquitectura de Computadores (5 %). La composición estimada del profesorado es de 6 Catedráticos, 9 Titulares y Contratados Doctor, y 3 Ayudantes Doctor, con un total aproximado de 41 sexenios de investigación y 51 quinquenios docentes. Estos profesores son investigadores que tienen amplia experiencia en la impartición de docencia en inglés en todo el mundo sobre temas relacionados con el máster: en tutoriales de congresos internacionales, cursos internacionales, escuelas de verano, charlas invitadas, y en estudios similares tales como másteres Erasmus-Mundus. Como se pone de manifiesto en muchas de las cartas de interés adjuntas, también se prevé la participación de un número significativo de profesores invitados de otras instituciones, así como de profesionales de empresas relevantes del sector. Su participación se prevé alrededor de 20 horas lectivas al año. Según el modelo contable de la Universidad, para los 15 alumnos previstos el primer año, la impartición del Máster requiere un esfuerzo docente de unas 650 horas, más la dirección de los trabajos Fin de Máster. Los profesores no cuentan con holgura significativa en su POD, pero sí con reducciones por investigación del programa Dedicada, que están dispuestos a invertir en la impartición del Máster. Para el segundo año se propone contratar un Profesor Ayudante Doctor, condicionado a que la demanda del primer año haya alcanzado los 20 alumnos, permitiendo aumentar la admisión a 30 alumnos, y garantizando de esta forma que el Máster sea autosuficiente económicamente. Además de lo expuesto, la Figura A.1 resume los principales indicadores de I+D+i de los dos grupos de investigación que dan soporte al Máster propuesto.

##### **PAS:**

La EINA tiene actualmente 6000 estudiantes, por lo que los 30 estudiantes adicionales del máster no suponen un incremento de necesidades de PAS significativo.

##### **Recursos Materiales:**

Para la mayor parte de las clases y trabajos prácticos se utilizarán los recursos ya dis-

## A.2. CRITERIOS GENERALES PARA LA IMPLANTACIÓN DE NUEVOS MÁSTERES 83

Indicadores I+D+I del período 2012-2017	Robótica, Percepción y Tiempo Real	Graphics and Imaging Lab
Grupo de Investigación reconocido DGA	T45_17R	T34_17R
Número de investigadores	41	10
Publicaciones en revistas indexadas	117	52
Publicaciones en congresos y conferencias	178	43
Libros o capítulos en libro	17	-
Proyectos europeos o internacionales	7	6
Proyectos nacionales	36	4
Proyectos de transferencia	17	1
Patentes concedidas y licencias de software en explotación	6	1
Redes europeas y nacionales	9	-
Tesis doctorales defendidas	26	7
Estancias de investigación en laboratorios externos	49	14
Pertenencia a consejos editoriales y cargos en instituciones de investigación	70	6

Figura A.1: Indicadores de la actividad de I+D+I de los últimos cinco años de los dos grupos involucrados en la propuesta.

ponibles, tanto en los laboratorios de investigación en el I3A de los grupos involucrados en el máster, como espacios disponibles en la EINA. De especial importancia son los materiales relacionados con computación de altas prestaciones disponibles en los grupos de investigación (clusters para computación, FPGAs, GPUs, ...), así como cámaras y otros dispositivos necesarios para las aplicaciones objetivo (gafas de realidad virtual y aumentada, plataformas robóticas, cámaras digitales sistema de captura de movimiento) que podrán utilizar los alumnos del máster en distintas prácticas y proyectos.

### **Inserción laboral:**

En la actualidad los investigadores en formación de los grupos de investigación que proponen este máster cursan el Programa de Doctorado en Ingeniería de Sistemas e Informática, que será continuación natural de los estudiantes del máster propuesto. Los egresados más recientes de este programa se han incorporado inmediatamente a las empresas y centros de investigación locales, nacionales, e internacionales antes mencionadas, entre los que se incluyen:

- Antonio Agudo (IRII, CSIC)
- Jorge Albericio (Nvidia)
- Oscar Ansón (Solid Angle / Autodesk)
- César Cadena (ETH Zurich)
- Ana B. Cambra (BSH)

