



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Diseño y desarrollo tridimensional para la  
investigación de algoritmos robustos de  
simulación de transporte de luz

Three-dimensional development and design for  
research on robust light transport simulation

Autor

Cristina Tirado Soriano

Director

Adrián Jarabo Torrijos

Ponente

Diego Gutiérrez Pérez

EINA  
2016



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. CRISTINA TIRADO SORIANO,

con nº de DNI 0546592X en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto, (Título del Trabajo)  
Diseño y desarrollo tridimensional para la investigación de algoritmos  
robustos de simulación de transporte de luz

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 1 de Septiembre de 2016

Fdo: Cristina Tirado Soriano

# RESUMEN

Hoy en día, las imágenes generadas por ordenador están presentes en casi todos los sectores de la sociedad, incluyendo ingeniería, diseño de producto, imagen médica, publicidad, y en especial, en el sector audiovisual, en el que además de producciones de animación tridimensional; maquillajes, escenarios o efectos especiales contruidos físicamente, han sido sustituidos por réplicas virtuales integradas en el film. La necesidad de obtener escenas cada vez más realistas ha motivado a un desarrollo de la informática gráfica que ha evolucionado hasta cambiar el paradigma de cómo se generan las imágenes: de los primeros algoritmos, en los que el realismo se conseguía mediante la intervención de los artistas, se ha pasado a algoritmos capaces de simular, de forma precisa, el comportamiento de la luz, en lo que se ha denominado el render basado en física.

El render basado en física ha supuesto una gran mejora permitiendo a los artistas obtener unos resultados, además de coherentes, mucho más parecidos a la realidad gracias a la simulación física de los materiales, apariencias e iluminación. El coste elevado de computación derivado de la simulación precisa del transporte de luz, está acentuado por las cada vez más complejas representaciones de apariencia, que aumentan la dificultad de la simulación, y por tanto, su coste. Debido a que es difícil prescindir de estas apariencias o efectos para obtener una escena realista, la investigación de algoritmos robustos capaces de simular este tipo de transporte de luz complejo sigue siendo un área de investigación muy activa dentro de la informática gráfica.

Este proyecto trata de proveer a dicha investigación con una serie de escenas que resultes extremadamente complejas para el estado del arte actual, como ayuda al desarrollo de nuevos algoritmos. Para ello nos centramos en dos puntos fundamentales; en primer lugar, diseñar esas escenas tridimensionales en base a un proceso de desarrollo de conceptos, modelado, asignación de materiales y estudios de luz, basado en unos requerimientos en los que se han determinado las cualidades que toda escena compleja para el transporte de luz deba poseer, y en segundo lugar, verificar su complejidad mediante una serie de tests en los que renderizamos la escena usando los algoritmos de render que representan el estado del arte. Estos tests se hacen bajo unas condiciones de luz específicas; con iluminación natural, iluminación artificial y una combinación de iluminación natural y artificial, utilizando el motor de render Mitsuba, que implementa gran cantidad de algoritmos para realizar pruebas comunes, y representa el estado del arte dentro de la investigación en algoritmos de render.

Una vez probados cada algoritmo para cada tipo de escena y de iluminación, se discuten sus puntos fuertes y débiles, centrándonos en cómo se distribuye el error a lo largo de la escena, y obteniendo así unas conclusiones en las que se ve qué algoritmo es mejor bajo según qué circunstancias. A partir de ahí, se realiza una selección del algoritmo óptimo para cada escena en concreto. Por último, se realizan renders finales sin errores utilizando en conocimiento adquirido.

El proyecto se ha realizado dentro del Graphics and Imaging Lab, en el marco de un proyecto de investigación en el transporte de luz robusto, con el objetivo de proveer de escenas suficientemente complejas como campo de pruebas.

A mamá y a papá, porque sé que nada les va a hacer más ilusión,

A JA, porque horas y horas de charlas sobre diseño van a dar su fruto,

A mi hermana Bea, porque es imposible tener una hermana mejor,

A Juan, por su paciencia y cariño, y porque puede que sus charlas informáticas hayan surtido algún efecto,

A Andrea, Marina, Ana y a mis amigos del basket, porque no pueden molar más,

A mi primo Álvaro, por las tardes de verano encerrados en casa jugando a videojuegos,

A Cheve, Carlos, y Elena, por todo lo que me han ayudado y porque ha sido un placer conocerles, me llevo buen material a casa



# ÍNDICE

## Capítulo 1 – Introducción

1.1 Motivación y Contexto	8
1.2 Objetivos y Resultados	8

## Capítulo 2 - Conocimiento Previo

2.1 Render Basado en Física y Transporte de luz	11
2.2 Modelado de Apariencia	12
2.3 Algoritmos de Render	13

## Capítulo 3 - Metodología y Herramientas

3.1 Metodología	16
3.2 Herramientas	17

## Capítulo 4 – Requerimientos

4.1 Realismo	19
4.2 Caminos de Luz Complejos	19
4.3 Iluminación	19
4.4 Materiales	20

## Capítulo 5 – Escena Baño: Diseño y Desarrollo

5.1 Fase 1. Generación de Ideas y Conceptos	22
5.2 Fase 2. Modelado y Ensamblaje	26
5.3 Fase 3. Iluminación	27

## Capítulo 6 – Escena Salón: Diseño y Desarrollo

5.1 Fase 1. Generación de Ideas y Conceptos	31
5.2 Fase 2. Modelado y Ensamblaje	35
5.3 Fase 3. Iluminación	36

## Capítulo 7 – Resultados y Discusión

7.1 Pruebas de Algoritmos de Render	40
7.2 Discusión	42
7.3 Renders finales	43

## Capítulo 8 – Conclusiones

8.1 Trabajo Futuro	45
8.2 Conclusiones Personales	45

## Capítulo 9 – Referencias y Bibliografía

48

## ANEXO 1 – Escena Baño: Diseño y Desarrollo

49

## ANEXO 2 – Escena Salón: Diseño y Desarrollo

69

## ANEXO 3 – Resultados y Discusión

88

# Introducción

1

Las imágenes generadas por ordenador están hoy día presentes en prácticamente todos los sectores de la sociedad: desde entretenimiento y aprendizaje, hasta sectores industriales o incluso en medicina, se hace uso de este tipo de imágenes. Este crecimiento ha venido en parte de las mejoras tecnológicas que ha sufrido el campo, permitiendo imágenes de un realismo, o expresividad, sin precedentes en tiempos razonables. Sectores como la arquitectura o el diseño industrial se han beneficiado de ciclos de prototipado más rápidos, así como de ilustraciones más expresivas y fáciles de generar para, p.ej., publicidad, incluyendo campañas publicitarias sobre la venta de coches, o el catálogo de IKEA, en el que un porcentaje muy alto de sus fotografías han sido reproducidas digitalmente por un ordenador, evitándose construir prototipos y con la ventaja de poder modificar en tiempo real los posibles problemas que surjan sin refabricar.

Pero si hay un sector que se ha beneficiado especialmente del crecimiento de los gráficos por ordenador ha sido el sector audiovisual. Hoy día es raro encontrar películas sin al menos porciones de metraje digitales, abaratando los costes de escenas de efectos especiales y escenas de riesgo, y permitiendo generar escenarios o incluso personajes inexistentes en realidad. El ejemplo más paradigmático, por ser de los primeros, es el personaje de Gollum en la trilogía de El Señor de los Anillos.

Dirigidos por mejoras tecnológicas, las necesidades dentro de industria han sufrido un proceso de evolución que les ha llevado a modificar su trabajo con los motores de renderizado. Estos motores son los encargados de pasar la descripción de la escena (geometría, apariencia, luces) a una imagen o vídeo. Así, se ha pasado de una tendencia centrada en buscar el realismo a través de una tediosa intervención manual, con unos enormes costes en personal, a una profundización en el realismo basado en una simulación precisa del comportamiento físico de la luz en la realidad. Esta tendencia ha llevado a la adopción del llamado render basado en física (PBR, *Physically-Based Rendering*), que realiza una simulación del transporte de luz en una escena tridimensional basado en las propiedades físicas de la luz y de los materiales empleados.

Pese a estar limitado por el hardware, PBR tiene una larga tradición en el mundo académico, donde se le considera el *ground truth* (la solución de referencia sobre la que nos comparamos) desde principios de los 80, y en campos como la arquitectura, su adopción en otras áreas con mayores costes, como el cine o el entretenimiento, ha sido muy lenta. Esto es en parte debido a la enorme complejidad geométrica usada en producción cinematográfica, así como la enorme cantidad de imágenes que se necesitan generar para una película. Esto ha llevado a que tecnología existente en los 70 y 80 no haya sido adoptada en producción hasta hace relativamente poco, cuando las grandes granjas de render son capaces de manejar los larguísimos procesos de cálculo (ver Figura 1).

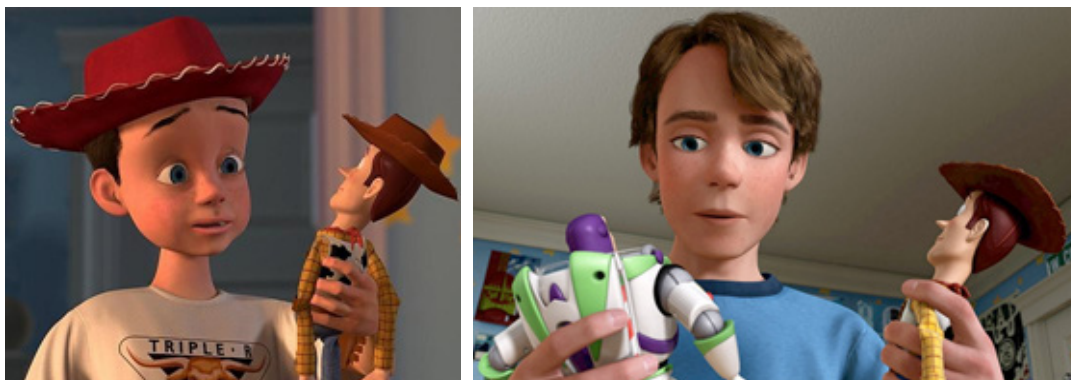


Figura 1.1. Comparativa gráfica del personaje Andy en las dos películas de animación Toy Story. A la izquierda, fotograma generado para *Toy Story* © 1995 Disney/Pixar, a la derecha, para *Toy Story 3* © 2010 Disney/Pixar. Destaca sobretudo el avance en el tipo de iluminación que influye sobre los distintos materiales (tejidos, etc) y en el pelo de los personajes.

Esta transición no es gratuita: el uso de PBR respecto de la tendencia anterior, más fenomenológica y basada en intervención artística, ha facilitado significativamente la vida a los artistas, permitiéndoles centrarse en el look final en lugar de realizar aproximaciones. Más importante aún, el hecho de contar con una cierta corrección física, ha favorecido la consistencia entre fotogramas, así como la coherencia de la apariencia bajo distintas condiciones de iluminación o ángulo de visión. Y por supuesto, la simulación realista de la luz, así como el uso de materiales y apariencias realistas, ha permitido una integración mucho más sencilla y visualmente consistente con *life action* (animación), favoreciendo la integración de efectos especiales digitales con metraje real.

Desafortunadamente, la incorporación de materiales, geometrías e iluminación realista no viene sin ningún coste: al contrario, materiales realistas como metales, cristal o piedra, generan efectos lumínicos de alta frecuencia muy complicados de simular, mientras que materiales orgánicos, telas o medios participativos como la niebla, tienen aspecto volumétrico, que requiere la simulación de la luz en su transporte dentro de estos materiales. La presencia de estas apariencias es fundamental para obtener escenas de apariencia realista, pero su coste es enorme. Esto hace que, pese a los más de 40 años de gráficos por ordenador, continúe habiendo investigación que va muy por delante de las técnicas usadas hoy en día, que facilitan una representación más precisa de la realidad gracias al conocimiento físico de la luz y los materiales, y sobretodo, una optimización constante de las técnicas de transporte de luz, con el objetivo de acercarse, cada vez más o más rápido, a la realidad (Figura 2).



Figura 1.2. Se observa cómo una imagen digital pasa a convertirse en un fotograma real de la película Toy Story 3, mediante la aplicación de distintas técnicas de render para modelar el comportamiento de la luz y provocar una apariencia de los materiales más sofisticada. Imagen obtenida de la página [cgchannel.com](http://cgchannel.com), Toy Story 3 © 2010 Pixar Animation Studios.

## 1.1 Motivación y Contexto

Los motores de render cada vez están más optimizados y aportan soluciones más precisas. Sin embargo, en el estado del arte todavía se pueden encontrar problemas, de modo que para conseguir una iluminación muy realista se debe prescindir de factores que afectan a la calidad final de la imagen, eliminando una variedad de materiales, de tipos de iluminación o de efectos lumínicos de gran importancia para el realismo, pero que incrementan significativamente el coste total. La necesidad de reducir la presencia de estos efectos ejemplifica la necesidad de continuar investigando en algoritmos robustos que sean capaces de poner solución u optimizar estos problemas.

El Trabajo Fin de Grado (TFG) se enmarca en un conjunto de proyectos de investigación centrados en el desarrollo de algoritmos de transporte de luz robustos que extiendan el rango de de apariencias complejas y caminos lumínicos soportados eficientemente, con independencia del tipo de materiales o iluminación utilizadas. Para ello, es necesario el uso de un conjunto de escenas lo suficientemente complejas y variadas como para demostrar la robustez del transporte de luz ante efectos de iluminación altamente complejos, así como a un número elevado de tipos de apariencia. El objetivo fundamental de este TFG es el desarrollo de dichas escenas, para lo cual se ha realizado que realizar un estudio de los puntos fuertes y débiles del estado del arte de algoritmos de simulación del transporte de luz. Una vez identificados dichos puntos fuertes y débiles, se han diseñado las escenas incluyendo caminos de luz altamente complejos, de modo que resulten un reto para dichos algoritmos, y se ha evaluado el rendimiento de dichos algoritmos basados en estas escenas.

## 1.2 Objetivos y Resultados

El objetivo principal del proyecto es generar escenas realistas con transporte de luz complejo, que sirvan de campo de pruebas para algoritmos de render, en el contexto de la investigación de métodos robustos de render.

- Aprendizaje sobre los tipos de materiales que existen en informática gráfica, así como sus propiedades, su apariencia y cómo se deben utilizar para simular los materiales de la vida real.

- Conocimiento a alto nivel sobre los algoritmos de render más comunes y utilizados en informática gráfica, incluyendo la capacidad para seleccionar el algoritmo óptimo en función del tipo de escena, los materiales que la definan, o el tipo de iluminación elegida.
- Basado en ese aprendizaje, se procede al diseño y desarrollo de escenas tridimensionales basadas en la complejidad geométrica y de iluminación, sobre las que se puedan aplicar dichos algoritmos.
- Renderizar las escenas 3D utilizando los conocimientos adquiridos sobre los algoritmos de renderizado y llevar a cabo una comparación de resultados.

Para la consecución de esos objetivos, hemos elaborado dos escenas interiores, con caminos de luz complejos (muy especulares), hemos probado distintos tipos de iluminación sobre ellos, y hemos ido testeando cada uno de los algoritmos de render en función del tipo de escena y de si su iluminación es natural, artificial, o natural y artificial. En la Figura 1.3 se puede observar una de las dos escenas, renderizada con iluminación artificial. Para conocer cuál ha sido el proceso de diseño de esta escena, el lector deberá recurrir a los Capítulos 5 y 6 (6, escena del salón), así como al Capítulo 7 en el que se discute qué algoritmo es mejor para el render de cada escena bajo sus condiciones y finalmente, se lleva a cabo el render.



Figura 1.3. Escena Baño con iluminación natural y artificial.

# Conocimiento Previo

2

Antes de comenzar con el desarrollo de este capítulo, se debe describir qué es el proceso de Rendering. El proceso de Rendering, es el de generar una imagen sintética (o un vídeo) a partir de la representación tridimensional de una escena. Aunque existen diversos estilos de renderizar dependiendo del objetivo final de la imagen, este proyecto se centra en el render basado en física.

El objetivo del render basado en física es reproducir cuál sería la apariencia de una escena si fuese construida y fotografiada. Esto involucra la simulación realista de cómo interacciona la luz con la materia. Pese a que el modelado de las interacciones entre luz y materia ha sido frecuentemente usado en óptica y física, su aplicación para generar imágenes fotorrealistas no fue posible hasta mediados de los 1980, cuando la capacidad computacional empezó a ser suficiente para simular los cálculos complejos, que todavía estaban limitados a escenas simples. La mejora en los algoritmos de simulación de transporte de luz y en hardware ha permitido incluir mayor complejidad en las escenas, incluyendo materiales complejos (p.ej. piel, telas,...), medios participativos (p.ej. humo o niebla) o cáusticas. Esto ha permitido reducir las diferencias entre la imagen sintética y la imagen real.

A continuación, se repasan los conceptos básicos usados en render basado en física, y se describen a alto nivel los algoritmos de transporte de luz más usados actualmente. Estos algoritmos serán luego discutidos usando las escenas desarrolladas en este trabajo. Debe considerarse que se da solamente una descripción a alto nivel de los mismos. Para detalles en la física, los fundamentos matemáticos, y los algoritmos, referimos al lector a otras fuentes, como el libro de Kurachi [Kur11].

## 2.1 Render Basado en Física y Transporte de Luz

Renderizar de forma físicamente probable una imagen es crucial para garantizar el realismo de la imagen generada. Sin embargo, requiere la simulación de las complejas interacciones entre luz y materia, así como reproducir de forma precisa estas interacciones. Sin entrar en detalle, y bajo de manera simplificada, la luz (es decir, un paquete de fotones) es emitida por una fuente de luz, y viaja libremente en línea recta hasta que interactúa con materia (por ejemplo, una superficie o una partícula suspendida en un medio). En esta interacción, la luz es absorbida o dispersada en otras direcciones, de modo que vuelve a viajar en espacio y a interactuar hasta llegar a la cámara (por ejemplo, el ojo humano) como muestra la Figura 2.1, [Rit11]. El cómo la luz interactúa con cada superficie o medio es lo que define la apariencia del objeto, y será discutido en la Sección 2.2.

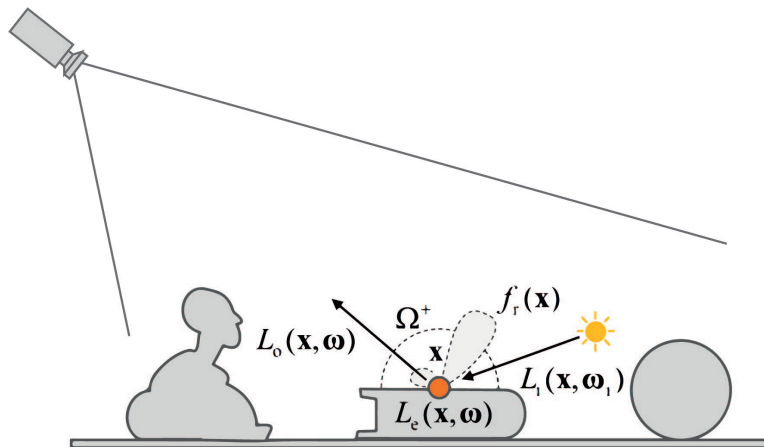


Figura 2.1. Recorrido de un rayo emitido por la fuente de iluminación, reflejado en las diferentes superficies de la escena, hasta que llega a la cámara.

Como se puede ver, es un proceso repetitivo, en el que la luz no sólo interactúa con una superficie y llega a la cámara, sino que también puede ser dispersada varias veces antes de iluminar la superficie vista por el sensor. Este tipo de iluminación es lo que se conoce como iluminación global (GI, del inglés global illumination). De esta manera, cada punto de la escena está iluminado por todas las otras superficies de la escena, resultando la iluminación en la suma (o integral) de toda la luz reflejada en ese punto, modelado por la Ecuación de Render. La Figura 2.2 muestra una fotografía con gran cantidad de efectos de iluminación directa (o local), e iluminación global, incluyendo luz difusa indirecta, reflejos especulares, cáusticas y transporte volumétrico en superficies translúcidas.



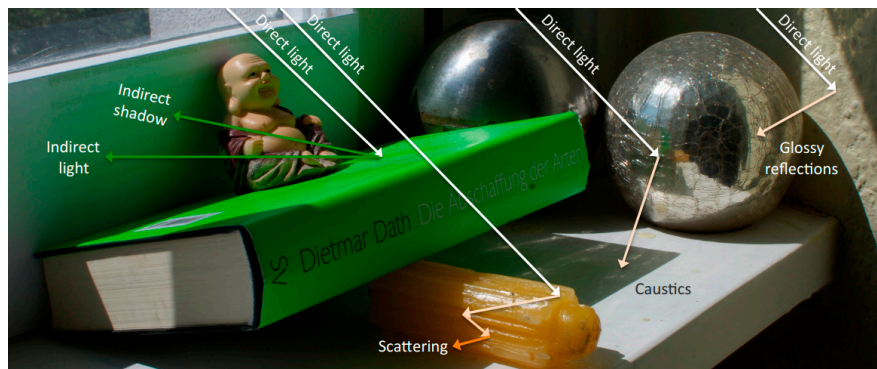


Figura 2.2 . Fotografía de una escena con iluminación global, múltiples rebotes difusos y especulares, cáusticas y dispersión. Obtenida de [Rit11].

## 2.2 Modelado de Apariencia

La apariencia de los objetos está definida por cómo interactúa con la luz; cómo la refleja o absorbe. Es importante modelar de forma realista estas interacciones para conseguir escenas realistas: incluso simulando el transporte de luz de forma muy precisa, si la apariencia de un objeto no está correctamente modelada, el resultado será poco realista.

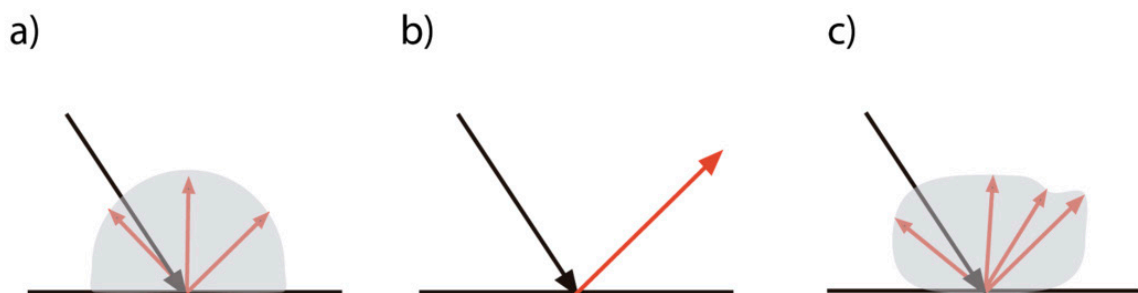


Figura 2.3 a) Reflexión Lambertiana: reflexión difusa ideal en la que la radiancia reflejada (en rojo) en un punto es idéntica en todas las direcciones del hemisferio de la superficie para una dirección de incidencia (en negro). b) Reflexión especular ideal o "reflexión espejo": perfecta superficie suave o smooth, como un espejo. c) Reflejo sobre superficies reales.

Para modelar la apariencia, en general, se utiliza el concepto de BSDF (del inglés bidirectional scattering function), que define cómo un punto, en una superficie, refleja y transmite la luz. En general, estas funciones de dispersión se suelen diferenciar entre difusas o Lambertianas, y especulares, de modo que las primeras tienen una apariencia más mate y las segundas más brillante (Figura 2.3). En realidad, la BSDF es una abstracción de las interacciones luz-materia a una escala microscópica: a esta escala, se asume que la superficie es un conjunto de pequeñas microfacetas con una reflectancia determinada (sin entrar en detalle, en general se distingue entre dieléctricos y conductores, con dispersión basada en las leyes de Fresnel, ver [Kur11] para detalles: cuanto mayor es la diferencia entre las microfacetas (más rugosa es la superficie), más difusa será su apariencia. Si por el contrario, la superficie es suave, entonces el reflejo especular será menos difuso y más claro. La Figura 2.4 muestra algunos ejemplos.

También es importante tener en cuenta que superficies transparentes (es decir, dieléctricas), generalmente son debidas a un cambio de medio. Ese medio, en la vida real, se suele dar como una superficie con apariencia más o menos translúcida. Así, si la superficie es poco translúcida (por ejemplo, madera) puede representarse como una superficie Lambertiana; sin embargo, si la translucencia aumenta (el caso de por ejemplo la piel o el mármol) es necesario tener en cuenta la apariencia volumétrica del material.

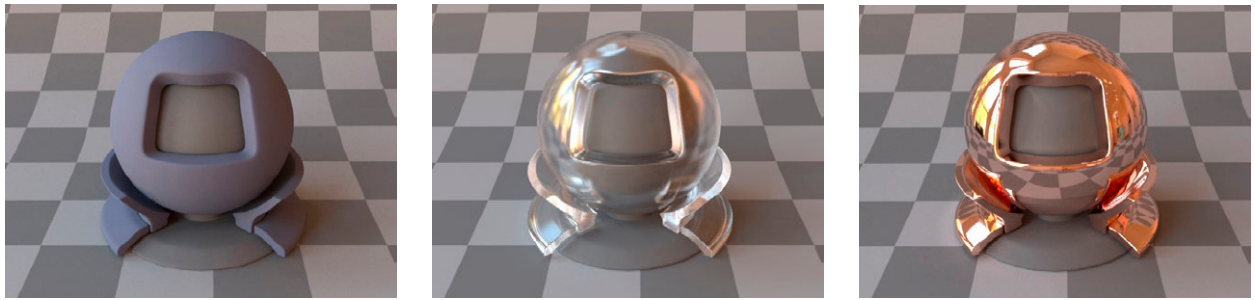


Figura 2.4. Imagen de la derecha, material lambertiano, difuso; a penas la luz produce ningún tipo de reflejo sobre él. Imagen del medio, material dieléctrico, traslúcido; la luz se refleja en él, atravesando también el medio. Imagen de la izquierda, material conductor; reflejo casi total de los elementos que se encuentran cercanos a él. Renderizado con Mitsuba.

## 2.3 Algoritmos de render

Como se ha explicado en la Sección 2.1, el objetivo al renderizar una escena es calcular la integral que define toda la luz reflejada en un punto. Aunque, desafortunadamente, esta integral no se puede calcular de forma analítica. Para resolverla, han sido propuestos numerosos algoritmos desde 1980 (ver [Kur11], [Jak14] para más detalles).

De estos algoritmos, los más usados hoy en día tanto en industria [Fx13] como academia, son aquellos basados en integración numérica, y más en particular, en integración estocástica, usando los llamados métodos por Monte Carlo. A grandes rasgos, estos métodos consisten en generar un conjunto de muestras de la integral que queremos calcular, y mediarlos para obtener nuestra solución. Así, si se utilizan pocas muestras, es muy posible que la solución que obtengamos tenga mucho ruido (varianza, ver Figura 2.5), el cual por la Ley de los Grandes Números desaparece según aumentamos el número de muestras. El objetivo entonces es tratar de encontrar un algoritmo que sea capaz de obtener una solución sin ruido en el menor tiempo posible. En este trabajo nos centramos en tres familias de algoritmos, todos ellos basados en integración por Monte Carlo: path tracing (PT), photon mapping (PM) y Metropolis Light Transport (MTL). Hemos seleccionado esta familia de algoritmos por ser los más presentes en industria hoy día (en el caso de PT), ser los más robustos sobre todos los caminos de iluminación (PM), y por sus buenas propiedades respecto a robustez y error (MTL), además de ser una de las principales vías de investigación en render basado en física.



Figura 2.5. Exceso de ruido en el render de una de las escenas tridimensionales diseñadas, Escena *Salón*, provocado por la pequeña cantidad de muestras empleadas a la hora de trazar caminos de luz. Se han empleado 8 muestras por píxel. Aumentando el número de muestras se obtiene inmediatamente una mejor calidad del render debido a su reducción de ruido, pero el tiempo de computación también aumenta significativamente como consecuencia.

# Path tracing

*Path tracing* (PT), propuesto en 1986 por Kajiya, muestrea caminos de luz desde la cámara hasta la luz, mediante lo que se conoce como un camino aleatorio (*random walk*). La idea es buscar de forma estocástica (mediante un proceso aleatorio) caminos de iluminación. Para ello, desde cada píxel de la cámara se busca la primera interacción de la luz con materia (la primera superficie visible, o una partícula suspendida en un medio participativo), mediante un proceso llamado trazado de rayos. En esta interacción, se elige aleatoriamente en qué dirección se reflejaría la luz, se actualiza la cantidad de luz que llegaría al sensor, y se vuelve a buscar la primera interacción en esa dirección. El proceso se repite hasta que se encuentra una fuente de luz.

Esta técnica tiene la ventaja de que converge a la solución exacta, y que calcula los caminos importantes desde el punto de vista de la cámara. Sin embargo, en condiciones de iluminación complejas, como las que queremos evaluar, falla. Para resolver este fallo parcialmente, se propuso la extensión bidireccional de esta técnica (*bidirectional path tracing*, BDPT). Esta extensión añade al camino generado desde la cámara, uno generado desde una fuente de luz en la escena, de modo que ambos caminos son conectados. El lanzar caminos desde ambas direcciones tiene la ventaja de que hace que la técnica converja más rápido que PT estándar en condiciones complejas, aunque aumenta el coste en escenas más simples.

# Photon mapping

Uno de los principales problemas de PT y sus variantes es que existen caminos lumínicos extramadamente complicados de encontrar (si no imposibles) por dichos algoritmos. Pongamos el ejemplo de un camino cáustico, producido por una lente: este camino se produce por la concentración de muchos caminos de luz en un sólo punto de una superficie. Desafortunadamente, dado que PT es un proceso estocástico, la probabilidad de encontrar un punto es casi nula.

En 1995, Jensen propuso para resolver este problema, entre otros cuantos, *photon mapping* (PM). La idea del algoritmo es similar a BDPT; generar dos caminos, desde la cámara y desde la luz. Sin embargo, en lugar de unir dichos caminos a la vez, los separó en dos fases: en la primera se generaban los caminos de luz, mediante el trazado de fotones, que modelaban la distribución de iluminación en la escena, y en la segunda se calculaba la iluminación desde las superficies visibles. Sin embargo, en esta segunda fase, en lugar de calcular la iluminación buscando fuentes de luz en la escena, lo que se hace es buscar los fotones más cercanos al punto iluminado, y mediar su contribución. Esto funciona en el transporte cáustico debido a que ahora, los caminos de luz que se concentran en un solo punto son también encontrables por los puntos vecinos, lo que permite encontrar las cáusticas.

El mayor problema de este método viene al seguir unas pautas estadísticas, que hace que no se converja a la solución real. Para solucionar este problema, se han propuesto diversas técnicas, siendo la más reciente y versátil *photon mapping progresivo* (*stochastic progressive photon mapping*, SPPM), que es la que usaremos en este proyecto.

# Metropolis Light Transport

Este último algoritmo se construye sobre PT y sus variantes, pero basado en un entorno matemático ligeramente distinto, conocido como Monte Carlo, por cadenas Markovianas. La idea es que, en lugar de muestrear los caminos de luz de forma ciega, el método es capaz de centrarse en aquellos caminos que contribuyen más, y que por tanto aumentan el ruido. De esta manera, si una cáustica es encontrada, el algoritmo lanzará más muestras en esa región del espacio, aceptando que las regiones vecinas también contribuirán más. En nuestro caso, nos centramos en dos variantes de este algoritmo, cada una de ellas con sus heurísticas determinadas para encontrar y mantenerse en los caminos que más contribuyen a la imagen final: espacio de muestras primario (*primary sample space Metropolis light transport*, PSSMLT) y espacio de caminos (*path space Metropolis light transport*, PSMLT).

# Metodología y herramientas

3

## 3.1 Metodología

En este capítulo se muestra una visión de conjunto de los pasos efectuados para la realización de este TFG, los cuales muestran la metodología de análisis de cada escena y su desarrollo, mediante las herramientas necesarias para su consecución. Por ello, deberá estar bien estructurado y poseer una buena organización interna que facilite la cohesión de todas las partes de este proyecto.

### 3.1.1 Estudio Previo

Para lograr que se efectúe el desarrollo de una escena correctamente, es necesario tener un conocimiento previo sobre qué utilizar y cómo utilizarlo, con el objetivo de aplicar este conocimiento sobre la fase de aprendizaje de modelos de apariencia y algoritmos de renderizado para la obtención de escenas fotorrealistas. Para este paso previo al diseño de escenas, se aborda el proyecto a través de lecturas de distintos documentos que faciliten una introducción al render basado en física y a los algoritmos empleados, la propia documentación sobre el programa a utilizar y una recopilación de información y cuestiones resueltas, adquiridas en el laboratorio. Esto se hará vigente más tarde, en la fase de desarrollo de escenas. Para la obtención de información sobre una introducción al render basado en física, se utiliza el libro de Kurachi [Kur11], y la documentación de Mitsuba [Jak14]. Posteriormente, se elaboran unos requerimientos que toda escena compleja para el transporte de luz deberá poseer.

### 3.1.2 Diseño y Desarrollo de las escenas

En esta fase se muestra el proceso a seguir para la creación (diseño) de una escena, y su desarrollo, a partir de su desglose en diferentes secciones. Se comienzan a utilizar herramientas para el desarrollo gráfico de los elementos de cada una de las escenas.

En primer lugar, existe una primera etapa de generación de ideas y conceptualización. En ella se determina el diseño conceptual de la escena, realizándose una búsqueda de influencias basadas en los requerimientos descritos que sirvan como ejemplo a seguir para el desarrollo de esta escena, y llevando a cabo un proceso de generación de ideas sobre papel que desembocará en una evolución de las formas y materiales de ese diseño, hasta llegar a un concepto final de escena.

En otra etapa posterior se realiza un modelado y ensamblaje tridimensional de cada uno de los elementos de la escena, así como de la propia habitación que los contiene, una vez ya han sido diseñados y evolucionados en la sección anterior.

La iluminación se estudia en una tercera etapa. En esta sección se lleva a cabo una distribución de las fuentes de luz que va a poseer el interior de la escena, discutiendo las razones sobre el por qué de su ubicación. Además, se realiza un análisis del comportamiento de la luz en componentes significativos de la escena donde se estudian tipos de materiales específicos para esos componentes especiales, con el objetivo de elegir la opción que más interese para el beneficio de una trayectoria compleja de la luz. Por último, se realiza una simulación sobre cómo actuaría la luz artificial sin iluminación natural, una vez habiéndose distribuido zona por zona, y con el objetivo de renderizar en el futuro escenas similares. Esta sección de iluminación viene representada por medio de ilustraciones explicativas.

### 3.1.3 Render

Una vez diseñada la escena y el tipo de iluminación que va a tener, se realiza una asignación de propiedades de los materiales a cada uno de los elementos, basándonos en los requerimientos descritos. Gracias al conocimiento previo adquirido, se realizan pequeñas pruebas sobre el tiempo de renderizado en función de los algoritmos usados, se analiza la calidad conseguida de cada prueba en función del ruido y el número de muestras empleados, se responden a cuestiones sobre los pros y los contras de estos algoritmos y se relacionan con los tipos de iluminación y la apariencia de los elementos de la escena obteniendo unas conclusiones. Tras haber valorado estos algoritmos, se elige uno o dos de ellos para un render final de cada escena.

## 3.2 Herramientas

A lo largo del proyecto se utilizan una serie de herramientas necesarias, sobretodo, para la consecución de las escenas tridimensionales, así como de su apariencia realista. Para la realización del modelado 3D se emplea el programa Autodesk Inventor 2014, debido a su precisión en el modelado de formas geométricas y a que además presenta unos parámetros restrictivos que pretenden evitar errores que no se evitan utilizando programas 3D para otro tipo de modelado más artístico (de formas orgánicas, por ejemplo). De este modo, se evitan interferencias entre ambas piezas o distintas partes de la misma, no existen errores en el boceto inicial de la pieza, y las operaciones son más específicas y rigurosas dependiendo del elemento que se quiera modelar.

Gracias al fácil posicionamiento de los elementos sobre la escena y a una vista preliminar del material a asignar para cada elemento, se elige Autodesk 3Ds Max, como programa, también de modelado, utilizado para ensamblar cada uno de los componentes de la escena entre sí, así como posicionarlos en su correcta ubicación.

Para toda la fase de render, incluyendo cada una de las pruebas con distintos números de muestras, se emplea el motor de render Mitsuba. Se ha elegido éste frente a otros, debido a que es un programa destinado a investigación, muy versátil, específico para la prueba de diferentes algoritmos con distintas configuraciones de parámetros (los cuales son totalmente modificables por el usuario) ante distintas posibles condiciones de luz sobre la escena. Además, integra la mayoría del estado del arte en algoritmos de render, y su base física sigue la tendencia que se sigue tanto en industria como en academia [Fx2014]. Gracias a esto, resulta fácil comparar cada método y observar los resultados en el render final según las modificaciones realizadas, así como obtener resultados y conclusiones generalizables, no específicos al motor de render usado en particular.

# Requerimientos

4



En este capítulo se realiza una introducción a los requisitos fundamentales que deberá tener el diseño de toda escena, con el objetivo de crear un "guión" que se siga de manera estricta desde la fase de búsqueda de referencias e imágenes influyentes, hasta la asignación de materiales al concepto final de escena. Para ello, se tienen en consideración unos puntos fundamentales sobre los que se basa esta complejidad en la trayectoria de la luz.

## 4.1 Realismo

El primer requisito claro que se debe establecer, es que la escena a diseñar sea suficientemente realista, de modo que usando algoritmos de render basado en física se pueda obtener una escena existente en el mundo real. Esto implica que se deban imponer condiciones sobre el tipo de escenas a generar:

No se debe diseñar una escena simple que muestre uno o dos efectos por separado, ya que la escena diseñada debe reunir los suficientes efectos enrevesados para la luz de tal forma que sirva para probar cada uno de los algoritmos de render. Tampoco se debe diseñar una escena abstracta, donde una compleja geometría de los elementos dificulte la percepción tanto de los materiales aplicados como de los propios elementos de la escena (más sencillo el comparar los materiales que suelen tener los elementos cotidianos). Debe ser una escena que pueda estar en un catálogo de Ikea, o en el render conceptual de un producto.

Esta escena no tiene que estar necesariamente animada, puede ser estática. Posteriormente, pese a que tampoco son necesarios, si se desea, se le pueden aplicar efectos como desenfoque por movimiento o por la óptica de la cámara.

## 4.2 Caminos de Luz Complejos

La escena deberá poseer caminos cáusticos y especulares (como los que aparecen en la Figura 4.1, obtenidos de [Kap14], [Geo12], [Jak12]), debido a que son difíciles de encontrar de manera aleatoria. Estos tienen, en general, gran cantidad de luz, y por tanto generan mucho ruido en el render final, que es lo que nos interesa en la escena. El tipo de geometría de los elementos de la escena, tiene algo de efecto la dificultad de la escena para la luz, pero es fundamentalmente una cuestión de los materiales e iluminación lo que hace a una

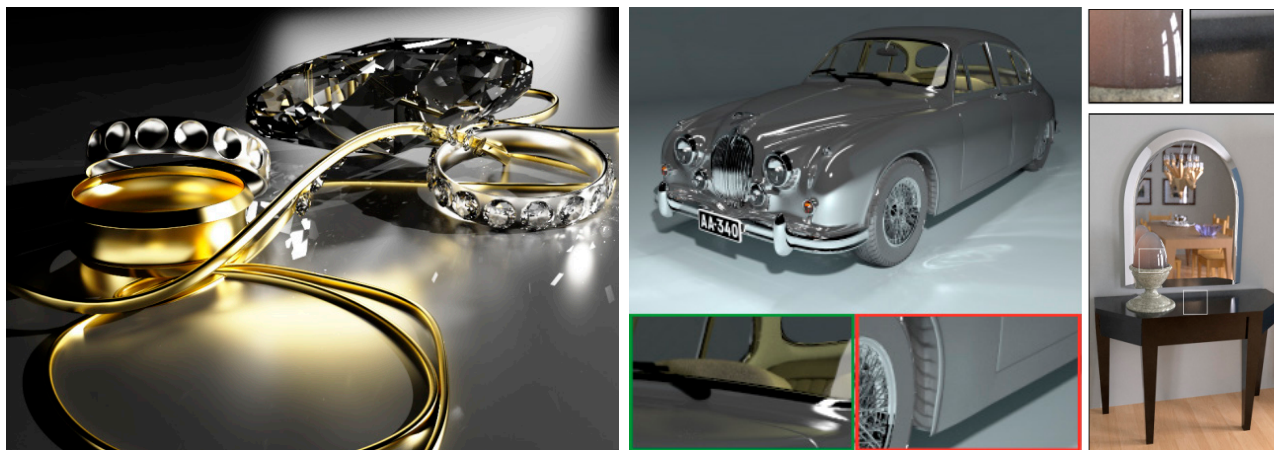


Figura 4.1. Caminos complejos glossy (brillantes) que generan reflejos y cáusticas en las diferentes escenas de las imágenes. A la izquierda, escena de una joyería cuyos cristales generan cáusticas sobre la mesa. En la imagen del medio, se observa en las imágenes ampliadas las zonas conflictivas propensas a adquirir ruido de la escena de un coche, debido al material especular empleado. La imagen de la derecha muestra, de la misma forma que el coche, dos zonas conflictivas; el cristal del huevo compuesto que integra un medio participativo y la cáustica generada sobre la mesa.

## 4.3 Iluminación

El tipo de iluminación también influye en una trayectoria compleja. La escena será más desafiante para el transporte de la luz si contiene un mapa de ambiente, luces de área focalizadas en una determinada dirección, luces ocluidas por dieléctricos, o diversas combinaciones. En la Figura 4.2 se muestra el conjunto de emisores a utilizar en las distintas escenas. Emisor de área para la iluminación artificial



donde se le asignan unas propiedades al área de una geometría que se desea que sea emisor. En la Figura 4.3, se muestra un mapa de ambiente para la iluminación natural, iluminación proveniente de un extr donde se toca el valor de exposición para que la escena esté más o menos iluminada. Ambas imágenes se obtienen de la documentación de Mitsuba [Jak14].

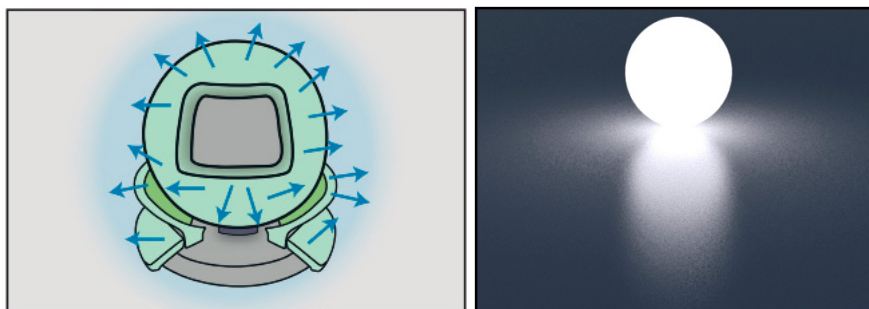


Figura 4.2. A la izquierda, esquema del emisor de área, donde las flechas azules indican la dirección de la luz que emite. A la derecha, luz emitida por una esfera a la que se le han asignado las propiedades de emisor de área.



Figura 4.3. Ejemplo de mapa de ambiente de la iluminación cálida procedente de una sala de exposiciones. [Jak14].

## 4.4 Materiales

En cuanto a los materiales a emplear, favorecerán cáusticas y caminos especulares los espejos, materiales glossy que también provocan reflejos, como conductores y plásticos, y materiales translúcidos como dieléctricos suaves o dieléctricos rugosos. En la figura 4.4 [Jak14] se pueden observar algunos ejemplos de este tipo de materiales.

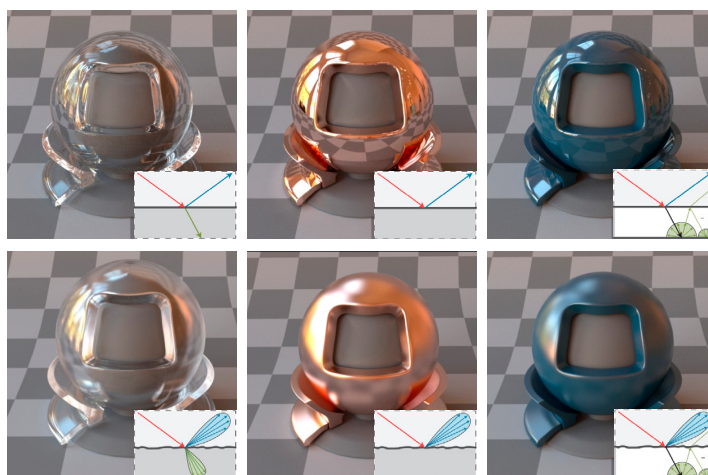


Figura 4.4. En orden de izquierda a derecha y de arriba a abajo; dieléctrico liso, conductor liso, plástico liso, dieléctrico rugoso, conductor rugoso, plástico rugoso. A la derecha, esquemas explicativos sobre cómo la luz incide en ellos.

Escena *baño*:  
Diseño y desarrollo

5

## 5.1 Fase 1: Generación de Ideas y Conceptos

En esta fase determinamos el tipo de escena a desarrollar, realizamos una búsqueda de posibles influencias para la escena a diseñar, y llevamos a cabo una evolución de las distintas formas y materiales a incluir en la escena, hasta llegar a un diseño final. Debe considerarse en cada una de las fases de los dos capítulos de diseño, que en la memoria sólo se plasman las influencias, conceptos, elecciones de iluminación finales, elegidos habiendo valorado muchas opciones distintas, las cuales el lector puede ver en una ampliación en el Anexo \*.

### 5.1.1 Influencias

El objetivo de realizar una búsqueda de influencias se centra en localizar escenas reales que presenten un nivel alto de complejidad del transporte de luz, y en particular, que resulten complejas de simular utilizando los algoritmos existentes. Se opta por la elección de una escena interior de un hogar para la búsqueda de influencias. Esto es debido a que en una escena interior es común un mayor número de fuentes de luz focalizadas hacia distintos puntos, además de iluminación natural, ya que se cree necesaria la existencia de distintos focos interiores colocados en lugares concretos que provoquen sombras y reflejos sobre los elementos de un entorno que sólo es posible si es cerrado, ya que si es abierto y este consta de una luz diurna, la iluminación del entorno quedará por encima de estas luces. El segundo motivo por el que se elige una escena interior se debe a que en este tipo de escenas, prevalecen los elementos artificiales sobre los naturales, que encontramos en una escena exterior. Estos elementos artificiales suelen tener materiales más especulares, con superficies de mayor acabado (pulido, abrigantado,...) cuyas formas geométricas facilitan un reflejo más claro de la luz. Además, de entre todas las habitaciones de un hogar se piensa que un baño puede ser más acertado al suponer un mayor desafío para el transporte de luz por lo que respecta a la cantidad superficies especulares de las que puede disponer, tales como materiales compuestos de capas de barniz, cristales, espejos, cerámica en lavabos, grifos metálicos, recipientes acristalados, y otros accesorios. Las paredes, además, suelen estar compuestas por baldosas cerámicas en lugar de materiales difusos que sí se encuentran en otras habitaciones, y también se puede encontrar tejido, como toallas. La Figura 5.1 muestra la escena ejemplo seleccionada como influencia.



Figura 5.1, influencias. Escena ejemplo seleccionada debido a la distribución de sus elementos. Baño con iluminación natural y artificial. Imagen obtenida de sancarlos.es

### 5.1.2 Evolución Formal y Asignación de Materiales

Posteriormente, se procede con el desarrollo de ideas mediante la elaboración de bocetos llevándose a cabo una evolución formal sobre los elementos de la escena, facilitando la descripción de dicha conceptualización y evolución formal dividiendo la escena en tres zonas (Figura 5.2). La zona A; una encimera sobre la que se sustentan dos lavabos y una pared sobre la que están anclados los grifos y los espejos. La zona B; una bañera, que a su vez está centrada con la ventana y dos estanterías a su lados. La zona C; un mueble auxiliar.

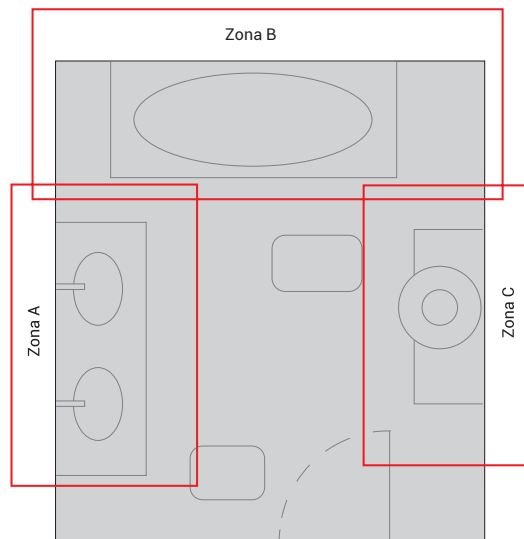


Figura 5.2. Plano general del baño, así como su subdivisión en las diferentes zonas sobre las que se desarrollará la evolución formal.

## Zona A: Lavabos

En esta zona, el espacio superior está cubierto por dos espejos de superficie rectangular situados sobre una encimera en la que se colocan dos lavabos ovalados. Dos grifos se colocan anclados a la pared en la zona superior y una papelera cilíndrica llena el espacio inferior, por debajo de la encimera. El objetivo de **los espejos** ubicados en el lateral izquierdo de la habitación, es que reflejen también el cristal de la ventana exterior y su luz proveniente, por lo que cuanto más amplia sea su superficie, existirá una mayor complejidad para el transporte de luz. Es por esto por lo que el proceso de desarrollo que siguen finaliza con dos espejos ( en lugar de uno) sin marco y con un tamaño de superficie considerable. El desarrollo formal de **los grifos** termina por mantener la estructura inicial, sobre la que un tubo curvo está soldado a una base cilíndrica. De esta manera y debido a que el objetivo es que tenga un material metálico especular con un acabado pulido (se perciba como un espejo), debido a su geometría, se mantenga también la dificultad del modo en que la luz se refleja. Sobre el lateral izquierdo de la encimera se coloca **un espejo de mesa** con el objetivo de dotar a la luz de una trayectoria mayor sobre la escena. El concepto final es un espejo con contorno circular cuya base presenta formas redondeadas y suaves. Colgado de la encimera también se coloca **un toallero** compuesto por dos cilindros en los extremos sobre una base cuadrada, con una varilla de acero para sostener la toalla. El acabado vuelve a ser el mismo que el de los grifos; metal pulido. **La papelera** consta de un material de apariencia física similar al de los grifos, especular. Se elige el concepto de forma cilíndrica debido a las cáusticas que puede provocar sobre el suelo su estructura formal.

Tras el planteamiento de modificar el aspecto formal de **los lavabos**, se concluye también manteniendo la estructura inicial ovalada con el objetivo de favorecer cáusticas. Para emular el brillo y el color blanco del lavabo, se emplea un material similar a la cerámica o a la resina sintética. En la Figura 5.3 se puede observar la asignación de materiales sobre el diseño final del baño.