- Henry Carrillo (U. Sergio Arboleda)
- Alejo Concha (Google)
- José Ignacio Echeverría (Adobe Systems)
- Carlos Escolano (Bitbrain)
- Dorian Gálvez (Intel)
- Elena Garcés (Technicolor)
- Oscar García (EyeLynx)
- José A. Iglesias (Disney Research)
- Iñaki Iturrate (EPF Lausanne)
- Jorge Jiménez (Activision Blizzard)
- Yasir Latif (U. Adelaide)
- Maite Lázaro (U. la Sapienza)
- Eduardo López (U. Tübingen)
- Raúl Mur (Oculus VR)
- Fernando Navarro (Telefónica I+D)
- Lina Paz (Intel)
- Pedro Piniés (Intel)
- Alejandro Rituerto (Mybrana)
- Marta Salas (Accenture)

## Bibliografía

- [adC06] Guía académica del CPS 2004/2005. <http://www.cps.unizar.es/docs/>, (accedido el 10 de mayo de 2006).
- [Ae07] Proyecto Alfin-eees. <http://www.mariapinto.es/alfineees>, (accedido el 10 de septiembre de 2007).
- [Ber] J.L. Bernal. Pautas para el diseño de una asignatura desde la perspectiva de los ects.
- [BOE18] BOE. Real decreto 1393/2007. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-18770>, 2007 (accedido el 24 de abril de 2018).
- [CGR02] Raquel Martínez Unanue Carlos Gregorio Rodríguez, Ángel Herranz Nieva. Computing curricula 2001. *Novatica/Upgrade*, (157):47–54, mayo/junio 2002.
- [Cru03] MA Cruz. Necesidades y objetivos de la formación pedagógica del profesor universitario. *Revista de Educación*, 331, 2003.
- [CUN18] CUNALIX. Historia de las universidades. <http://campus.usal.es/alfonix/GIR/historia/historia.htm>, 1998 (accedido el 27 de abril de 2018).
- [dB] Declaración de Bolonia. Espacio europeo de educación superior. <http://www.eees.es>.
- [dN07] Universidad Pública de Navarra. [www.unavarra.es/eees](http://www.unavarra.es/eees), (accedido el 10 de septiembre de 2007).
- [Eur99] European Ministers of Education. The Bologna Declaration, June 1999.

- [FHF<sup>+</sup>17] Luca Fascione, Johannes Hanika, Marcos Fajardo, Per Christensen, Brent Burley, and Brian Green. Path tracing in production - part 1: Production renderers. In *ACM SIGGRAPH 2017 Courses*, SIGGRAPH '17, pages 13:1–13:39, 2017.
- [For06a] ACM/IEEE-CS Joint Curriculum Task Force. <http://www.acm.org/education/curricula.html>, (accedido el 28 de abril de 2006).
- [For06b] ACM/IEEE-CS Joint Curriculum Task Force. <http://www.computer.org/education/cc2001/index.htm>, (accedido el 28 de abril de 2006).
- [FSES14] Jeppe Revall Frisvad, Lars Schjøth, Kenny Erleben, and Jon Sporning. Photon differential splatting for rendering caustics. In *Computer Graphics Forum*, volume 33, pages 252–263. Wiley Online Library, 2014.
- [Gar06] Félix García. El sistema universitario español: breve referencia a sus aspectos básicos, <http://universidades.universia.es/info-general/sistema-universitario/index.htm> (accedido el 12 de marzo de 2006).
- [GJJD09] Diego Gutierrez, Henrik Wann Jensen, Wojciech Jarosz, and Craig Donner. Scattering. In *SIGGRAPH ASIA Courses*. ACM, 2009.
- [Gue17] Jose Guerrero. *Proyecto Docente*. Universidad de Zaragoza, 2017.
- [Gut06] Diego Gutiérrez. *Proyecto Docente*. Universidad de Zaragoza, 2006.
- [HKWB09] Miloš Hašan, Jaroslav Křivánek, Bruce Walter, and Kavita Bala. Virtual spherical lights for many-light rendering of glossy scenes. *ACM Trans. Graph.*, 28(5), 2009.
- [HOJ08] Toshiya Hachisuka, Shinji Ogaki, and Henrik Wann Jensen. Progressive photon mapping. *ACM Trans. Graph.*, 27(5), 2008.
- [JC98] Henrik Wann Jensen and Per H Christensen. Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 311–320. ACM, 1998.
- [Jen96] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In *Rendering Techniques*, Eurographics, pages 21–30. Springer, 1996.
- [JMMn<sup>+</sup>14] Adrian Jarabo, Julio Marco, Adolfo Muñoz, Raul Buisan, Wojciech Jarosz, and Diego Gutierrez. A framework for transient rendering. *ACM Trans. Graph.*, 33(6), 2014.
- [Kaj86] James T. Kajiya. The rendering equation. In *Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH)*, 1986.