## Zona B: Bañera

Sobre la pared central del baño, constituyendo el centro donde va a estar situada una bañera, acapara el espacio una gran ventana de cristal semi-opaco, por donde entra la mayor parte de la luz de la escena. A sus laterales, se sitúan unas estanterías de obra. Un par de alfombras de nylon están colocadas el suelo. Para la evolución formal de **la alcachofa de ducha** se opta por una forma sencilla; tubo cilíndrico curvo de estructura y una alcachofa plana con bordes redondeados. Para una mayor coherencia con los restantes elementos de la escena del baño, se determina el aprovechamiento de los grifos del lavabo sobre el de la bañera. **La bañera** evoluciona hacia formas más orgánicas, evitando las aristas vivas y destacando las curvas, hasta llegar a un diseño más suave y menos agresivo. El diseño final de las patas de la bañera es cilíndrico y están compuestas por otro material. El desarrollo de **una cobertura para la bañera** viene determinado por una mampara curva adaptada a la forma de la bañera que la cubra del todo. Por último se lleva a cabo una conceptualización de **tres tipos de recipientes** que serán colocados sobre la estantería, a modo de botes de jabón, cremas, etc.

## Zona C: Mesa Auxiliar

En esta zona se decide incluir una mesa auxiliar que rellene la habitación, y que incremente la complejidad geométrica de la misma. Además, se incluye una luz de relleno para a) aumentar la complejidad lumínica en la escena, y b) rellenar una zona visualmente más oscura. Para la luz se plantea una lámpara de mesa. Con el objetivo de aportarle a la escena un nuevo elemento con una apariencia distinta, tanto formalmente como por parte de sus materiales, se determina diseñar **una mesa** de tamaño medio. Se desarrolla una mesa con las esquinas redondeadas, y se lleva a cabo una modificación de la mesa inicial en la sección de la zona inferior de las patas. Se procede entonces al diseño de dos focos de iluminación; uno ubicado sobre la mesa auxiliar, apoyado sobre ella, y dos focos anclados al techo, ocupando el centro de su superficie. En el caso de **la iluminación general**, la cual se sitúa sobre la zona superior del techo, se lleva a cabo un desarrollo del concepto inicial hasta llegar a un panel de iluminación de cristal, de superficie rectangular, ya que esa zona del techo no va a ser visible a la hora de generar el render y cuanto más superficie abarque para iluminar, habrá un mayor transporte de luz (aunque de más baja frecuencia). En el caso de **la iluminación focalizada**, se desarrolla una forma más curva y orgánica para el área de revolución de la base de la lámpara.

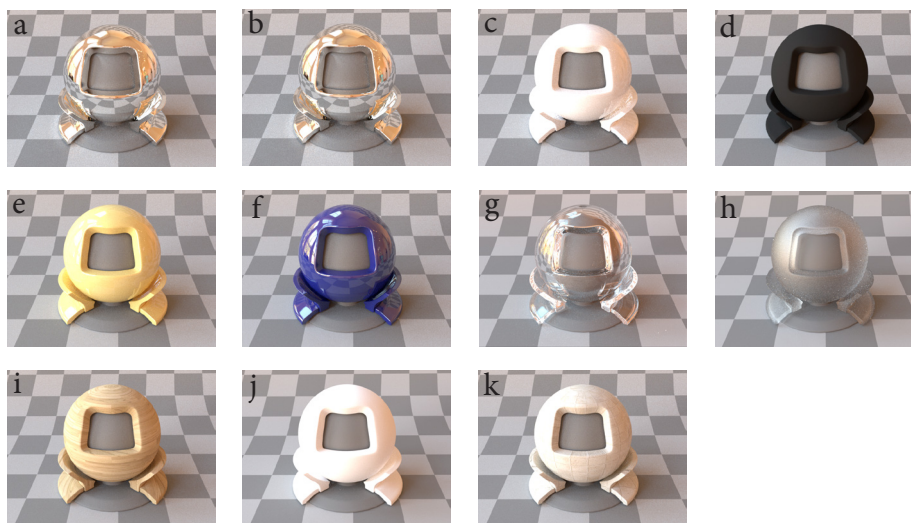
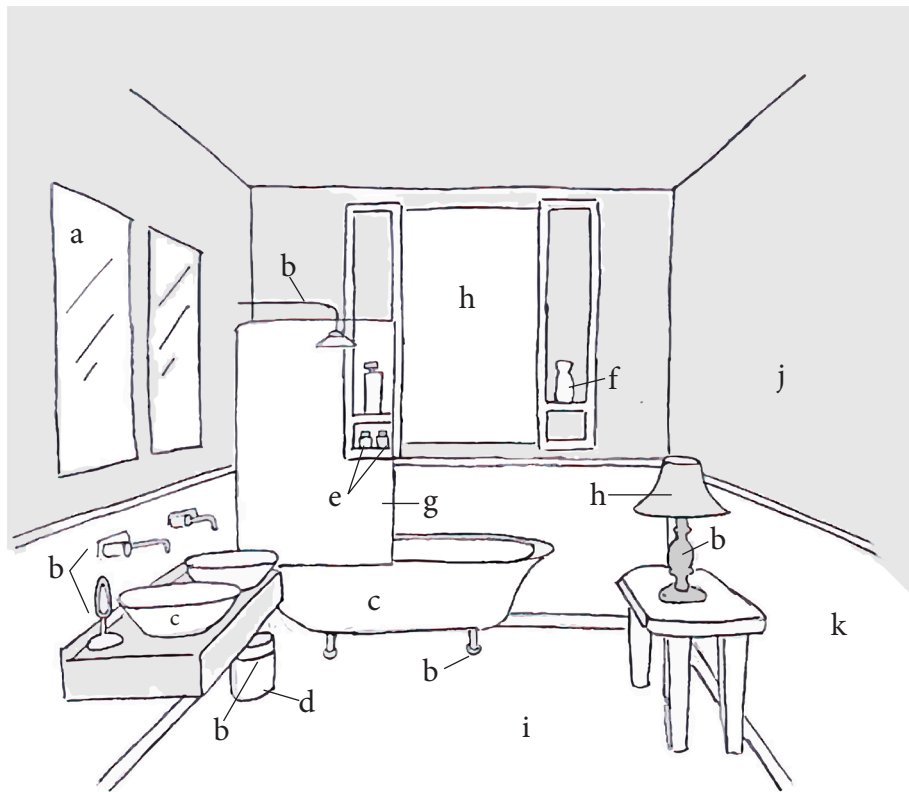


Figura 5.3. Asignación de materiales pertenecientes a cada elemento del concepto final de la Escena Baño. Señalada la asignación sobre el boceto superior. Siendo "a" similar a un espejo, "b"; metal con amplio grado de reflectividad, "c"; plástico que simula cerámica, "d"; material difuso con acabado mate, "e"; plástico especular de color amarillo, "f"; plástico especular con cierto brillo al tener un color azul oscuro, "g"; cristal dieléctrico, "h"; cristal rugoso, "i"; material difuso con textura de madera laminada, "j"; material difuso blanco, "k"; material difuso con textura de baldosas. Los materiales han sido renderizados desde la escena "Matpreview", dada por Mitsuba.

## 5.2 Fase 2. Modelado y Ensamblaje

En esta fase se lleva a cabo un proceso de modelado tridimensional de la escena diseñada, a partir de los bocetos finales surgidos de la evolución formal que se ha desarrollado hasta dar con el diseño final anterior. Para ello, primero se realiza un modelado de las piezas en Autodesk Inventor y posteriormente se lleva a cabo un ensamblado de la escena y asignación de materiales en Autodesk 3ds Max (en la Figura 5.5 se puede tener una visualización de la escena en la fase de ensamblaje). Esto son ejemplos de los muchos que se pueden encontrar en el Anexo \*, en el que aparece una explicación más extensa del proceso que se ha seguido en toda la fase de modelado y ensamblaje.



Figura 5.5. Unión y ubicación de los elementos del interior de la habitación en la fase de ensamblado, tras el modelado de cada elemento (vista isométrica, nótese la eliminación de las paredes ocluidoras para poder ver el interior de la habitación). Realizado con Autodesk 3ds Max.

## 5.3 Fase 3. Iluminación

En esta fase se lleva a cabo una distribución de los focos de luz que van a aparecer en la escena, discutiendo las razones de su ubicación en base al tipo de iluminación que se quiere enfatizar. Posteriormente se mostrarán las preferencias sobre el tipo de iluminación que deba aparecer según las condiciones que presente la escena.

### 5.3.1 Distribución de la Iluminación

Debido al área rectangular de la habitación, el modo en el que está estructurada y la distribución de sus elementos, se disponen tres grandes focos de iluminación centrados verticalmente hacia la bañera, como indica el plano de la Figura 5.6, de tal forma que se llegue a abarcar la zona centro de la habitación mientras que parte de esa luz llegue también de manera general a los distintos elementos. Sobre la zona izquierda de la habitación recae más sombra al no haber apenas elementos con superficies que favorecen un transporte de luz más complejo, como es el caso de los espejos en el lateral izquierdo de la habitación. Por ello se intenta abarcar esa zona por medio de un foco de luz más pequeño y colocado a una altura menor, ya que colocar un foco principal supondría una iluminación excesiva sobre toda la habitación.

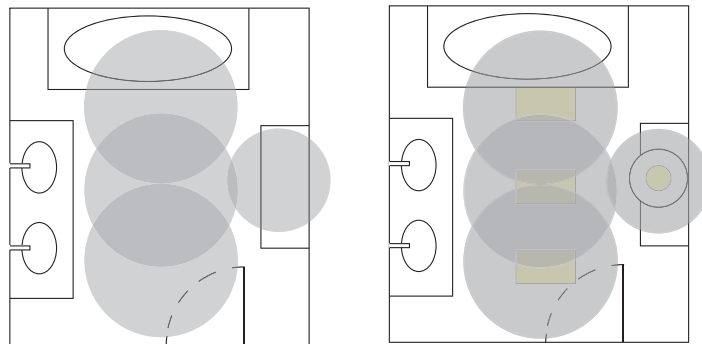


Figura 5.6. Organización de la luz artificial sobre el plano. Imagen izquierda, sin focos emisores. Imagen derecha, con focos emisores.

### 5.3.2 Tipología

Para la aplicación de una correcta iluminación sobre la escena, se deben estudiar las posibles combinaciones de luz sobre las que se ha pensado en la fase de desarrollo de ideas. Se elabora un esquema gráfico en el que se observa una vista en perfil desde un lateral, de cada una de las tres paredes principales con los distintos tipos de iluminación aplicados (foco A, B y C). Finalmente se elige el foco A por ser el más completo en cuanto a zonas que abarca la iluminación que proporciona. La imagen izquierda de la Figura 5.7 muestra el perfil con el focos elegidos.

Una vez realizada la selección del foco superior, se lleva a cabo un estudio del tipo de luz que deberá aparecer en la zona inferior de la escena, lateral derecho de la habitación. La fuente seleccionada es el foco E por dos motivos; por un lado, la zona iluminada que abarca es superior al resto, y por otro, el carácter formal de la base que sustenta la pantalla será de utilidad para aumentar la complejidad el transporte de luz, aplicándole un material especular. La imagen derecha de la Figura 5.7 muestra una combinación de los dos tipos de iluminación empleados.

Todos los diagramas vistos en la Sección de la tipología de la luz, están inspirados en [Gan92].



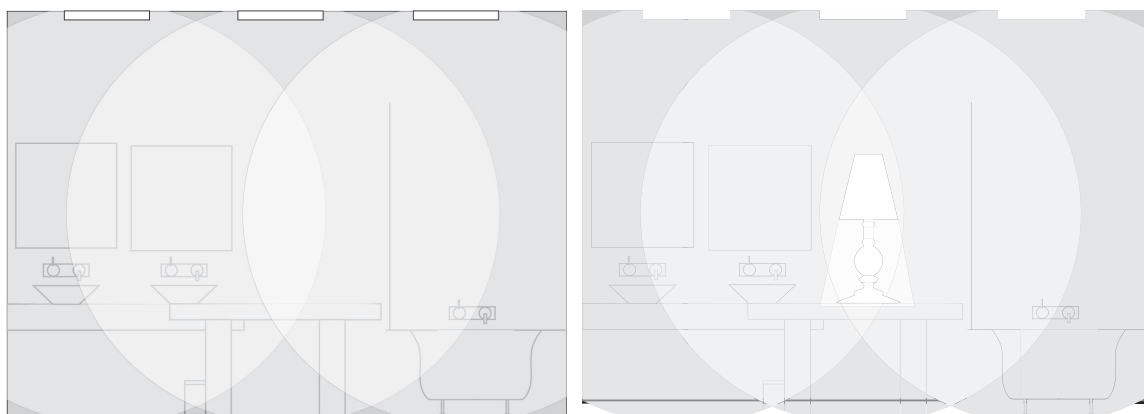


Figura 5.7. A la izquierda, iluminación foco A, vista general sobre un perfil de la habitación. A la derecha, combinación de iluminaciones, focos superiores (foco A), foco inferior (foco E), y luz natural (ventana). Vista general.

### 5.3.3 Comportamiento de la Luz en Elementos Significativos

La iluminación natural proveniente del medio exterior que entra en la escena a través de la ventana, también es una parte fundamental a estudiar. Para que exista un transporte de luz más complejo, deberán tenerse en cuenta diversas superficies de la escena. En este apartado se tienen en cuenta, sobretodo, dos superficies principales sobre las que la luz va a actuar de manera significativa; la ventana de la pared central y los espejos situados en el lateral derecho de la habitación.

Se elige cristal rugoso para la ventana (ver Figura 5.9) debido a que la luz entrará dispersa en la habitación, de manera que cada rayo con dirección distinta reflejará sobre los espejos provocando que haya una mayor iluminación y que el transporte de luz sea de más baja frecuencia. Una vez elegido el tipo de cristal de la ventana; se debe considerar la importancia de un componente adicional y la tipología del material del que esté compuesto: una mampara cuyo material va a ser también un cristal rugoso.

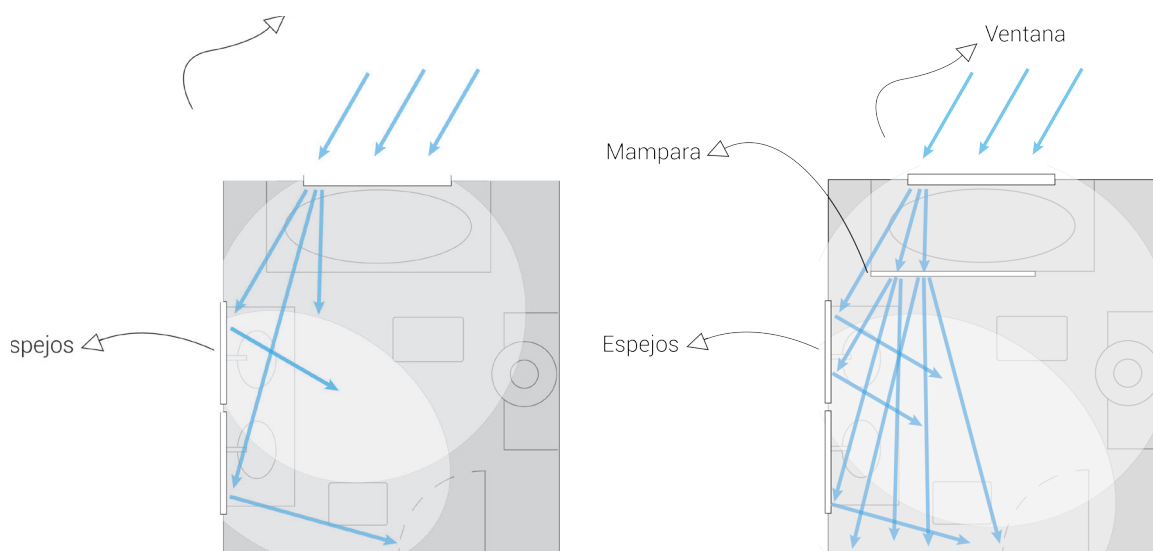


Figura 5.8. Imagen izquierda, recorrido de la luz transmitida y reflejada en los espejos, ventana con cristal rugoso. Imagen derecha, ventana con cristal rugoso y mampara de cristal rugoso también.

### 5.3.4 Distribución de la Iluminación Zona a Zona

Es necesario estudiar, sobre un modelo más complejo, cada tipo de iluminación seleccionada, y su dirección y orientación respecto a la distribución de los distintos focos colocados sobre la escena. El objetivo es realizar pruebas futuras en la siguiente fase, sobre la que se vea con claridad, un render para cada tipo de iluminación por separado.

Sobre la zona central de la escena, como se puede ver en la imagen izquierda de la Figura 5.10, se disponen los tres focos de luz orientados hacia el suelo, intentando que la iluminación directa se acerque a la zona de los espejos para una mayor iluminación de la escena. Así mismo, el único foco inferior (imagen del medio), de menos potencia que los superiores, se encuentra colocado sobre la mesa, orientado hacia ella misma (hacia abajo), de tal forma que parte de ese lateral quede iluminado y una pequeña parte de esa luz se escape por la zona superior de la habitación y pueda estar algo iluminada. La combinación de ambos se encuentra en la imagen de la derecha de la misma figura. Estas imágenes están inspiradas en [Bdp14]



Figura 5.9. Esquema de simulación de la iluminación por separado sobre la escena en total oscuridad de los focos seleccionados. De izquierda a derecha; foco A, foco E, y de los focos A y E juntos.

Escena *salón*:  
Diseño y desarrollo

6

## 6.1 Fase 1. Generación de Ideas y Conceptos

### 6.1.1 Influencias

Siguiendo el mismo proceso de localizar escenas reales que presenten un nivel alto de complejidad, en este capítulo se opta por mantener la elección de una escena interior de un hogar para la búsqueda de influencias.

Dentro de este tipo de escenas interiores, al igual que el baño, se piensa que el salón-comedor de un hogar puede suponer también un mayor desafío para el transporte de luz por lo que respecta a la variedad de elementos que se pueden encontrar en él, e incluir, también, de manera adicional. A estos elementos se le pueden aplicar superficies especulares, como materiales compuestos por capas de barniz, cristales, cerámicas e incluso algún tipo de material metálico para ciertos elementos de la vajilla. También se puede jugar con los materiales aplicados en las paredes y suelos de la habitación, pudiendo definir algún *bumpmap* (mapa de relieve) especular, madera lacada o algún ladrillo con alguna capa de brillo. Además, en un salón sí es fundamental que haya iluminación natural abundante debido al tiempo en el que el usuario lo utiliza, luego será mucho más fácil hallar una mayor variedad de habitaciones de este tipo con iluminación natural.

La Figura 6.1 en concreto, muestra el salón-comedor elegido de entre todas las influencias. Tiene una distribución de los elementos más organizada; la mesa, centrada y situada transversalmente en la habitación, el conjunto de sillas colocadas alrededor a lo largo de la extensión de la mesa (que además existen distintos tipos de sillas, luego esto es un aliciente a la hora de seguir este esquema de escena), focos de luz alineados también con la misma mesa, y una ventana situada en uno de los laterales para que la iluminación, si proviene de la vista central, no entorpezca la visión de la cámara. También dispone de una vajilla mucho mas útil a nivel de materiales para la escena que queremos plantear, como por ejemplo; copas finas de cristal, botellas y cuencos y platos de cerámica blanca, por lo que se convierte en un buen ejemplo para el modelado tridimensional.

Se tienen en consideración como influencias adicionales, distintos elementos y materiales a aplicar en la escena elegida (Figura 6.2):

- Estrella de luz. Decoración. Debido a que esta consta de una multitud de pequeños puntos de iluminación artificial.
- Lámparas de bombilla. El hecho de que el componente emisor de luz (en este caso el filamento) esté contenido en un recipiente acristalado como es la bombilla, favorece una mayor complejidad para la trayectoria de la luz.
- Diferentes texturas a aplicar en paredes/techo.



Figura 6.1. Influencias de la escena principal salón-comedor. Escena ejemplo seleccionada. Salon con iluminación natural y artificial.



Figura 6.2. Influencias de iluminación-decoración. En la imagen de la izquierda, bombilla de cristal dieléctrico cuyo filamento va a ser el emisor. En la imagen del medio, material a aplicar; bronce con acabado moleteado. A la derecha, estrella de plástico con 11 pequeños focos emisores de una luz tenue, distribuidos también uniformemente.

## 6.1.2 Evolución Formal y Asignación de Materiales

En este caso, el salón se divide en dos zonas (Figura 6.3). La zona A, constará de una vista en alzado que englobe la mesa central del comedor sobre la que se sustente toda la vajilla y distintos tipos de sillas colocadas a lo largo de la misma. La zona B será una vista en alzado principalmente del fondo de la habitación, donde se encuentren los elementos restantes de la escena, como la estrella decorativa.

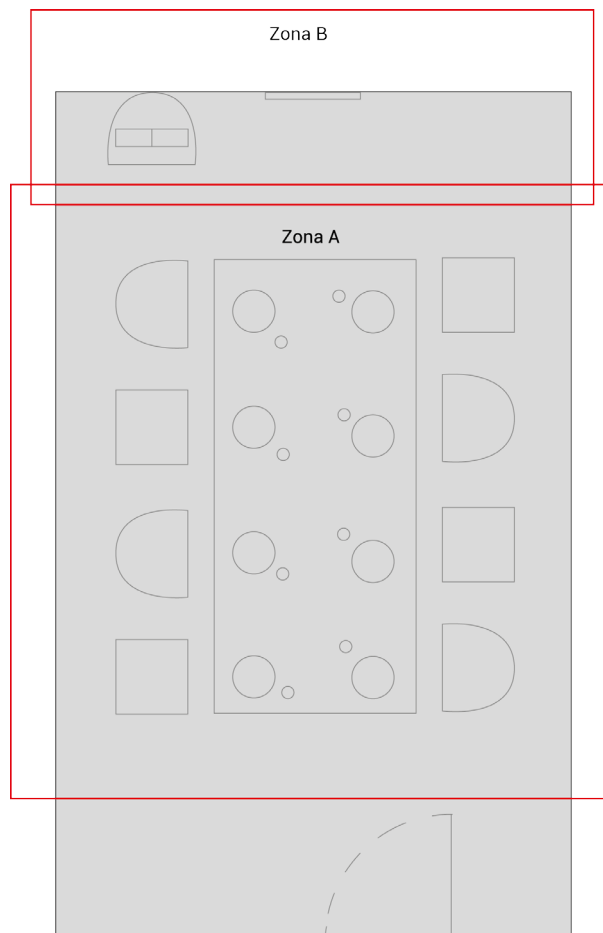


Figura 6.3. Plano general del salón, así como su subdivisión en las diferentes zonas sobre las que se desarrollará la evolución formal.

## Zona A: Mesa

Esta zona se encuentra dividida por un lado, una parte superior en la que se disponen una serie de lámparas alineadas, colgadas del techo, y por otro lado, una parte inferior en la que se encuentra una mesa central (alineada también al igual que las lámparas con el resto de la habitación), vajilla variada colocada sobre esta, y dos tipos distintos de sillas, colocadas alrededor de la mesa central. El desarrollo formal de **las lámparas** viene determinado en parte por las influencias estudiadas en el apartado anterior (Ver Figura 6.2). En una primera instancia, se elige una forma de cono básica, algo redondeada, para el recipiente donde va a ir integrada la bombilla, con tal de aplicarle en un futuro un material metálico que provoque brillos y reflejos. Esta idea se va desarrollando hasta que se obtiene la decisión de preservar la aplicación futura de ese material manteniendo totalmente visible la bombilla, y que, además, esta sea de un tamaño bastante grande. Aplicando estas dos decisiones, la luz proveniente de filamento emisor del interior de la bombilla, tendrá que chocar primero contra el cristal de la bombilla, rebotar, y generar numerosos caminos de luz al interactuar con los distintos materiales del entorno. Se toma la decisión de que existan **dos tipos de sillas** ubicadas en el salón comedor. Para el desarrollo conceptual de cada una de ellas, se tienen en cuenta distintos tipos (sillas colocadas en la zona intermedia de la Figura 6.4) y se realiza un proceso de evolución, quedándose una mezcla de ideas procedentes de distintos tipos de sillas (sillas colocadas en la zona inferior de la Figura 6.4). Finalmente se obtiene una silla clásica y simple de madera estructurada con barras metálicas, y una silla, mezcla de alguna otra, con una estructura de barras curvas metálicas y un asiento compuesto en un futuro por un material algo complejo. En cuanto a **la vajilla** a utilizar, se usan principalmente vasos y jarras de cristal, platos y cuencos de cerámica (en este caso, la forma tanto de los cuencos como la de los boles, ha sido reutilizada de los lavabos de la escena del baño, capítulo anterior). Se opta por un diseño curvo para la jarra de agua y un proceso de evolución de los vasos va a parar a una copa de volumen tubular. Se conceptualizan dos tipos simples de diseño de mesas de madera y se elige la que de menos elementos va a constar, optimizando el tiempo de su fabricación ya que sus patas van a estar escondidas. También es necesario el diseño de un sistema que permita abrir y cerrar la ventana de la habitación, por lo que se desarrolla **una manivela giratoria**.

## Zona B: Fondo

Esta zona va a constar únicamente de tres elementos fundamentales como indica la Figura 6.4. Pegada a la pared, una nueva silla, concretamente un taburete, que quizá se emplee también en la Zona A; utilizada aquí para efectuar la función de soporte, un cuadro rectangular anclado sobre la zona superior derecha de la pared y un accesorio iluminativo de decoración el cual va a ser soportado por la misma silla. El concepto del cuadro queda suplantado por la idea de colocar **un espejo** sobre el suelo, ocupando esa zona. La idea es que se provoquen reflejos y se amplíe la trayectoria de la luz al colocar una serie de figuras colgantes sobre la zona superior. Se trata de un tipo de **estrellas decorativas** con algún material traslúcido que deje pasar la luz, además de a través de su estructura, a través de unos pequeños agujeros pasantes colocados sobre su superficie. Tras darle vueltas al tipo de foco de iluminación colocado sobre la Zona B, finalmente se vuelve a las influencias iniciales como aparecen en la sección anterior, luego el accesorio de iluminación elegido ha sido una **estrella compuesta por pequeñas esferas de luz** que rodean o abarcan toda su superficie. El motivo por el que se ha elegido este tipo de accesorio es debido a iluminar esa parte del salón comedor que queda un poco más oscura al no acaparar bien del todo esa zona la luz de la ventana. Además, si se emplean los materiales adecuados tanto en la silla como en la propia base de la estrella o en el suelo, el hecho de que haya pequeñas fuentes de luz de una radiancia no muy alta (para evitar que deslumbren excesivamente), colocadas a una cierta distancia sin llegar a quedar unidas todas en el centro, puede dar juego a distintos tipos de reflejos o brillos sobre estos componentes. La silla que va a ejercer de soporte para la estrella luminosa va a ser **un taburete** compuesto por alguno o varios materiales especulares.

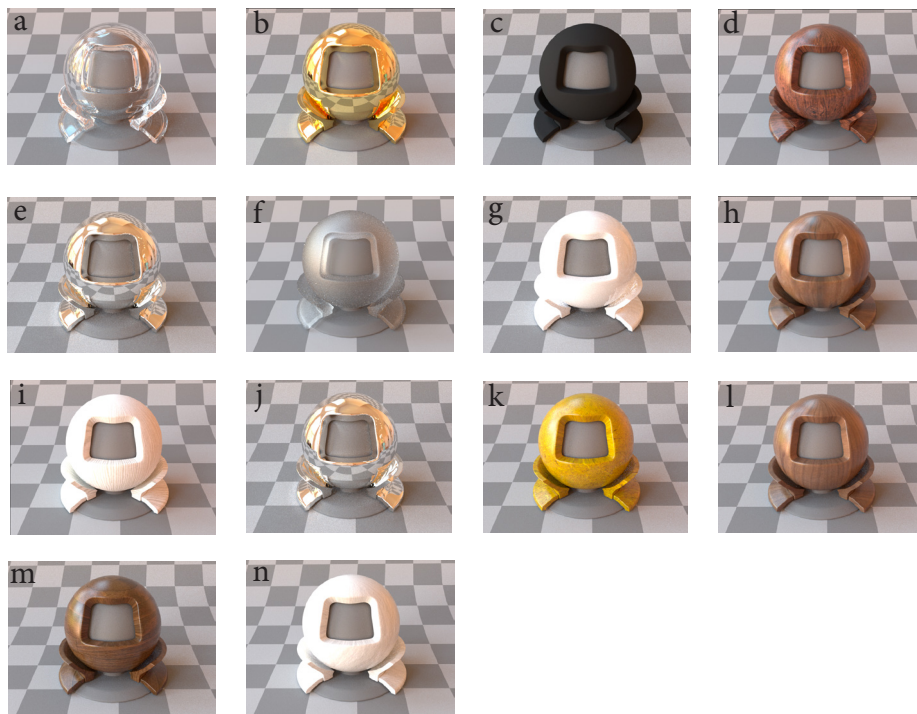
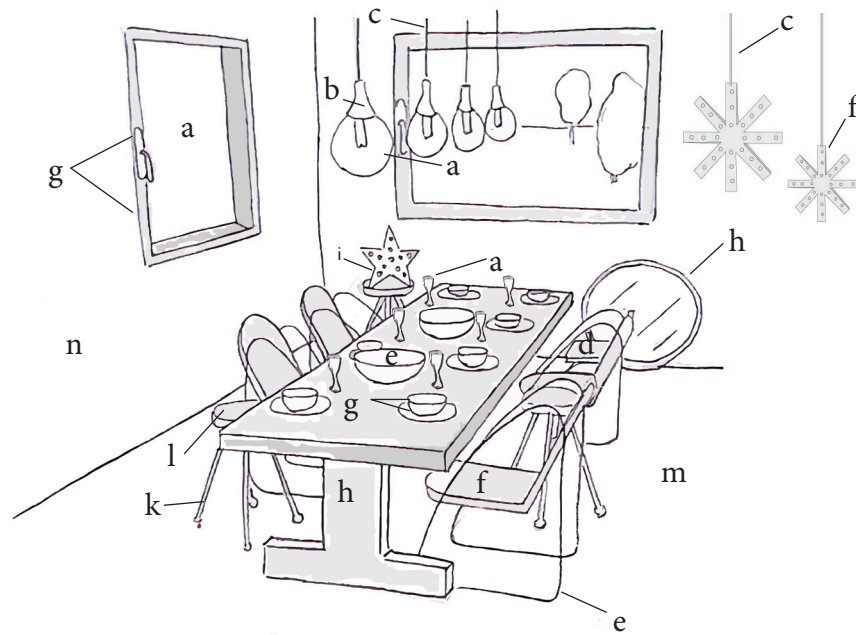


Figura 6.4. Asignación de materiales pertenecientes a cada elemento de la Escena Salón. Señalizada la asignación sobre el boceto superior. Siendo "a" cristal dieléctrico, "b"; conductor dorado, con amplio grado de reflectividad, "c"; material difuso con acabado mate, "d"; material difuso con apariencia de madera, "e"; de apariencia metálica con amplio grado de reflectividad, "f"; cristal rugoso, "g"; plástico especular, "h"; material difuso con componente especular que imita la madera lacada, "i"; material difuso de apariencia de madera blanca, "j"; espejo, "k"; plástico rugoso que imita pintura metálica amarilla, "l"; otro tipo de madera oscura lacada, "m"; madera laminada lacada, "n"; plástico rugoso con textura.

## 6.2 Fase 2. Modelado y Ensamblaje

De igual manera que en el capítulo anterior, en esta fase se lleva a cabo un modelado tridimensional de la escena diseñada a partir de los bocetos finales surgidos de la evolución formal mostrada en la sección anterior, con los programas correspondientes; Autodesk Inventor y Autodesk 3ds Max (Figura 6.6).

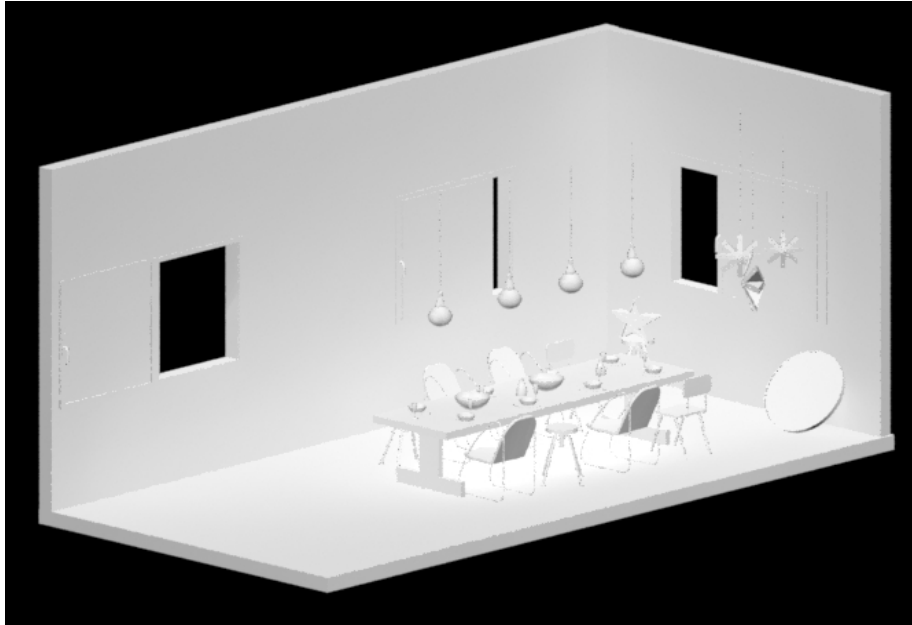


Figura 5.5. Unión y ubicación de los elementos del interior de la habitación del salón en la fase de ensamblado, tras el modelado de cada elemento (vista isométrica, nótese la eliminación de las paredes ocluidoras para poder ver el interior de la habitación). Realizado con Autodesk 3ds Max.



## 6.3 Fase tres. Iluminación

### 6.3.1 Distribución de la Iluminación

Debido al área rectangular de la habitación, el modo en el que está estructurada y la distribución de sus elementos, se disponen cuatro focos de iluminación centrados y alineados transversalmente sobre la mesa, en dirección hacia el fondo de la habitación, como indica el plano de la Figura 6.7, de tal forma que se llegue a abarcar la zona centro de la habitación y además, cada recoveco de los elementos sobre los que se sitúa que quede desprovisto de luz porque la iluminación natural no llega hasta él, sea albergado por esta iluminación artificial.

La zona Fondo es la que más desprovista está de iluminación. Esto sucede porque tal y como se pretende colocar el mapa de luz natural y tal y como están distribuidas las lámparas del centro, se produce una sombra en esa parte de la escena, por tanto, para iluminar ese tramo, se coloca una fuente de luz.

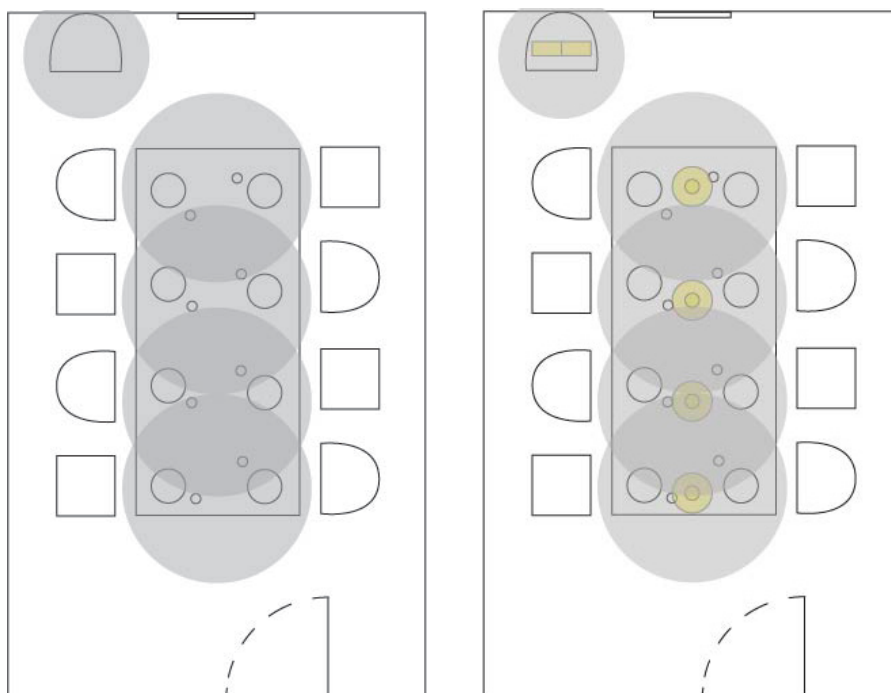


Figura 6.7. Organización de la luz artificial sobre el plano. Imagen izquierda, sin focos emisores. Imagen derecha, con focos emisores.

### 6.3.2 Tipología

Para la aplicación de una correcta iluminación sobre la escena, de igual manera que en la escena del baño, se elabora un esquema gráfico en el que se muestra el empleo de tres tipos de focos superiores, nombrados como foco A, foco B y foco C. Finalmente se decide seleccionar el foco C, ya que, además de proporcionar una iluminación mucho más expandida en el entorno (va a iluminar la zona del techo y no va a estar restringida por un "gorro" que focaliza su iluminación), también presenta visibles los dos componentes de materiales especulares (un soporte en lugar del gorro y la bombilla), por lo que se elige este foco como foco superior (Figura 6.8).

Una vez realizada la selección del foco superior, se lleva a cabo un estudio del tipo de luz que deberá aparecer en la zona inferior de la escena, lateral derecho de la habitación. La fuente seleccionada es el foco F debido a que la zona iluminada que abarca es suficiente y no se desea que haya una gran iluminación sobre esa zona. Por otro lado, el haber reducido el número de bombillas deja ver la estructura principal de la lámpara, así como su material. En la Figura 6.9 se observa el perfil de la habitación iluminada por los dos focos elegidos.

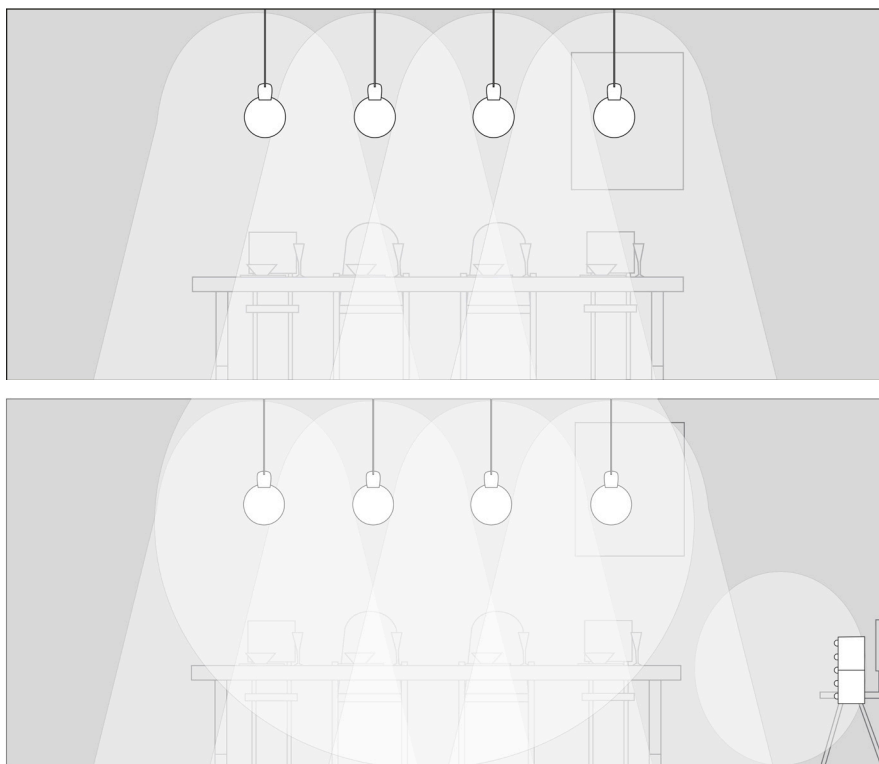


Figura 6.8. La imagen de la zona superior muestra la iluminación foco C, vista general sobre un perfil de la habitación. La imagen de la zona inferior muestra la combinación de iluminaciones; focos superiores (foco C), foco inferior (foco F), y luz natural (ventana).

### 6.3.3 Comportamiento de la Luz en Elementos Significativos

En este apartado también se tienen en cuenta superficies principales sobre las que la luz actúa de manera significativa. Tanto esta escena, como la escena anterior del baño, comparten un elemento en común; la ventana. En este caso, la luz entrará a través de una ventana situada en una pared lateral de la habitación, luego este elemento entrará en consideración.

De distinta manera que en la escena del baño, ya que este constaba de un par de elementos fundamentales para la trayectoria de la luz, como son los espejos, al ser una escena que carece de este tipo de material, se pasa a considerar de manera individual otro elemento significativo del que la iluminación dependerá en función del tipo de material del que esté formado; las bombillas de cristal que cuelgan del techo. No sólo influirá el material en el tipo de iluminación del mismo objeto, si no que también, la luz que va a entrar por la ventana (y a su vez dependiente del tipo de cristal a utilizar) quedará o no reflejada sobre el cristal de la bombilla. Finalmente se elige cristal dieléctrico tanto para la ventana como para el cristal de las bombillas debido al mayor campo iluminado (ver Figura 6.10).

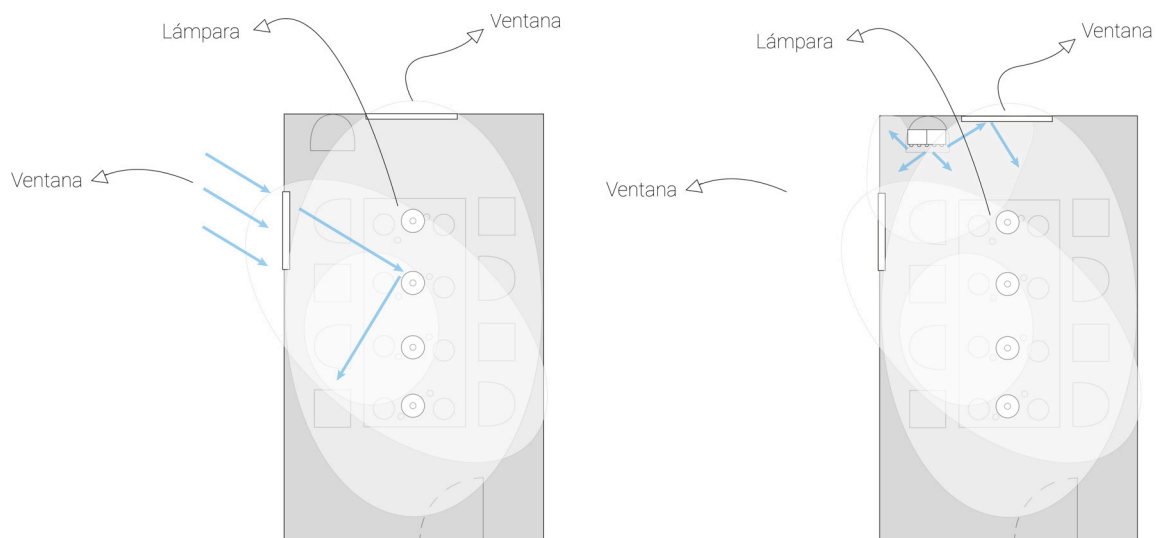


Figura 6.10. Imagen izquierda, recorrido de la luz transmitida y reflejada por los cristales dieléctricos. Imagen derecha, recorrido de la luz transmitida y reflejada por la fuente de iluminación F sobre la ventana del la zona Fondo. La luz emitida procede de las pequeñas esferas colocadas a lo largo del área del objeto, luego la luz se dispersará chocando una parte de ella contra el cuadro colocado detrás, provocando así su reflejo y una mayor iluminación sobre esa zona que no consta de ninguna fuente de luz.

### 6.3.4 Distribución de la Iluminación Zona a Zona

Sobre la zona central de la escena, se mantienen encendidos los cuatro focos de luz seleccionados que pretenden aportar una iluminación general, aunque de pequeña radiancia, y abarcar el máximo área posible incluso con la ausencia de la luz natural, como se comprueba en la imagen izquierda del esquema gráfico de la Figura 6.11. Del mismo modo, el único foco inferior que está colocado sobre la silla de la zona Fondo, imagen del medio, también de menos radiancia que los focos superiores, produce una iluminación escasa, aunque deseada, para encontrarse encendido él solo.

Así mismo, la unión de los focos superiores con el foco inferior son un buen complemento para una iluminación reducida, como es el caso de esta escena al darle una importancia mayor la luz natural por el nivel de su exposición, que queda reflejado en la imagen de la derecha.



Figura 6.11. Esquema de simulación de la iluminación por separado sobre la escena en total oscuridad de los focos seleccionados. De izquierda a derecha; foco C, foco F, y de los focos C y F juntos.

# Resultados y Discusión

## 7.1 Pruebas de Algoritmos de Render

En este capítulo se lleva a cabo una comparación de los algoritmos de render descritos en el Capítulo 2, usando las dos escenas desarrolladas en los Capítulos 5 y 6. El objetivo es discutir los beneficios de cada algoritmo en cada escena, teniendo en cuenta qué caminos de luz son más evidentes, bajo tres tipos de iluminación; natural, artificial y la combinación de ambas, cada render bajo una resolución de 768x576, con 500 y 1000 muestras empleadas (aunque en este capítulo de la memoria sólo aparecerán con 1000). Las imágenes se han generado en alto rango dinámico (HDR), y transformadas a 8 bits para impresión usando mapeo de tono simple, basado en una curva gamma y un ajuste del valor de exposición.

Cabe destacar que el caso en el que ambas escenas presentan iluminación natural y artificial, no se considera necesario realizar explicaciones acerca de ello, dado que la luz natural tiene bastante importancia en estas condiciones y los resultados son muy parecidos a las escenas con iluminación natural. Luego tampoco aparecen en este apartado de la memoria. No obstante, tanto para una comparación de los algoritmos usados con iluminación natural y artificial y también para una mayor extensión explicativa de todo este capítulo, incluyendo tablas comparativas y más pruebas de renders, el lector puede acudir al Anexo \*.

### Iluminación Natural y Artificial

En esta sección analizamos el comportamiento de cada algoritmo para las dos escenas, iluminadas con sólo iluminación natural, procedente de un mapa de entorno iluminando la escena a través de las ventanas. Las distintas comparaciones se pueden ver en la Figuras 7.1 y 7.2.

Por otro lado, analizamos también los resultados de cada algoritmo eliminando la iluminación natural, y usando como fuentes de luz las múltiples fuentes presentes en las escenas. Las distintas comparaciones se pueden ver en las Figuras 7.3 y 7.4.

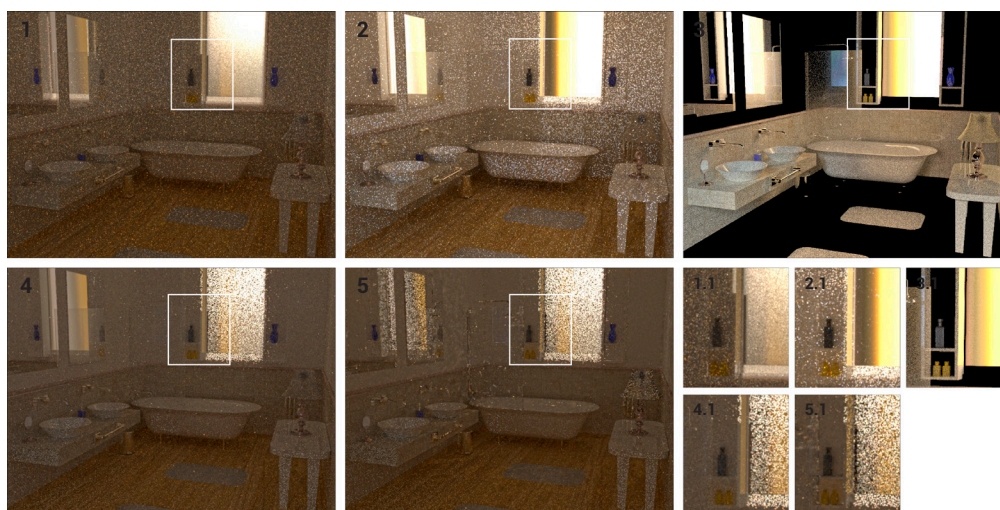


Figura 7.1. Imagen de la derecha, Escena Baño con iluminación natural renderizada con 1000 muestras. Las imágenes ampliadas hacen referencia a las zonas conflictivas del ruido de la misma escena, renderizada por los distintos algoritmos, en orden de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer (27 min), bidirectional PT (13 min), stochastic progressive photon mapping (42 min), primary sample space MLT (44 min), path space MLT (12 min).



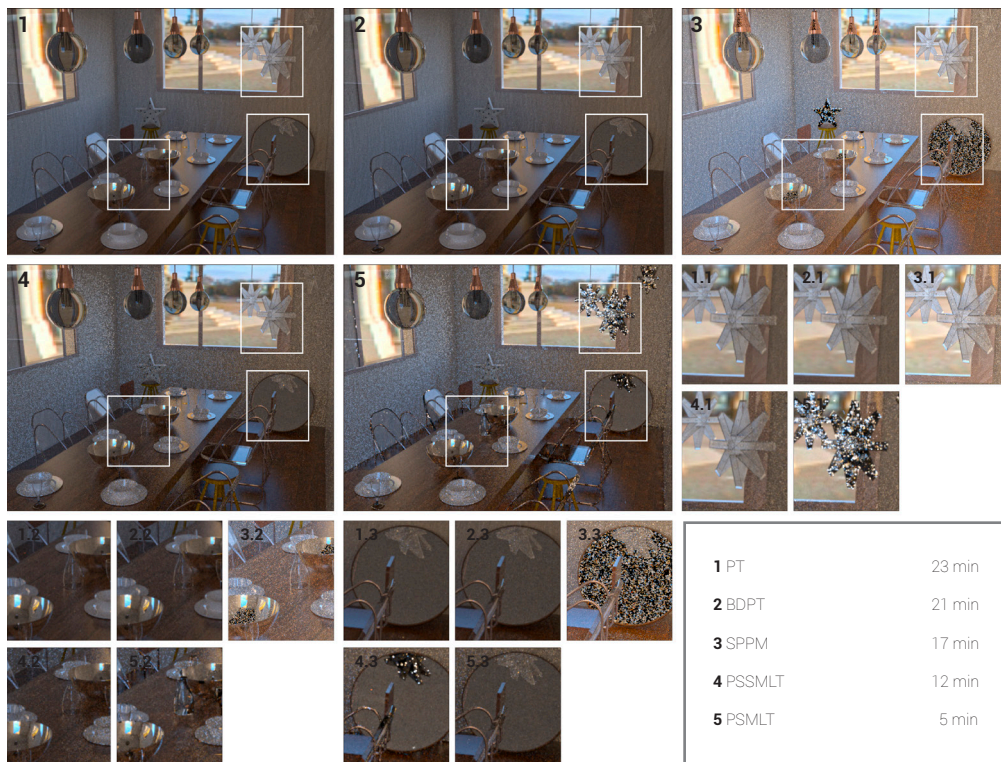


Figura 7.2. Escena Salón con iluminación natural renderizada con 1000 muestras. Las imágenes ampliadas hacen referencia a las zonas de ruido de la misma escena renderizada por distintos algoritmos.