- [KD13] Anton S. Kaplanyan and Carsten Dachsbacher. Adaptive progressive photon mapping. *ACM Trans. Graph.*, 32(2), 2013.
- [Kel97] Alexander Keller. Instant radiosity. In *SIGGRAPH '97*, 1997.
- [KZ11] Claude Knaus and Matthias Zwicker. Progressive photon mapping: A probabilistic approach. *ACM Trans. Graph.*, 30(3), 2011.
- [Las00] F. Lasnier. *Réussir la formation par compétences*. 2000.
- [Mar10] Manuel Martínez. *La formación del profesorado universitario*. Ministerio de Educación y Ciencia, 2010.
- [MBGS15] Ricardo Martín-Brualla, David Gallup, and Steven M. Seitz. Time-lapse mining from internet photos. *ACM Trans. Graph.*, 34(4):62:1–62:8, July 2015.
- [MCPG11] Belen Masia, Adrian Corrales, Lara Presa, and Diego Gutierrez. Coded apertures for defocus deblurring. In *SIACG*, 2011.
- [MPCG12] Belen Masia, Lara Presa, Adrian Corrales, and Diego Gutierrez. Perceptually-Optimized Coded Apertures for Defocus Deblurring. *Computer Graphics Forum*, 31(6), 2012.
- [Muñ18] Adolfo Muñoz. *Proyecto Docente*. Universidad de Zaragoza, 2018.
- [Par13] Javier Paricio. Propuestas para la renovación de las metodologías educativas. Instituto de Ciencias de la Educación (ICE) de la Universidad de Zaragoza, Un modelo de guía docente desde los resultados de aprendizaje y su evaluación (accedido el 9 de julio de 2013).
- [PMG12] Lara Presa, Belen Masia, and Diego Gutierrez. Perceptually-motivated coded apertures. *International Conference on Computational Photography (poster)*, 2012.
- [RDGK12] Tobias Ritschel, Carsten Dachsbacher, Thorsten Grosch, and Jan Kautz. The state of the art in interactive global illumination. *Comput. Graph. Forum*, 31(1):160–188, February 2012.
- [RS06] Luis E. Rodríguez-Sanpedro. Los orígenes de la universidad. Centro de Historia Universitaria Alfonso IX, Universidad de Salamanca, <http://universidades.universia.es/info-general/historia/marco.htm> (accedido el 11 de marzo de 2006).
- [Ser03] Francisco J. Serón. *Proyecto Docente*. Universidad de Zaragoza, 2003.
- [Sil86] Bernard W. Silverman. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Taylor & Francis, 1986.

- [UNE18] UNESCO. Conferencia mundial sobre la educación superior. [http://www.unesco.org/education/educprog/wche/declaration\\_spa.htm](http://www.unesco.org/education/educprog/wche/declaration_spa.htm), 1998 (accedido el 27 de abril de 2018).
- [Uni18] Universidad de Zaragoza. Historia. <https://www.unizar.es/institucion/historia/historia>, 2018 (accedido el 27 de abril de 2018).
- [VWJ<sup>+</sup>13] Andreas Velten, Di Wu, Adrian Jarabo, Belen Masia, Christopher Barsi, Chinmaya Joshi, Everett Lawson, Mounqi G. Bawendi, Diego Gutierrez, and Ramesh Raskar. Femto-photography: Capturing and visualizing the propagation of light. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2013)*, 32(4), 2013.
- [Whi80] Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. *Commun. ACM*, 23(6):343–349, June 1980.
- [WHSG97] Bruce Walter, Philip M. Hubbard, Peter Shirley, and Donald P. Greenberg. Global illumination using local linear density estimation. *ACM Trans. Graph.*, 16(3):217–259, July 1997.
- [XXI18] Studia XXI. ¿sobran universidades en españa? <http://www.universidadsi.es/sobran-universidades-espana/>, 2017 (accedido el 27 de abril de 2018).
- [ZBN<sup>+</sup>18] Javier Zarazaga, Ruben Bejar, Javier Nogueras, Miguel A. Latre, and Pedro Muro. Diseño curricular de la materia común de ingeniería software en el nuevo título de grado de ingeniería informática. <http://innovaciondocente.unizar.es/convocatorias09/documentos/122Resultados.pdf>, 2010 (accedido el 27 de abril de 2018).
- [Ál02] Víctor Álvarez. *Calidad de las Universidades y Orientación Universitaria*. 2002.