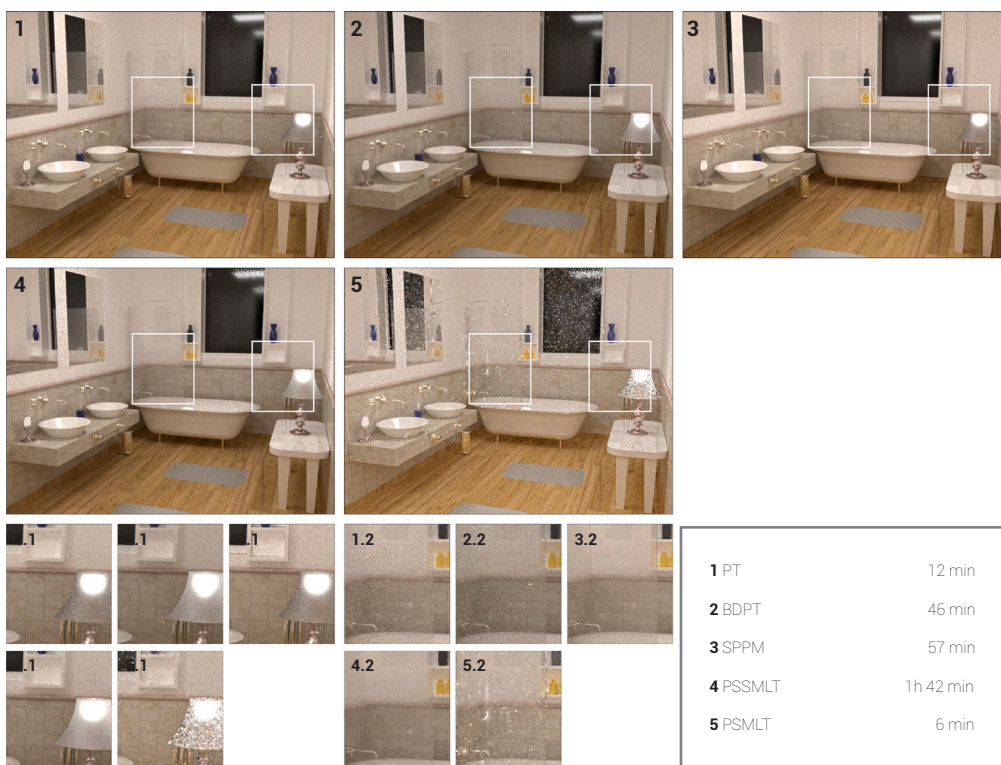


Figura 7.3. Escena Baño con iluminación artificial renderizada con 1000 muestras. Las imágenes ampliadas hacen referencia a las zonas de ruido de la misma escena renderizada por distintos algoritmos.

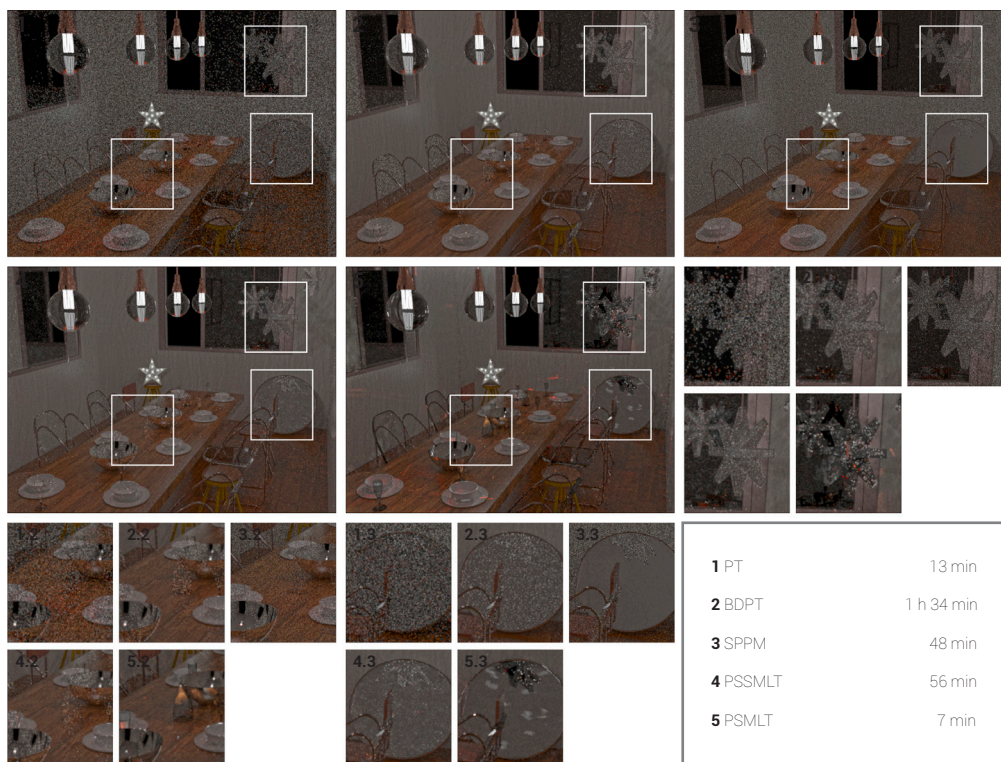


Figura 7.4. Escena Salón con iluminación artificial renderizada con 1000 muestras. Las imágenes ampliadas hacen referencia a las zonas de ruido de la misma escena renderizada por distintos algoritmos.

## 7.2 Discusión

PT y BDPT son dos algoritmos que se asemejan en la manera de generar imágenes, aunque distan bastante en su eficiencia. Tanto PT como BDPT son algoritmos relativamente buenos para el transporte de luz con elementos especulares, a iluminación de baja frecuencia. Sin embargo, PT es más rápido que BDPT, aunque produce samples de peor calidad, por lo que dependiendo del input, es preferible la utilización de uno u otro. Ambos actúan de manera similar generando un ruido uniforme sobre la escena y a ambos les resulta muy complicado encontrar el camino bueno entre una fuente de luz que está en sombra, es decir, que está ocluida por otra superficie que provoca una refracción de la luz, y un punto iluminado. En general, BDPT es como PT pero mejor en según qué configuraciones de luz (especialmente en oclusiones fuertes o zonas donde casi no llega la luz, por su capacidad de lanzar rayos en dos direcciones; desde el punto de vista o cámara y desde la fuente de iluminación, hasta que esos rayos convergen).

Para el transporte de luz en superficies difusas, PM es un buen algoritmo, ya que los fotones lanzados en su primera fase son ideales para luz de alta frecuencia (cáusticas) y mejores en superficies difusas. Además, es bueno encontrando caminos entre una fuente de luz ocluida por una superficie donde se produzca una refracción de la luz y el punto iluminado, ya que este algoritmo lanza fotones desde la propia fuente de luz y los usa en la interpolación. El problema vendría si al lanzar esos fotones no se encuentra con una superficie difusa. Este problema, sin embargo, es propio de la implementación que se utilice de PM: en nuestro caso, hemos usado la implementación de Mitsuba, que sólo usa los fotones para calcular la iluminación en superficies difusas. Además, la iluminación procedente de un mapa de ambiente es problemática para PM, sobretodo si los fotones trazados no son guiados para interactuar con la escena (por ejemplo, para atravesar una ventana). Las superficies especulares en el proceso de rendering de PM estarán cubiertas por su segunda fase, en la que un trazador de rayos parecido a PT lanza caminos de luz en todas las direcciones.

En transporte de luz de alta frecuencia, PSSMLT y PSMLT funcionan mucho mejor que Photon Mapping, aunque destaca en este tipo de algoritmos la concentración del ruido, que no es uniforme; da lugar a patrones estructurados muy visibles ya que centra las muestras en zonas brillantes. Las zonas con poca iluminación son submuestreadas, resultando un mayor ruido en esas zonas. Para cualquier MLT, al igual que PT y BDPT, también es complicado encontrar el camino bueno cuando existe un ocluidor entre la fuente de iluminación y el punto iluminado. La ventaja es que, una vez que ha encontrado ese camino, se queda con él y calcula mucho más rápido esa iluminación, ya que busca caminos de luz relevantes y cuando los encuentra, busca caminos vecinos para amortizar el coste de la búsqueda.



## 7.3 Renders Finales

Por último, se realizan una serie de renders finales sobre cada escena, donde se ha elevado el número de muestras reduciendo todo lo posible el error. Concretamente se ha ascendido a 14000 muestras por píxel en cada render, utilizando principalmente los algoritmos que menos ruido producían para ese número de muestras, así como los más apropiados para esa escena (Figura 7.4). Algún dato más sobre estas escenas, junto con alguna escena más, referirse al Anexo 3.



Figura 7.4. Escena Baño y Escena Salón, ambas dos con iluminación natural y artificial, renderizadas con 14000 muestras. El baño ha sido renderizado con PT, la escena del salón (vista general, imagen del medio) se ha renderizado con PT, mientras que la imagen de cerca de la vajilla del salón ha sido renderizada con BDPT.



# Conclusiones

En este TFG se ha llevado a cabo el desarrollo de un conjunto de escenas tridimensionales diseñadas con el objetivo de demostrar la robustez de los distintos algoritmos de render ante efectos de luz complejos, habiendo realizado un estudio de los puntos fuertes y débiles de esos algoritmos ante la simulación del transporte de luz, e identificándolos como unos requerimientos específicos que toda escena de este proyecto deberá tener. Posteriormente, se ha evaluado de manera individual el rendimiento de cada algoritmo dadas unas condiciones de iluminación específicas. Esto ha supuesto darse cuenta de que no todos los algoritmos de render sirven para lo mismo y de que siempre hay que probar cada algoritmo en distintas condiciones; a veces unos algoritmos han fallado en algo para lo que estaban diseñados dadas unas condiciones distintas de luz (por ejemplo, el render de PM para superficies difusas con iluminación de baja frecuencia tras una ventana). A veces, otros han generado menos ruido en zonas normalmente conflictivas dadas otras condiciones de luz concretas.

Pese a estos problemas, a través de un proceso en el que no sólo se ha observado que efectivamente el transporte de luz se hace difícil cuando se integran unas cualidades físicas que incrementan los rebotes de luz, sino que también se han observado las características, similitudes y diferencias tanto de los distintos materiales como de cada uno de los algoritmos ante diferentes efectos y apariencias. Esto ha permitido obtener un conocimiento a alto nivel sobre qué se debe emplear para realizar una determinada escena.

El trazador de rayos ha supuesto un cambio muy importante en el desarrollo de imágenes generadas por ordenador, y todavía falta camino para que la investigación avance hasta el punto de optimizar el coste computacional y reducir todo lo posible los impedimentos que este coste comporta. Pero lo que sí que está claro es que, aunque no exista un algoritmo que haga absolutamente todo bien, y que exista una gran variedad de algoritmos eficientes sólo para determinadas apariencias, que unos necesiten más muestras que otros u otros sean más efectivos para las mismas muestras, estos avances en cada uno de ellos irán convergiendo hasta solucionar, aplicando física y creando unos resultados más coherentes, todos los problemas que surgen con la luz.

## 8.1 Trabajo Futuro

A diferencia de la mayoría de proyectos de Diseño, este TFG no es un producto comercial, sino que está pensado como banco de pruebas para investigar nuevos métodos de simulación de transporte de luz. De hecho, ha sido desarrollado dentro de un grupo de investigación en ese ámbito. Así pues, el trabajo futuro más obvio es la transferencia de dichas escenas y su test en nuevos algoritmos. Por ello, consideramos que más que un producto comercial, es producto académico, del que otros investigadores puedan beneficiarse de estas escenas tridimensionales, diseñadas para que, aun siendo realistas, contengan una buen número de caminos de luz complejos, y utilizarlas como banco de pruebas para futuras investigaciones centradas en simulación del transporte de luz.

También, otro camino relacionado con el anterior es el de continuar con el diseño y desarrollo de escenas complejas para el transporte de luz y utilizar el resto de algoritmos que no se han utilizado dadas las condiciones de las escenas. Escenas con medios participativos (copa de líquido sobre una superficie especular, bruma o niebla sobre una habitación), escenas con iluminación de alta frecuencia (cáusticas generadas por un elemento metálico con forma toroidal), etcétera.

## 8.2 Conclusiones Personales

Si hay algo que deba resaltar de haber hecho este trabajo fin de grado, y en concreto, haberlo realizado en el Graphics and Imaging Lab, es todo lo aprendido desde el primer día que puse el pie en el laboratorio. Gracias a esto, he podido tener una visión general del mundo de la informática gráfica a alto nivel, he conocido ramas y conceptos que forman parte de ese mundo y que hoy en día representan el futuro de la informática gráfica. Me he adentrado un poco más y he podido observar desde una perspectiva diferente lo que rodea al sector del cine en lo referente a los motores empleados para generar imágenes por ordenador, y este pequeño conocimiento, es el que me ha entusiasmado desde el principio y me ha hecho descubrir qué es lo que me gusta. Todos estos conocimientos adquiridos y todo lo que he podido aprender a lo largo de la elaboración de este proyecto, me gustaría aprovecharlos en un futuro cercano.

Profundizando un poco más en la informática gráfica, el aprender qué es, cómo funciona y el estado de arte del render basado en física, ha sido unas de las cosas que más ha llamado mi atención. Conocer los distintos algoritmos utilizados para optimizar los cálculos del transporte de luz en según qué condiciones, y saber por qué ante un tipo de materiales reaccionan de una determinada manera, me ha gustado mucho.

Por otro lado, este proyecto me ha permitido generar escenas fotorealistas desde cero, las cuales hasta ahora nunca había sabido crear, usando durante todo el proceso herramientas potentes que son el estado del arte; desde el desarrollo de conceptos hasta el render, pasando por el modelado, asignación de materiales e iluminación. Como consecuencia, también ha surgido algún obstáculo en el camino, un ejemplo es que Mitsuba, al ser un producto académico, tiene ciertos problemas de usabilidad en la aplicación de materiales e iluminación a la escena, y esto ha supuesto un exceso de tiempo a la hora de asignar estas propiedades.

No obstante, este trabajo fin de grado me ha enseñado otras cosas importantes como ingeniera. Me ha enseñado sobretodo a saber que las cosas, para que salgan bien, se deben pensar con calma y organizar, a puro de arrepentirme en lo que tendría que haber diseñado sobre papel anteriormente. También me ha enseñado a fijarme más en tener un tipo de escritura más formal, con más referencias y más ordenada, ya que en muchas ocasiones anteriores mi método para plantear una estructura de un proyecto ha sido más alocado. Este TFG ha hecho que ponga en práctica buenos procedimientos y rutinas que estoy segura de que me servirán de ahora en adelante en otros proyectos, y me ha hecho disfrutar de cosas completamente nuevas para mí.

# Bibliografía

- [Kur11] Noriko Kurachi, **"The Magic of Computer Graphics"**. A K Peters/CRC Press, 2011.
- [Rit11] Tobias Ritschel, Carsten Dachsbacher, Thorsten Grosch, Jan Kautz. **"The State of the Art in Interactive Global Illumination"**. Eurographics STARs2011.
- [Jak14] Wenzel Jakob, **"Mitsuba documentation"**. Version 0.5.0, 2014.
- [Kap14] Anton Kaplanyan, Carsten Dachsbacher. **"The Natural-Constraint Representation of the Path Space for Efficient Light Transport Simulation"**. SIGGRAPH 2014.
- [Geo12] Ilyian Georgiev, Jaroslav Krivanek, Tomas Davidovic, Philipp Slusallek. **"Light Transport Simulation with Vertex Connection and Merging"**. SIGGRAPH Asia 2012.
- [Jak12] Wenzel Jakob, Steve Marschner. **"Manifold Exploration: A Markov Chain Monte Carlo Technique for Rendering Scenes with Difficult Specular Transport"**. SIGGRAPH 2012.
- [Fx13] Mike Seymour, **"The State of Rendering Part 1"**. Fxguide 2013
- [Fx2014] Mike Seymour, **"Manuka: Wera Digital's new Renderer"**. Fxguide 2014
- [Gan92] Rüdiger Ganslandt, Harald Hofmann, **"Handbook of Lighting Design"**. 1992
- [Bdp14] BDP, **"Lighting Design Concept Proposals. Manchester Cathedral"**. 2014

ANEXO 1  
Escena *Baño*:  
Diseño y desarrollo



# 1 Fase 1: Generación de Ideas y Conceptos

Como primera fase del proceso de desarrollo de la escena, nos centramos en el diseño conceptual de la misma, basado en los requisitos descritos en el Capítulo 4. Para ello, antes de comenzar con la conceptualización, primero determinamos el tipo de escena a desarrollar, para después realizar una búsqueda de posibles influencias que den con el primer diseño a alto nivel sobre el que trabajaremos. A partir de ese primer concepto, desarrollaremos una evolución de las distintas formas y materiales a incluir en la escena, hasta llegar al diseño final que se modelará y texturizará en las siguientes fases.

## 1.1 Influencias

El objetivo de realizar una búsqueda de influencias se centra en localizar escenas reales que presenten un nivel alto de complejidad del transporte de luz, y en particular, que resulten complejas de simular utilizando los algoritmos existentes. Como hemos discutido anteriormente, para ello se incluirán superficies con materiales complejos, en particular con un alto grado de especularidad, de modo que el transporte de luz especular (cáusticas, por ejemplo), sea muy dominante en la escena. Así mismo, también se incluirá un número elevado de fuentes de luz, ya que su inclusión incrementa significativamente el coste de render, tanto luz natural como luz artificial. Por tanto, considerando que la luz y su tipología deben jugar un papel importante en la escena, se opta por la elección de una escena interior de un hogar para la búsqueda de influencias. Esto es debido a dos motivos; primero, en una escena interior es común un mayor número de fuentes de luz focalizadas hacia distintos puntos, además de iluminación natural, ya que se cree necesaria la existencia de distintos focos de iluminación interior colocados en lugares concretos que provoquen sombras y reflejos sobre los elementos de un entorno que sólo es posible si es cerrado, ya que si es abierto y este consta de una luz diurna, la iluminación del entorno quedará por encima de estas luces.

El segundo motivo por el que se elige una escena interior se debe a que en este tipo de escenas detalladas sobre un entorno específico (por ejemplo, el despacho de una oficina), prevalecen los elementos artificiales sobre los naturales, que encontramos en una escena exterior. Estos elementos artificiales suelen tener materiales más especulares, con superficies de mayor acabado (pulido, abrigantado,...) cuyas formas geométricas facilitan un reflejo más claro de la luz. Además, de entre todas las habitaciones de un hogar se piensa que un baño puede ser más acertado y puede suponer un mayor desafío para el transporte de luz por lo que respecta a la cantidad de elementos y superficies especulares de las que puede disponer, tales como materiales compuestos de capas de barniz, cristales, espejos, cerámica en lavabos, grifos metálicos, recipientes acristalados, y otros accesorios. Las paredes, además, suelen estar compuestas por baldosas cerámicas en lugar de materiales difusos que sí se encuentran en otras habitaciones, y también se puede encontrar tejido, como toallas.

De entre todas las imágenes usadas como inspiración, decidimos utilizar como base la mostrada en la Figura 1 debido a múltiples motivos: podemos encontrar todo lo que previamente buscábamos en una escena interior de un baño. Además, tiene una distribución de elementos más organizada a diferencia de los otros baños; la encimera colocada a la izquierda sobre la que se apoyan los lavabos cerámicos, la bañera centrada con la ventana, al fondo, y el lateral derecho. Esta distribución facilita que al ubicar la cámara a la hora de generar la imagen, va a tener espacio suficiente para abarcar desde una perspectiva el mayor número posible de elementos pertenecientes al baño. Finalmente, la distribución de la luz procedente desde el centro de la habitación y en distintos puntos focalizada, como en las estanterías, es otro motivo por el que se selecciona este baño como escena ejemplo.



Figura 1. Influencias. La imagen de la izquierda consta de la escena ejemplo seleccionada. Baño con iluminación natural y artificial. Las imágenes de la derecha constan de distintos baños estudiados con iluminación natural o artificial.

## 1.2 Evolución Formal y Asignación de Materiales

Una vez habiendo seleccionado la escena que usaremos como base, se procede con el desarrollo de ideas y la plasmación de las mismas mediante la elaboración de bocetos sobre papel. Para ello, se lleva a cabo una evolución formal sobre los distintos elementos de la escena.

Para facilitar la descripción de dicha conceptualización, se realiza una subdivisión de la escena en tres zonas, en las que se incluirán los objetos de interés de la escena. Es por ello por lo que se elabora un plano general de la escena, con el objetivo de esclarecer las distintas zonas de las que se va a llevar a cabo la conceptualización, como refleja la Figura 2. La zona A consta de una encimera sobre la que se sustentan dos lavabos y la pared, sobre la que están anclados los grifos y los espejos. La zona B principalmente es el lugar de ubicación de la bañera, que a su vez está centrada con la ventana y dos estanterías a su lados. La zona C consta de un mueble auxiliar sobre el que se apoyará algún elemento.

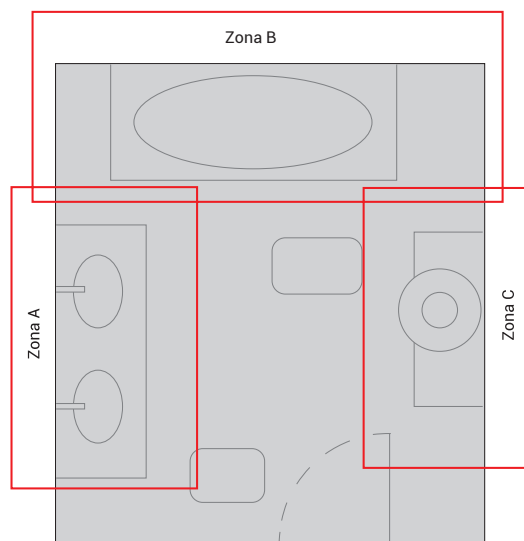


Figura 2. Plano general del baño, así como su subdivisión en las diferentes zonas sobre las que se desarrollará la evolución formal.



## Aspecto General de la Escena

El aspecto general del baño va a sufrir modificaciones formales en muchos de sus elementos, de tal forma que poco a poco van a ir adaptándose a los requisitos establecidos. La Figura 3 muestra los materiales generales del entorno a aplicar en un primer momento, a modo de base sobre la cuál se comenzará a modelar. En cuanto a la apariencia básica de la habitación, se preserva tanto el parquet laminado del suelo. En un principio se mantiene, pero probablemente la pared difusa pintada de blanco sufrirá sus propias modificaciones que den más juego a la escena desde el punto de vista de la luz.

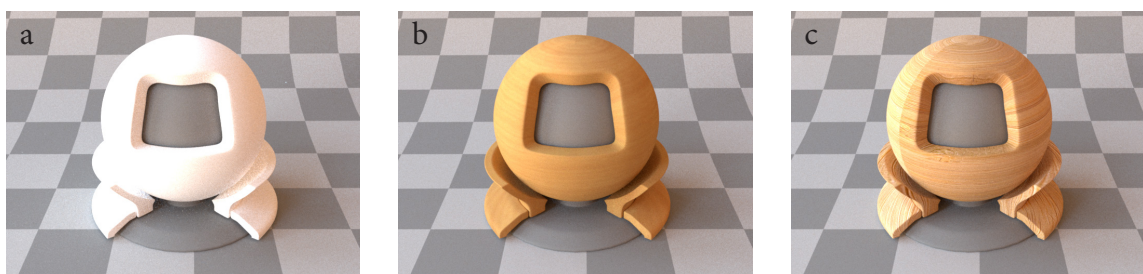
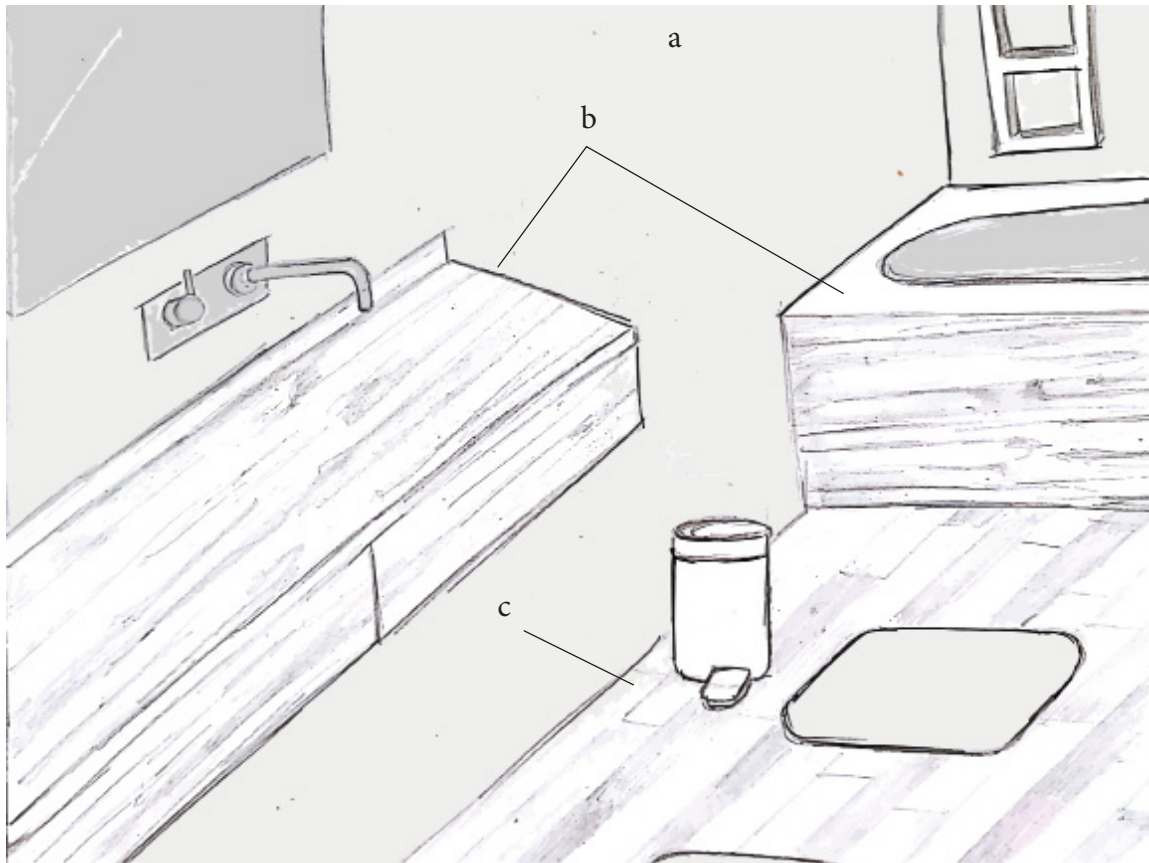


Figura 3. En la zona inferior se sitúan materiales a emplear en esta parte de la escena definidos como a, b, y c. Siendo "a" un material difuso que simule el yeso de la pared, "b"; madera oscura, y "c"; madera clara. Señalizada la asignación sobre bocetos.

## Zona A: Lavabos

En esta zona, el espacio superior está cubierto por dos espejos de superficie rectangular situados sobre una encimera en la que se colocan dos lavabos ovalados. Dos grifos se encuentran anclados a la pared en la zona superior y una papeleras cilíndrica llena el espacio inferior, por debajo de la encimera.

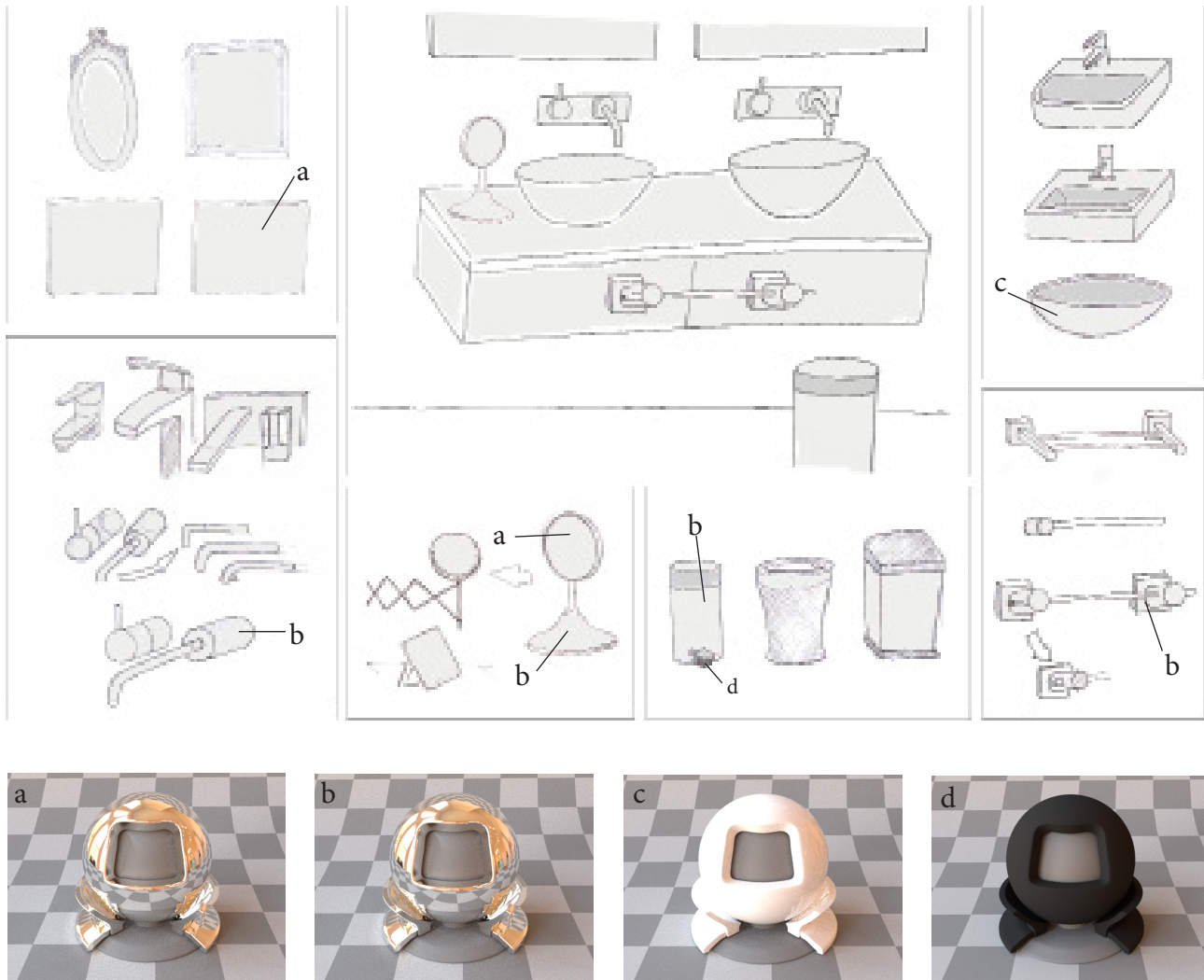


Figura 4. Zona superior; vista rápida sobre el desarrollo conceptual de cada accesorio perteneciente a la zona A de la habitación. A) Desarrollo conceptual del espejo. B) Grifos de baño. C) Espejo pequeño de mesa. D) Papeleras. E) Toallero de encimera. F) Lavabos. Zona inferior; materiales a emplear en esta parte de la escena definidos como a, b, c y d. Siendo "a" similar a un espejo, "b"; metal con amplio grado de reflectividad, "c"; plástico que simula cerámica, "d"; material difuso con acabado mate. Señalizada la asignación sobre bocetos.

La evolución formal que sufre cada elemento de la escena se plasma de manera diferente. El objetivo de los espejos ubicados en el lateral izquierdo de la habitación, es que reflejen también el cristal de la ventana exterior y su luz proveniente, por lo que cuanto más amplia sea su superficie, existirá una mayor complejidad para el transporte de luz. Es por esto por lo que el proceso de desarrollo que siguen finaliza con dos espejos ( en lugar de uno) sin marco y con un tamaño de superficie considerable, como refleja la Figura 4.

El desarrollo formal de los grifos termina por mantener la estructura inicial, sobre la que un tubo curvo está soldado a una base cilíndrica. De esta manera y debido a que el objetivo es que tenga un material metálico especular con un acabado pulido (se perciba como un espejo), debido a su geometría, se mantenga también la dificultad del modo en que la luz se refleja.

Sobre el lateral izquierdo de la encimera se coloca **un espejo de mesa** con el objetivo de dotar a la luz de una trayectoria mayor sobre la escena. El concepto final es un espejo con contorno circular cuya base presenta formas redondeadas y suaves.

Colgado de la encimera también se coloca **un toallero**. Se conceptualizan distintos tipos hasta llegar a uno un poco más complejo; dos cilindros en los extremos sobre una base cuadrada, con una varilla de acero para sostener la toalla. El acabado vuelve a ser el mismo que el de los grifos; metal pulido.

**La papelerera** consta de un material de apariencia física similar al de los grifos, especular. Se desarrollan distintos bocetos de papeleras para elegir finalmente el concepto de forma cilíndrica debido a las cáusticas que puede provocar sobre el suelo su estructura formal. .

Tras el planteamiento de modificar el aspecto formal de **los lavabos**, se concluye también manteniendo la estructura inicial ovalada con el objetivo de favorecer cáusticas. Para emular el brillo y el color blanco del lavabo, se emplea un material similar a la cerámica o a la resina sintética.

## Zona B: Bañera

Sobre la pared central del baño, constituyendo el centro donde va a estar situada una bañera, acaparará el espacio una gran ventana de cristal semi-opaco, por donde va a entrar la mayor parte de la luz de la escena. A sus laterales, se situarán un par de estanterías de obra, del mismo material difuso del que, en un principio, estará dotado la pared. Un par de alfombras de nylon serán colocadas el suelo.

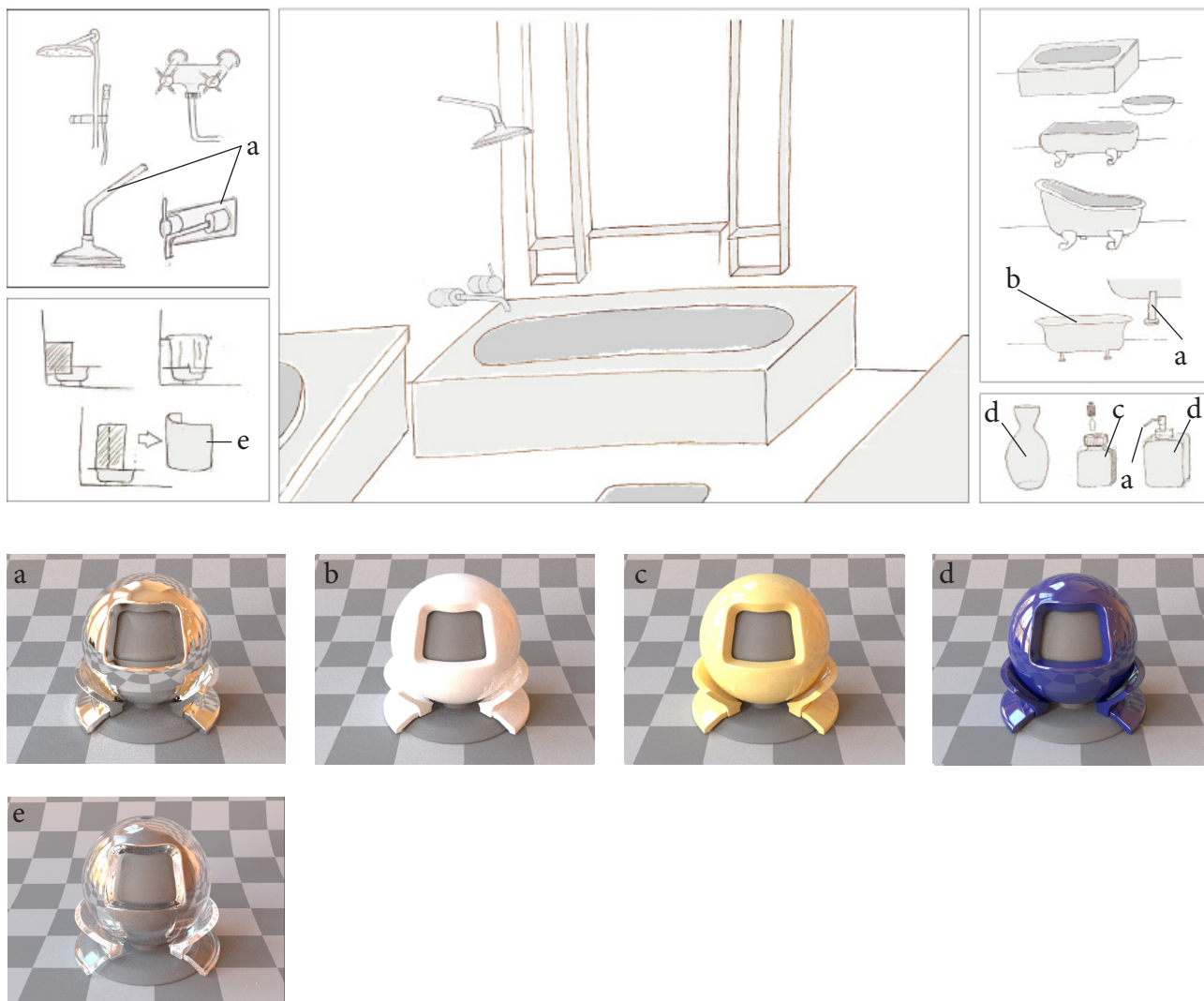


Figura 5. Zona superior; vista rápida sobre el desarrollo conceptual de cada accesorio perteneciente a la zona B de la habitación. A) Desarrollo conceptual de la alcachofa de la ducha. B) Bañera. C) Mampara de la bañera D) Recipientes de baño. Zona inferior; materiales a emplear en esta parte de la escena definidos como a, b, c, d y e. Siendo "a" de apariencia metálica con amplio grado de reflectividad,, "b"; plástico que simula cerámica, "c"; plástico especular, "d"; plástico especular con cierto brillo, "e"; cristal dieléctrico. Señalizada la asignación sobre bocetos.

Para la evolución formal de **la alcachofa de ducha** se opta por una forma sencilla; tubo cilíndrico curvo y alcachofa plana con bordes redondeados. Para una mayor coherencia con los restantes elementos de la escena del baño, se determina el aprovechamiento de los grifos del lavabo sobre el de la bañera. Esta evolución formal, al igual que la del resto de elementos, se puede observar en la Figura 5.

**La bañera** evoluciona hacia formas más orgánicas, evitando las aristas vivas y destacando las curvas, hasta llegar a un diseño más suave y menos agresivo. En una primera instancia se piensa en el diseño de unas robustas patas que van a acompañar su geometría orgánica, pero puesto que la bañera va a ocupar parte de la escena y sólo va a estar compuesta por un material, se decide darle una vuelta al diseño de las patas y elegir otras que presenten menos detalle pero puedan ser capaces de soportar otro material, para añadir complejidad a la zona inferior del suelo que ocupa la bañera. El diseño final de la bañera suplanta las patas de la bañera "orgánica" convencional, por otras cilíndricas más sencillas y compuestas por otro material.

El desarrollo de **una cobertura para la bañera** viene determinado en un primer momento por una lámina fina de plástico rígido que simule el cristal y que haga las veces de mampara de ducha o bañera. En la escena diseñada esta mampara no se percibe a penas, al ser totalmente plana y de cristal, por lo que esta idea se deja de lado por una cortina de ducha colgada de un tubo cilíndrico. Finalmente se abandona esta idea por una mampara curva adaptada a la forma de la bañera que la cubra del todo.

Por último se lleva a cabo una conceptualización de **tres tipos de recipientes** que serán colocados sobre la estantería, a modo de botes de jabón, cremas, etc.

## Zona C: Mesa Auxiliar

En esta zona se decide incluir una mesa auxiliar que rellene la habitación, y que incremente la complejidad geométrica de la misma. Además, como se describe más adelante (Sección 3.1), se decide incluir una luz de relleno para a) aumentar la complejidad lumínica en la escena, y b) rellenar una zona visualmente más oscura. Para la luz se plantea una lámpara de mesa, o bien una lámpara de pared a baja altura, favoreciendo una iluminación más focalizada hacia el centro de la escena.

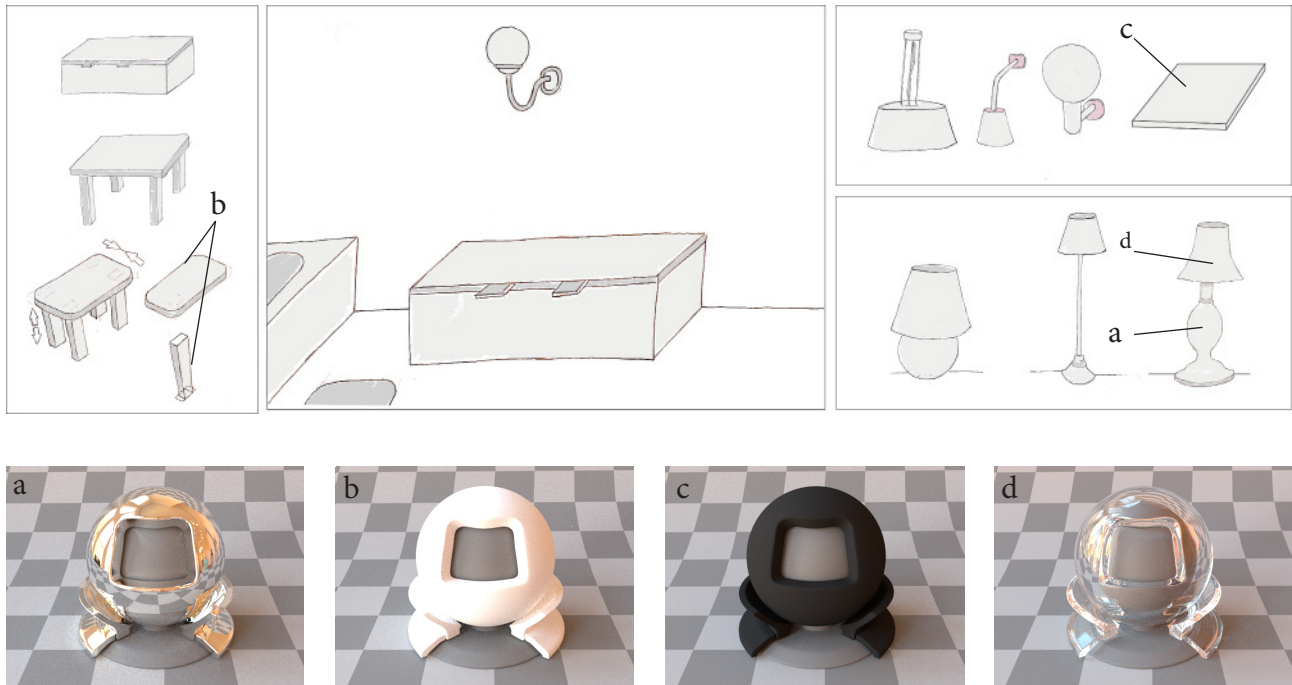


Figura 6. Zona superior; vista rápida sobre el desarrollo conceptual de cada accesorio perteneciente a la zona C de la habitación. A) Desarrollo conceptual del foco superior. B) Foco inferior. C) Mesa auxiliar. Zona inferior; materiales a emplear en esta parte de la escena definidos como a, b, c y d. Siendo "a" de apariencia metálica con amplio grado de reflectividad,, "b"; plástico que simula cerámica, "c"; material difuso negro (no entrará en consideración debido a que el objeto será emisor de luz), "d"; cristal dieléctrico. Señalizada la asignación sobre bocetos.

Se procede entonces al diseño de dos focos de iluminación; uno ubicado sobre el baúl de la parte derecha de la escena, apoyado sobre él, y uno o dos focos anclados o colgados al techo, ocupando el centro de su superficie, como muestra la Figura 6.

En el caso de **la iluminación general**, la cual se sitúa sobre la zona superior del techo, se lleva a cabo un desarrollo del concepto inicial hasta llegar a un panel de iluminación de cristal, de superficie rectangular, ya que esa zona del techo no va a ser visible a la hora de generar el render y cuanto más superficie abarque para iluminar, habrá un mayor transporte de luz (aunque de más baja frecuencia).

En el caso de **la iluminación focalizada**, se desarrolla una forma más curva y orgánica para el área de revolución de la base de la lámpara.

Debido a que es necesario que esta tenga un soporte consistente, y con el objetivo de aportarle a la escena un nuevo elemento con una apariencia distinta, tanto formalmente como por parte de sus materiales, se determina diseñar **una mesa** en lugar de un baúl. Se desarrolla una mesa con las esquinas redondeadas, y se lleva a cabo una modificación de la mesa inicial en la sección de la zona inferior de las patas.



## Diseño Final

Una vez desarrollados formalmente cada uno de los elementos del baño, se representa, como muestra la Figura 7, el concepto final, bocetado a modo de previsualización de la escena que será renderizada, donde se visualiza ya con los materiales finales.

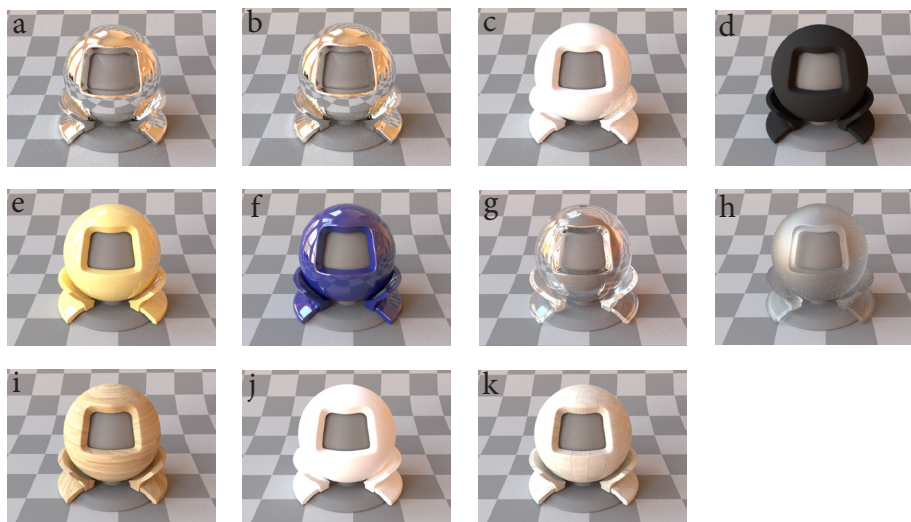
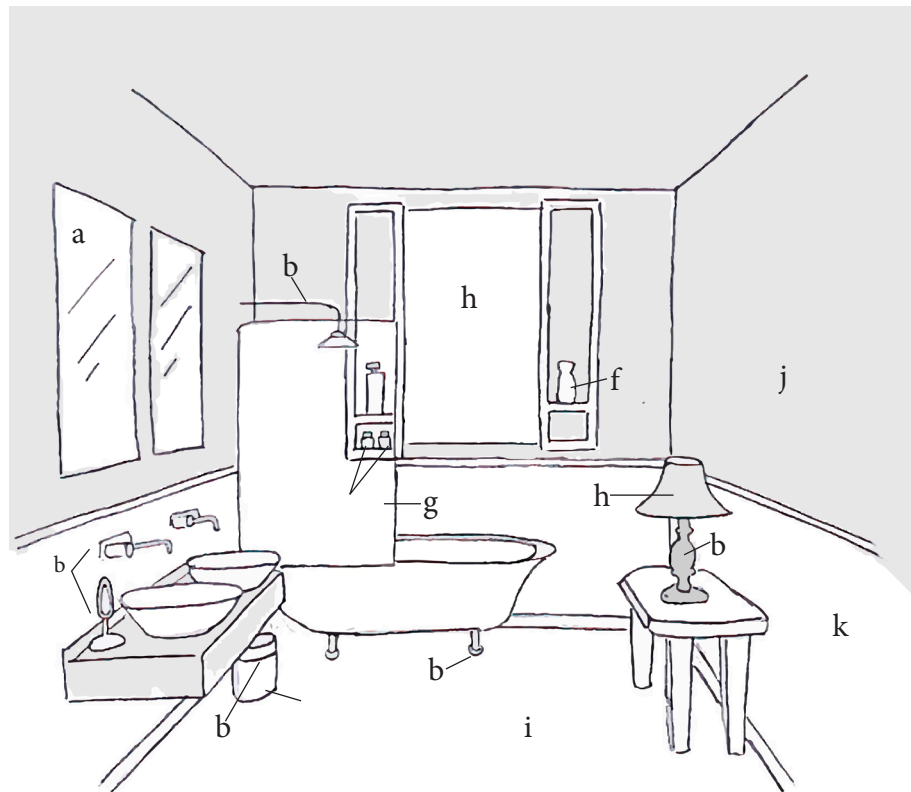


Figura 7. Asignación de materiales pertenecientes a cada elemento sobre el diseño final de la Escena Baño. Señalizada la asignación sobre el boceto superior. Siendo "a" similar a un espejo, "b"; metal con amplio grado de reflectividad, "c"; plástico que simula cerámica, "d"; material difuso con acabado mate, "e"; plástico especular de color amarillo, "f"; plástico especular con cierto brillo al tener un color azul oscuro, "g"; mezcla de cristal dieléctrico y cristal rugoso, "h"; cristal rugoso, "i"; material difuso con textura de madera laminada, "j"; material difuso blanco, "k"; material difuso con textura de baldosas.

## 2 Fase 2. Modelado y Ensamblaje

En esta fase se lleva a cabo un proceso de modelado tridimensional de la escena diseñada, a partir de los bocetos finales surgidos de la evolución formal mostrada en la sección anterior. Para ello, primero se realiza un modelado de las piezas en Autodesk Inventor y posteriormente se lleva a cabo un ensamblado de la escena y asignación de materiales en Autodesk 3ds Max.

### 2.1 Modelado Tridimensional

Se elige Autodesk Inventor 2014 para el desarrollo 3D debido al tipo de elementos a construir. Todos los elementos de esta escena han sido diseñados previamente, luego es preferible usar un programa que permita un modelado preciso de formas geométricas, en lugar de herramientas digitales de escultura más apropiadas para modelar objetos orgánicos. Además, se requiere de un programa que presente parámetros restrictivos tales como perpendicularidad, concentricidad, etc, o métodos que limiten la interferencia entre varias partes de la pieza, con el fin de que la pieza final no presente las imperfecciones que sí pueda presentar una pieza orgánica. En la Figura 9 se puede observar su interfaz.

Primero, modelamos habitáculo o habitación que sirva de "recipiente" a todo el conjunto de elementos de la escena. Las dimensiones de esta habitación todavía no van a ser fijas, por lo que sólo una vez ya en el programa de unión de estos elementos y una vez estén todos ellos integrados, se llevará a cabo una modificación de la escala de la habitación que los contiene, de tal manera que esté adaptada a estos. Posteriormente se realiza el modelo de cada elemento perteneciente a la escena. Para ello, se tiene en consideración que no sean elementos muy enrevesados cuyo montaje implique una gran cantidad de ensamblajes, ya que la complejidad estará dada por el conjunto de la escena. No obstante, los ensamblajes serán necesarios a la hora de asignar materiales a cada parte de un objeto. Además, cada elemento deberá estar detallado para aportar a la escena el máximo realismo posible. En el caso de esta escena, la metodología a seguir, expresada a alto nivel, para modelar los distintos elementos, ha sido la siguiente:

- Solevación entre dos superficies distintas ayudadas por planos de trabajo
- Empalmes y suavizados en aristas para evitar contornos y esquinas agresivas (geometría suave)
- Vaciados de pieza
- Extrusiones de superficies simples
- Barridos entre una superficie y un carril guía para crear piezas de una forma determinada cuya largura sigue un recorrido
- Creación de perfiles y superficies de revolución.

En general se hacen presentes las formas redondeadas y las curvas en los volúmenes cilíndricos excesivamente alargados, abunda la geometría cilíndrica modificada en sus proporciones y los elementos son creados sin apenas motivos orgánicos, cuyas estructuras no sean demasiado complejas.

Los elementos que aparecen en este dossier se han dispuesto siguiendo el esquema de la Figura 8.

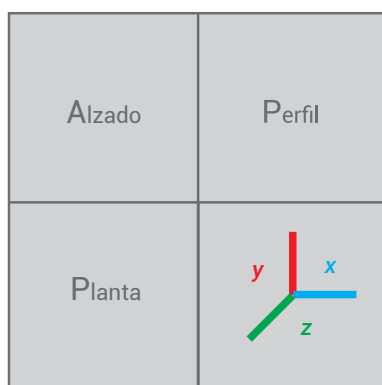


Figura 8. Esquema disposición modelos.

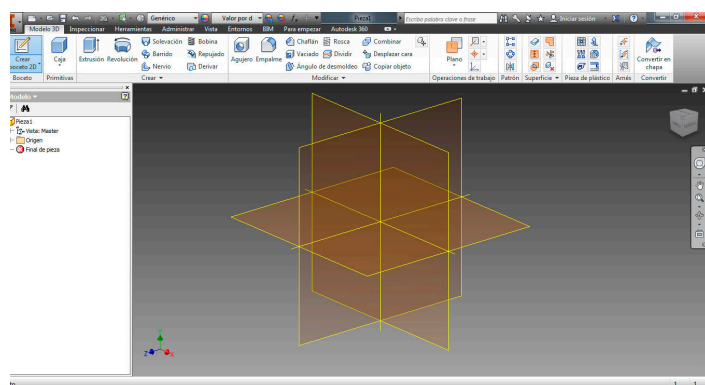


Figura 9. Interfaz Autodesk Inventor 2014.



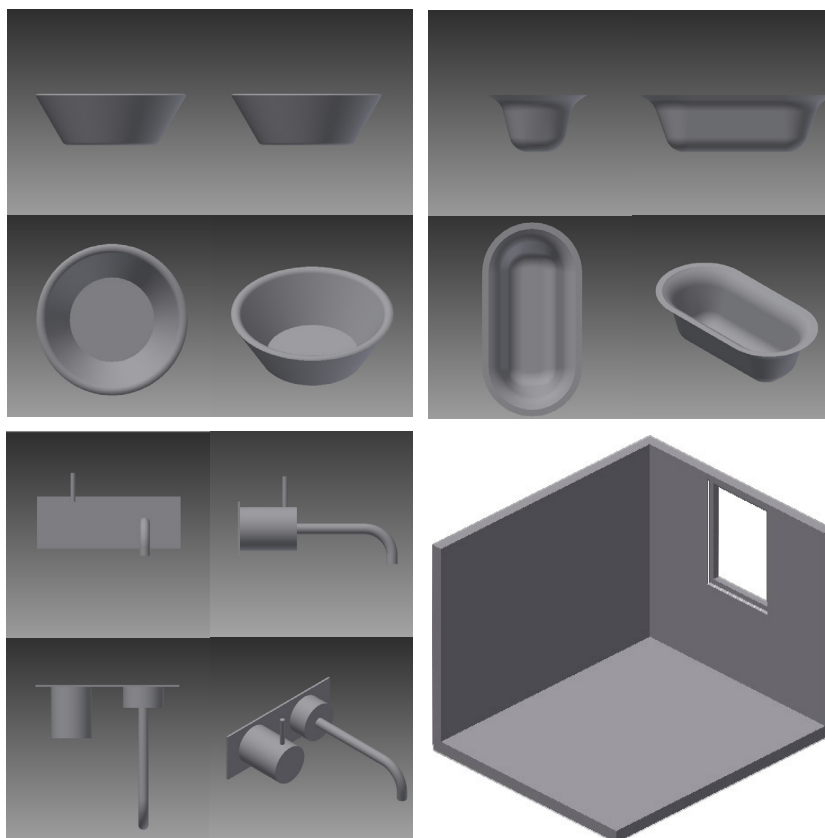


Figura 9. Alzado, planta, perfil y vista isométrica para los modelos del (de izquierda a derecha y de arriba a abajo) lavabo, la bañera y el grifo del lavabo. Como geometría de la habitación (abajo derecha) se desarrolla una habitación con forma de hexaedro, con una ventana en la pared del fondo (vista isométrica, nótese la eliminación de las paredes ocluidoras para poder ver el interior de la habitación).

## 2.2 Ensamblado

Una vez se ha modelado cada uno de los componentes de la escena en Inventor, se importa cada una de las piezas a un programa intermediario de modelado como es Autodesk 3Ds Max 2016 (Figura 10), ya que la importación en este formato va a ser más sencilla. Esto es debido a un fácil posicionamiento de los objetos sobre la escena y que además, el programa consta de una vista preliminar de la apariencia en el proceso de asignación de los materiales.

Como en el apartado anterior, se deberá empezar a ensamblar la parte que va a contener a todos los elementos pertenecientes al baño, a modo de base y referencia de la que partir, luego se elabora la unión de las dos partes (o los dos habitáculos) que conforman la habitación de la escena 3D, compuesta ahora por el doble de componentes estructurales (ver Figura 11). Entonces, se realiza la unión de cada una de las partes de cada componente, conformando así un objeto completo con cuyos elementos se puede interactuar individualmente. Una vez colocado cada elemento en la posición en la que debería estar ensamblado respecto al objeto final, se agrupa. Posteriormente, se procede a ubicar cada elemento ensamblado en la posición final que deberá ocupar sobre el habitáculo, y que deberá poseer a la hora de realizarse el render. Algunas de las características que presentan los componentes de los ensamblajes son las siguientes: existe una cierta simplicidad en los volúmenes que no se van a ver, como es el caso de la bombilla de la lámpara de la Figura 12, cuya forma está representada en una esfera debido a que va a ser tapada por la pantalla. Los ensamblajes también están muy simplificados. Están compuestos por dos o tres piezas por cada elemento. El espejo de mesa se compone únicamente de una estructura (base de apoyo y aro) y la superficie de reflejo, sólo dividiéndose en partes los materiales que van a ser distintos. Además, algunos elementos adicionales van integrados también en el mismo grupo de elementos unidos (imagen inferior derecha de la Figura 12).

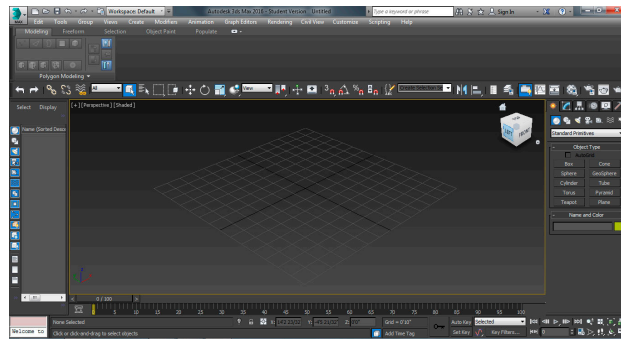


Figura 10. Interfaz Autodesk 3Ds Max 2016.

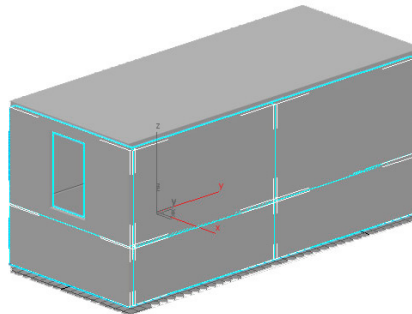


Figura 11. Habitaciones unidas.

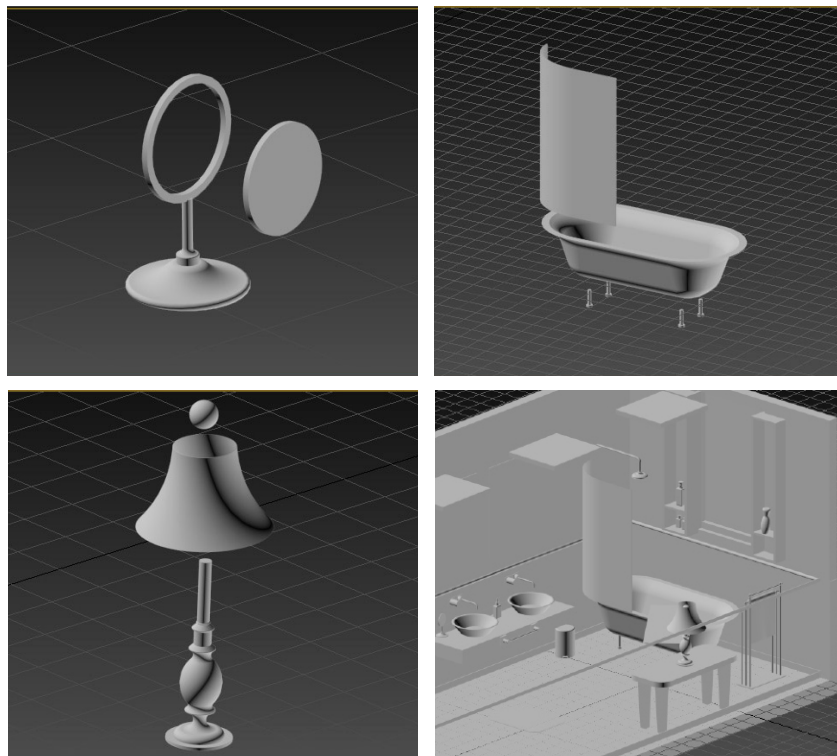


Figura 12. De izquierda a derecha y de arriba a abajo; espejo con un ensamblaje de sólo dos piezas de distintos tipos de material, bañera con un elemento adicional agrupado, la mampara, bombilla de volumen simplificado en el interior de la lámpara, y la última imagen aparece representada por la unión y ubicación de los elementos en el interior de la habitación..

## 3 Fase 3. Iluminación

En esta fase se lleva a cabo una distribución de los focos de luz que van a aparecer en la escena, discutiendo las razones de su ubicación en base al tipo de iluminación que se quiere enfatizar. Posteriormente se mostrarán las preferencias sobre el tipo de iluminación que deba aparecer según las condiciones que presente la escena.

### 3.1 Distribución de la Iluminación

Debido al área rectangular de la habitación, el modo en el que está estructurada y la distribución de sus elementos, se disponen tres grandes focos de iluminación centrados verticalmente hacia la bañera, como indica el plano de la Figura 13, de tal forma que se llegue a abarcar la zona centro de la habitación mientras que parte de esa luz llegue también de manera general a los distintos elementos.

Sobre la zona izquierda de la habitación recae más sombra al no haber apenas elementos con superficies que favorecen un transporte de luz más complejo, como es el caso de los espejos en el lateral izquierdo de la habitación. Por ello se intenta abarcar esa zona por medio de un foco de luz más pequeño y colocado a una altura menor, ya que colocar un foco principal supondría una iluminación excesiva sobre toda la habitación. Además, para favorecer la integración de la cámara en la escena y que esta no se encuentre obstaculizada por ninguna pared, debido a las dimensiones de la habitación, se escala al doble de longitud, añadiendo otros tres focos de luz que aporten una mayor iluminación desde el punto de vista de la cámara, con el objetivo de que no haya oscuridad sobre esa zona a la hora de renderizar.

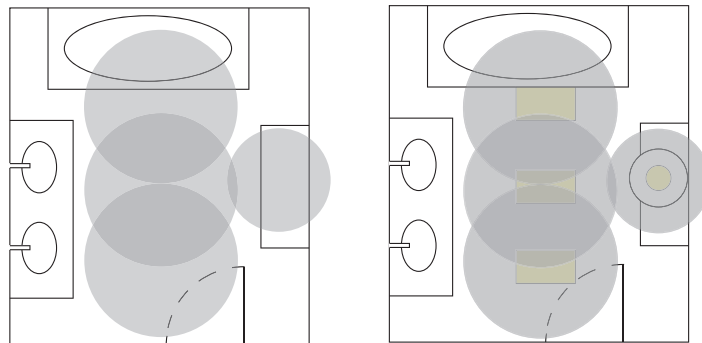


Figura 13. Organización de la luz artificial sobre el plano. Imagen izquierda, sin focos emisores. Imagen derecha, con focos emisores.

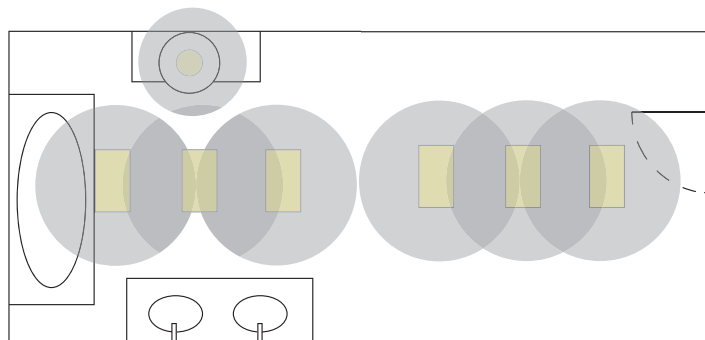


Figura 14. Elongación de la habitación sobre el plano. Adición de focos luminosos.

## 3.2 Tipología

Para la aplicación de una correcta iluminación sobre la escena se deben estudiar las posibles combinaciones de luz sobre las que se ha pensado en la fase de desarrollo de ideas.

En primer lugar, se elabora un esquema gráfico en el que se observa un alzado de cada una de las tres paredes principales de la habitación. Sobre cada conjunto de tres paredes se aplica un tipo de iluminación a estudiar, analizando en un primer momento los focos de luz situados en la zona superior de la habitación. En la Figura 15 se puede observar el empleo de tres tipos de focos superiores, nombrados como foco A, foco B y foco C.

El foco B se descarta debido a la escasa cantidad de luz que proporciona, focalizada hacia el centro y menos dispersa que el resto, luego no ilumina recovecos y esquinas que pueden ser interesantes, del mismo modo que no llega bien a los espejos, superficies que se han considerado importantes para el transporte de luz de esta escena. El foco C también es descartado debido a que su anclaje a la pared impide que pueda ser utilizado en una de las tres paredes; la central, ya que al encontrarse la ventana no existe superficie disponible para su anclaje, por tanto ilumina menos. No obstante, el tipo de iluminación es válida, ya que al tener una forma similar a una esfera, una pequeña parte de la luz va a abarcar una parte de la zona inmediatamente superior al foco, sin embargo, el aliciente de que el foco A es el más completo en cuanto a zonas que abarca la iluminación que proporciona, le convierten en el foco seleccionado (ver Figura 16).

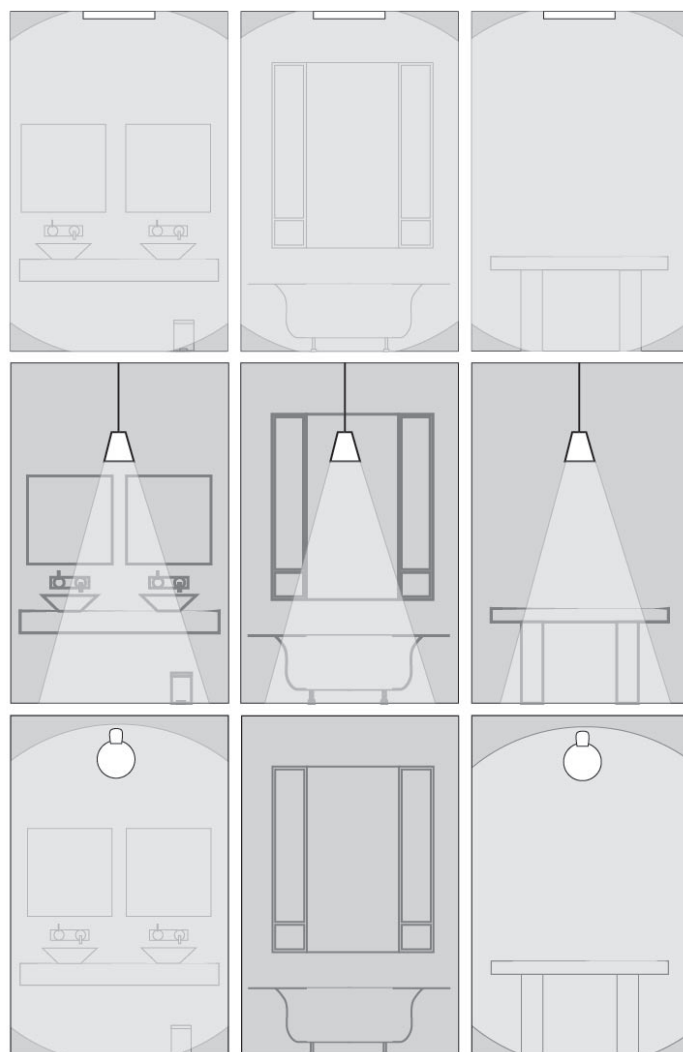


Figura 15. Franja superior; iluminación foco superior A. Franja intermedia; iluminación foco superior B. Franja inferior, iluminación foco superior C.

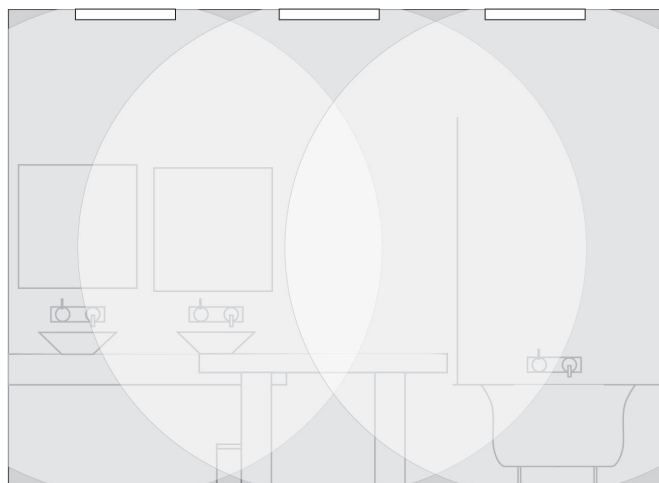


Figura 16. Iluminación foco A, vista general.

Una vez realizada la selección del foco superior, se lleva a cabo un estudio del tipo de luz que deberá aparecer en la zona inferior de la escena, lateral derecho de la habitación. Para ello, se obtienen tres fuentes de iluminación principales de la fase de desarrollo de ideas (foco D, E y F), y se analiza la iluminación que proporciona cada una de ellas (Ver Figura 17).

La fuente seleccionada es el foco E por dos motivos; por un lado, la zona iluminada que abarca es superior al resto, y por otro, el carácter formal de la base que sustenta la pantalla será de utilidad para aumentar la complejidad el transporte de luz, si se le aplica finalmente un material especular. La Figura 18 muestra iluminación combinada por los focos seleccionados (A y E), la Figura 19 muestra esa combinación junto a la luz natural procedente de la ventana, dividida la habitación en las 3 zonas, y la Figura 20 muestra una vista lateral de toda la habitación con esta misma última iluminación.

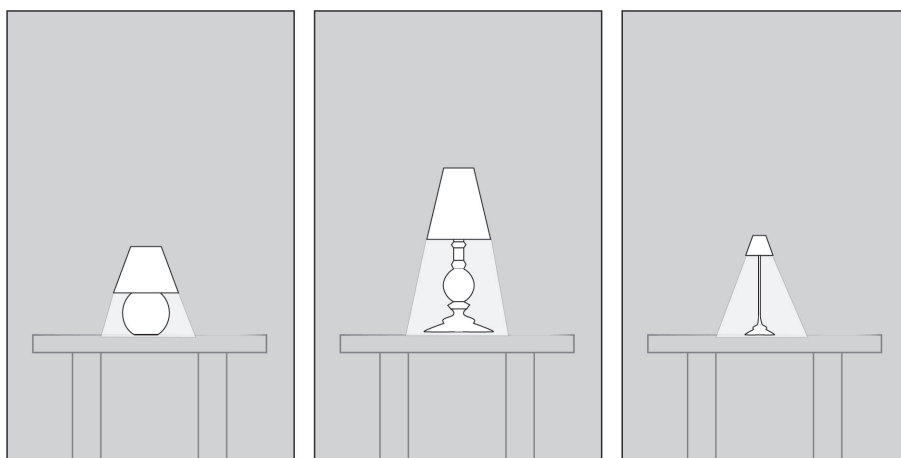


Figura 17. Iluminación inferior sobre el lateral derecho de la habitación. Imagen izquierda; foco D. Imagen intermedia; foco E. Imagen derecha; foco F.



Figura 18. Iluminación foco A y foco E. Vista general.

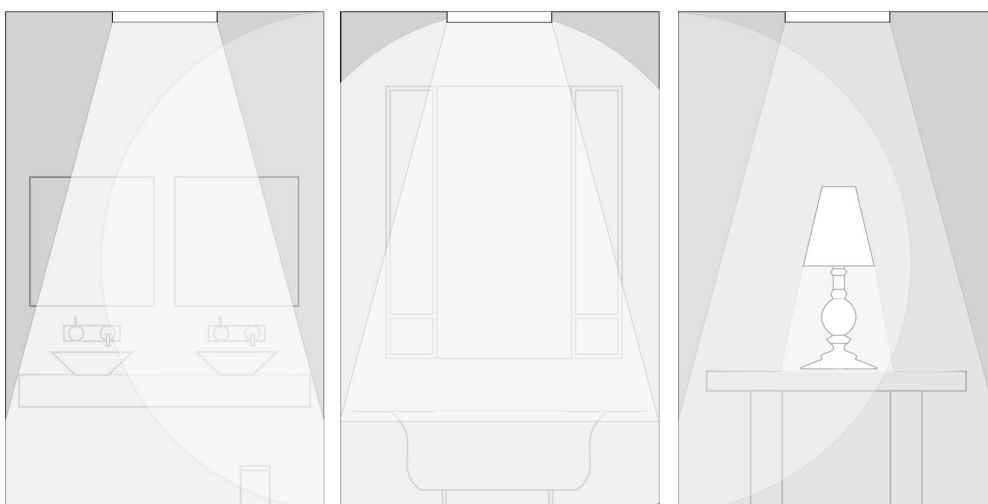


Figura 19. Combinación de iluminaciones; focos superiores (foco A), foco inferior (foco E), y luz natural (ventana). División de zonas.

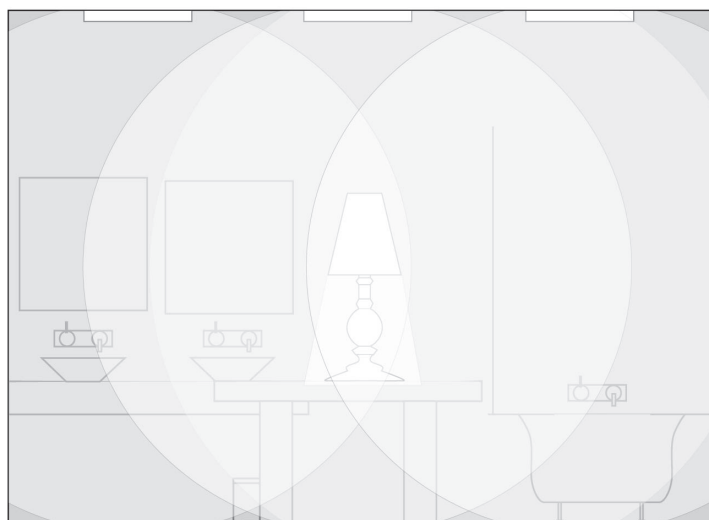


Figura 20. Combinación de iluminaciones, focos superiores (foco A), foco inferior (foco E), y luz natural (ventana). Vista general

### 3.3 Comportamiento de la Luz en Elementos Significativos

La iluminación natural proveniente del medio exterior que entra en la escena a través de la ventana también es una parte fundamental a estudiar. Para que exista un transporte de luz más complejo, deberán tenerse en cuenta diversas superficies de la escena. En este apartado se tienen en cuenta, sobretodo, dos superficies principales sobre las que la luz va a actuar de manera significativa; la ventana de la pared central y los espejos situados en el lateral derecho de la habitación.

Si se dispone de una ventana de un tipo de cristal dieléctrico, la luz entrará prácticamente de manera directa, reflejándose sobre los espejos e iluminando la zona derecha de la habitación, como refleja la Figura 22. En el caso en el que el cristal de la ventana sea rugoso, la luz entrará dispersa en la habitación, de manera que cada rayo con dirección distinta reflejará sobre los espejos provocando que haya una mayor iluminación y que el transporte de luz sea de más baja frecuencia. Se elige este tipo de material para el cristal de la ventana (ver Figura 22). Una vez elegido el tipo de cristal de la ventana; se debe considerar la importancia de un componente adicional y la tipología del material del que esté compuesto: una mampara cuyo material va a ser también un cristal rugoso. Como luz natural que proviene del medio exterior y que entrará por la ventana, como es común en el cine, se utiliza un mapa de ambiente capturado (Figura 21), que permite incrementar el realismo de la iluminación de la escena. Dependiendo del tipo de cristal del que la ventana esté compuesto (Figura 23), se dispersará más o menos provocando distintos reflejos en los espejos, por tanto, también una iluminación diferente. Finalmente, se selecciona cristal rugoso tanto para el material de la ventana como para el de la mampara.



Figura 21. Mapa de ambiente proporciona iluminación luz natural al conjunto de la escena. Su grado de luminosidad puede controlarse con el nivel de exposición.

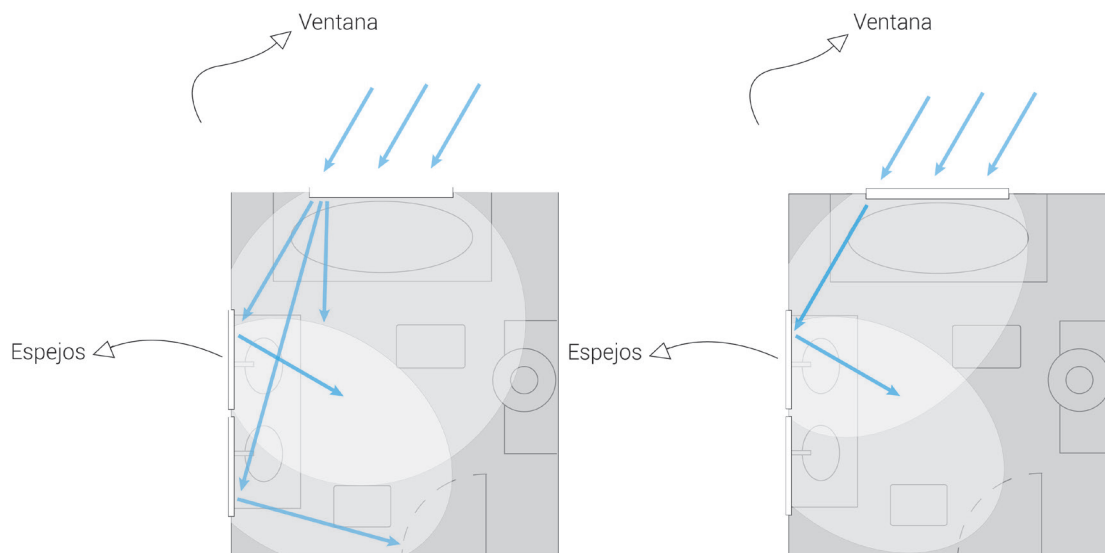


Figura 22. Recorrido de la luz transmitida y reflejada en los espejos. Imagen izquierda; ventana con cristal rugoso (opción seleccionada). Dispersión de la luz y mayor campo iluminado. Imagen derecha, ventana con cristal liso, reflejo directo sobre el espejo de rayo de luz. Menor campo abarcado.

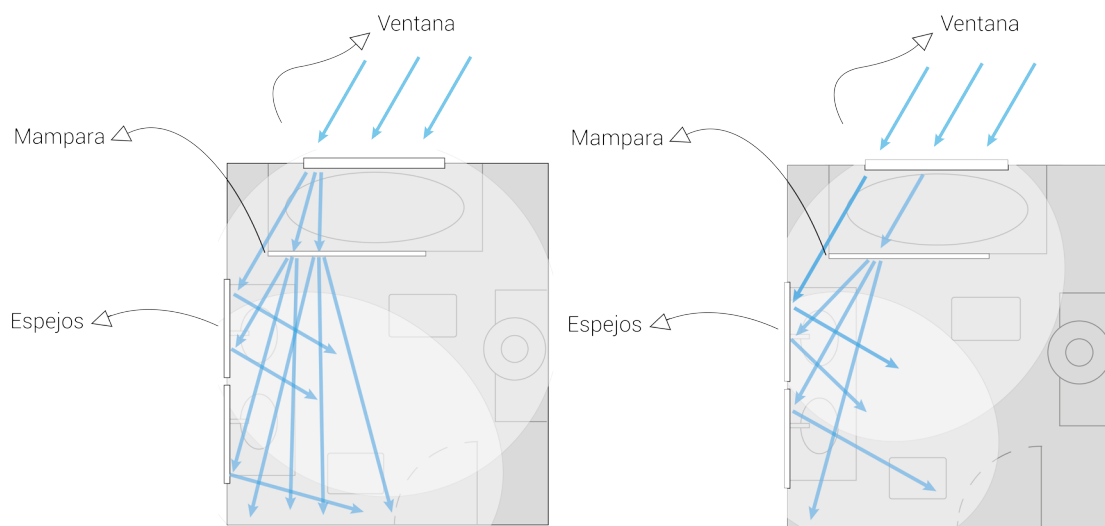


Figura 23. Recorrido de la luz transmitida y reflejada en los espejos. Imagen izquierda; ventana con cristal rugoso y mampara con cristal rugoso también (opción seleccionada). Dispersión de la luz y mayor campo iluminado. Imagen derecha, ventana con cristal liso y mampara con cristal rugoso, menor campo abarcado.

### 3.4 Distribución de la Iluminación Zona a Zona

Es necesario estudiar sobre un modelo más complejo cada tipo de iluminación, su dirección y orientación respecto a la distribución de los distintos focos colocados sobre la escena. El objetivo es realizar pruebas futuras en la siguiente fase sobre la que se vea con claridad un render de cada tipo de iluminación por separado .

Sobre la zona central de la escena, como se puede ver en la Figura 24, se disponen los tres focos de luz que pretenden aportar una iluminación general y abarcar el máximo área posible como ya hemos mencionado anteriormente. Además, estarán orientados hacia el suelo intentando que la iluminación directa se acerque a la zona de los espejos para una mayor iluminación de la escena. Así mismo, el único foco inferior (imagen del medio de la misma figura), de menos potencia que los superiores, se encuentra colocado sobre la mesa orientado hacia ella misma (hacia abajo), de tal forma que parte de ese lateral quede iluminado y una pequeña parte de esa luz se escape por la zona superior de la habitación y pueda estar algo iluminada. De este modo, el lateral derecho de la habitación queda iluminado al no disponer de superficies de reflejo que ayuden al transporte de luz de la escena como sí ocurre con el lateral derecho de la habitación.





Figura 24. Esquema de simulación de la iluminación por separado sobre la escena en total oscuridad de los focos seleccionados. De izquierda a derecha; foco A, foco E, y de los focos A y E juntos.

ANEXO 2  
Escena *Salón*:  
Diseño y desarrollo



# 1 Fase 1. Generación de Ideas y Conceptos

Como se comenta en el capítulo anterior, en esta primera fase se determinará el tipo de escena a desarrollar. Las influencias obtenidas servirán de ejemplo para comenzar con el desarrollo de conceptos y se llevará a cabo una evolución tanto de estos, como de sus materiales.

## 1.1 Influencias

Siguiendo el mismo proceso de localizar escenas reales que presenten un nivel alto de complejidad en cuanto al recorrido seguido por la luz, y habiendo llevado a cabo el desarrollo de un baño como escena tridimensional objetivo, en este capítulo se opta por mantener esa dinámica de elección de una escena interior de un hogar para la búsqueda de influencias debido a los motivos explicados con anterioridad.

Dentro de este tipo de escenas interiores, al igual que el baño, se piensa que el salón-comedor de un hogar puede suponer también un mayor desafío para el transporte de luz por lo que respecta a la variedad de distintos elementos que se pueden encontrar en él, e incluir, también, de manera adicional. A estos elementos se le pueden aplicar superficies especulares, como materiales compuestos por capas de barniz, cristales, cerámicas e incluso algún tipo de material metálico para ciertos elementos de la vajilla. También se puede jugar con los materiales aplicados en las paredes y suelos de la habitación, pudiendo definir algún *bumpmap* (mapa de relieve) especular, madera lacada o algún ladrillo con alguna capa de brillo. Además, no en todos los ejemplos o influencias de baños se puede encontrar toda la iluminación natural procedente del exterior que se desea, quizá presenten esta restricción al existir numerosos baños que no pueden disponer de esta o son consideradas habitaciones en las que tampoco es esencial tener una iluminación natural ya que tampoco se va a gastar gran parte del tiempo allí. Sin embargo, en un salón sí es fundamental que haya iluminación natural abundante debido al tiempo en el que el usuario lo utiliza, luego será mucho más fácil hallar una mayor variedad de este tipo de habitaciones también en cuanto a tipo de iluminación natural.

La Figura 1 en concreto, muestra el salón-comedor elegido de entre todas las imágenes. Además de que aparecen muchos de los elementos que consideramos importantes en una escena interior de un salón, tiene una distribución de estos más organizada a diferencia del resto; la mesa, centrada y situada transversalmente en la habitación, el conjunto de sillas colocadas alrededor a lo largo de la extensión de la mesa (que además existen distintos tipos de sillas, luego esto es un aliciente a la hora de seguir este esquema de escena), focos de luz alineados también con la misma mesa, y una ventana situada en uno de los laterales para que la iluminación, si proviene de la vista central, no entorpezca la visión de la cámara. También, a diferencia del resto de salones que han sido valorados, este dispone de una vajilla (colocada sobre la mesa) mucho más útil a nivel de materiales para la escena que queremos plantear, como por ejemplo; copas finas de cristal, botellas y cuencos y platos de cerámica blanca, por lo que se convierte en un buen ejemplo para el modelado tridimensional.

Se tienen en consideración como influencias adicionales, distintos elementos y materiales a aplicar en la escena elegida, cuyo espacio nos permite su colocación:

- Estrella de luz. Decoración.(Figura 2 ). Debido a que esta consta de una multitud de pequeños puntos de iluminación artificial.
- Lámparas de bombilla. El hecho de que el componente emisor de luz (en este caso el filamento) esté contenido en un recipiente acristalado como es la bombilla, favorece una mayor complejidad para la trayectoria de la luz (Figura 3).
- Diferentes texturas a aplicar en paredes/techo (Figura 4).
- Bronce con distintos acabados (Figura 5).

Aunque todavía no se ha comenzado a desarrollar ninguna idea y no queda cerrada la elección de las mismas, estas influencias adicionales se tienen en consideración ya en esta sección.



Figura 1. Influencias de la escena principal salón-comedor. La imagen de la izquierda trata la escena ejemplo seleccionada. Salón con iluminación natural y artificial. Las imágenes de la derecha tratan distintos salones estudiados con iluminación natural o artificial, o una combinación de ambas.



Figura 2. Influencias de iluminación-decoración. Distintos tipos de estrellas decorativas con focos de luz. La imagen izquierda es una estrella metálica con focos de cristal abundantes que se reparten uniformemente por la superficie hacia dentro que posee. La imagen situada en el medio, una estrella metálica con 6 únicos focos emisores de una luz dispersa por el tipo de material que contiene al emisor. La imagen derecha; una estrella de plástico con 11 pequeños focos emisores de una luz tenue, distribuidos también uniformemente.



Figura 3. Influencias para la iluminación principal del salón. Distintos tipos de bombillas de cristal dieléctrico cuyo filamento, dispuesto de distinta manera dependiendo de la imagen, va a ser el emisor. En la imagen de la derecha del todo se estudia la forma estructural de la lámpara, pudiendo funcionar como estructura de soporte de una bombilla acristalada, en menor tamaño y aplicándosele otro material distinto.

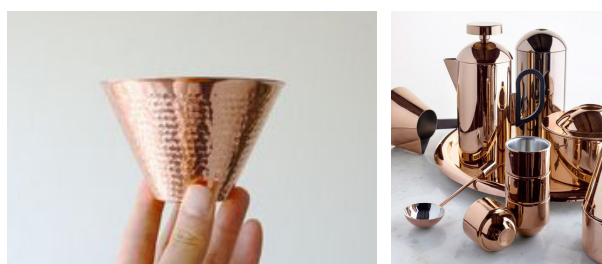


Figura 4. Influencias sobre el tipo de material a aplicar en iluminación. A la izquierda, bronce con acabado moleteado, y a la derecha, bronce pulido.



Figura 5. También se estudian como influencias a aplicar, otro tipo de lámparas de distintos volúmenes con acabados en bronce.

## 1.2 Evolución Formal y Asignación de Materiales

Esta escena va a constar de elementos repetitivos que van a estar situados, o bien de manera organizada, alineados con otros elementos, o bien ordenados de manera aleatoria, intercalándose unos con otros.

A diferencia de la escena baño y debido a que no va a haber una distribución sobre cada pared de la composición de los distintos elementos que forman parte del salón, ya que la mayor parte de los elementos se encuentran situados alineados a lo largo de la habitación, la subdivisión de esta escena se realizará en dos partes plasmadas en un plano de la escena (ver Figura 6), teniendo en cuenta una zona A encargada de recoger los elementos que están más cercanos a la cámara, que se ven en un primer plano, y que además son los elementos principales de la escena, y una zona B que pasará a recoger a los elementos secundarios que están situados al fondo pero que también son una parte fundamental de la misma.

La zona A, constará de una vista en alzado que englobe la mesa central del comedor sobre la que se sustente toda la vajilla y distintos tipos de sillas colocadas a lo largo de la misma. La zona B será una vista en alzado principalmente del fondo de la habitación, donde se encuentren los elementos restantes de la escena, como la estrella decorativa.

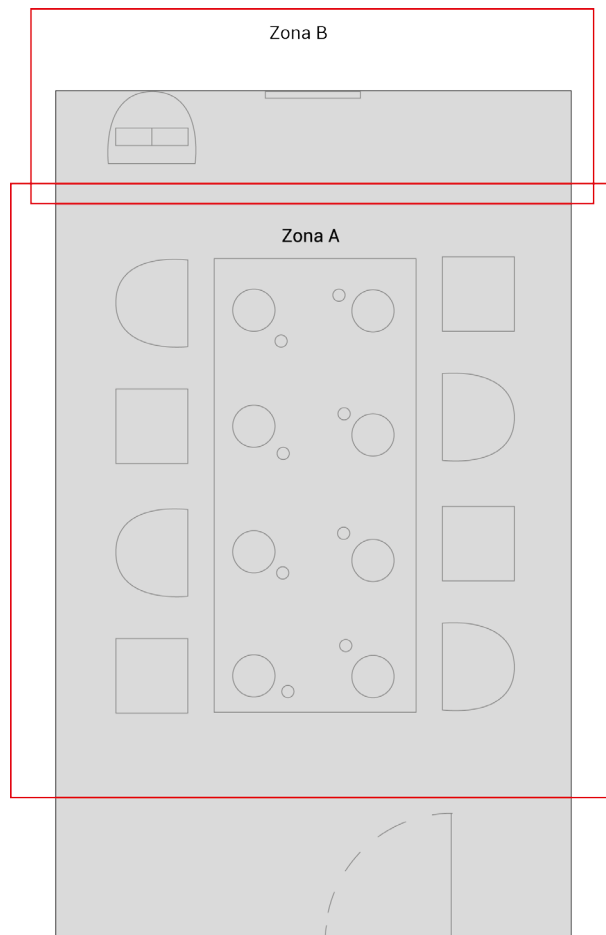


Figura 6. Plano general del salón, así como su subdivisión en las diferentes zonas sobre las que se desarrollará la evolución formal.

## Aspecto General de la Escena

A diferencia de la escena anterior del baño que en un principio sí parte en concreto de una escena real como influencia (aunque posteriormente esta sufre modificaciones), esta escena del salón comedor elige una escena real principal, pero trata de incluir otros materiales que determinan su aspecto general, distinto a la escena elegida. Posteriormente, y como sucede también en la escena anterior, el aspecto general del salón también va a sufrir modificaciones formales en muchos de sus elementos.

La Figura 7 muestra los materiales generales del entorno a aplicar en un primer momento, a modo de base sobre la cuál se comenzará a modelar. En cuanto a la apariencia básica de la habitación, se provee de un parqué de láminas grandes barnizadas para el suelo, cemento con una capa de brillo para la pared y una mesa lacada de madera oscura.



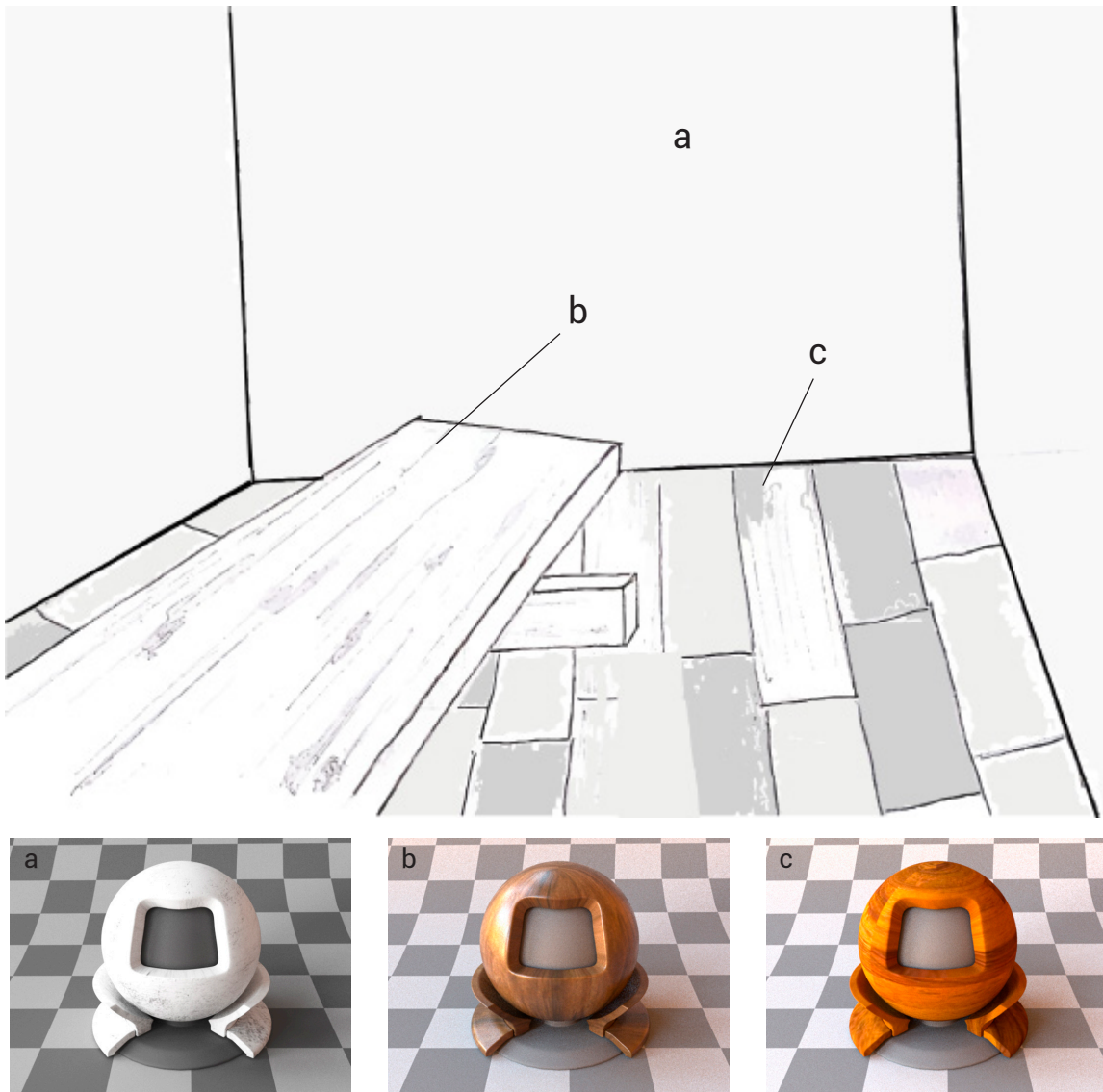


Figura 7. En la zona inferior se sitúan materiales a emplear en esta parte de la escena definidos como a, b, y c. Siendo "a" un material especular que simula el cemento con brillo, "b"; madera oscura, y "c"; madera para el parqué. Señalizada la asignación sobre bocetos.

## Zona A: Mesa

Esta zona se encuentra dividida por un lado, una parte superior en la que se disponen una serie de lámparas alineadas, colgadas del techo, y por otro lado, una parte inferior en la que se encuentra una mesa central (alineada también al igual que las lámparas con el resto de la habitación), vajilla variada colocada sobre esta, y dos tipos distintos de sillas, colocadas alrededor de la mesa central.

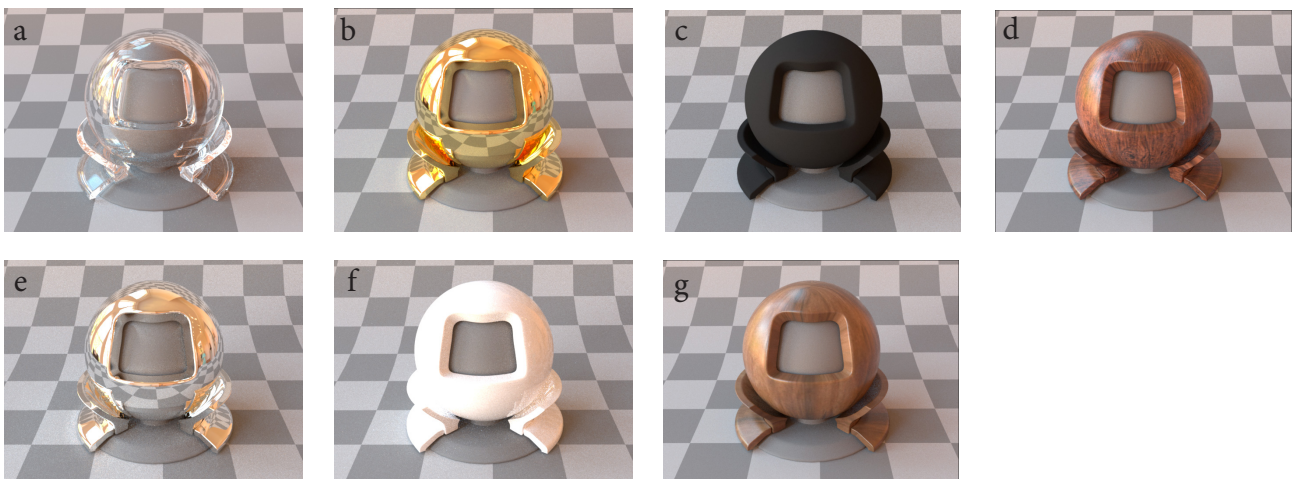
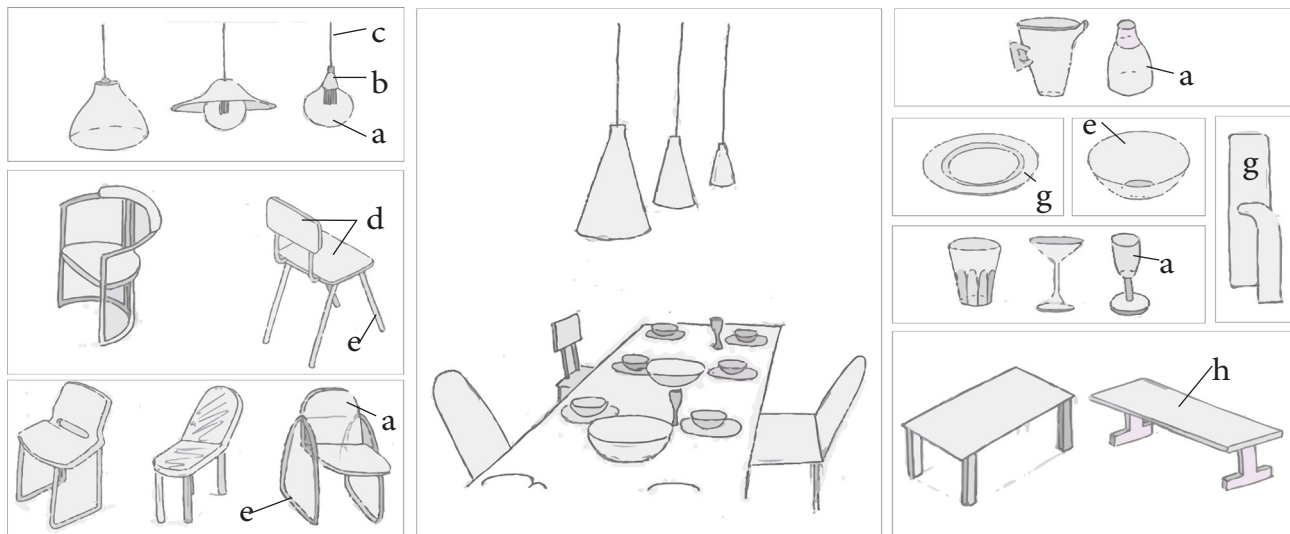


Figura 8. Zona superior; vista rápida sobre el desarrollo conceptual de cada accesorio perteneciente a la zona A de la habitación. A) Desarrollo conceptual del tipo de lámparas. B) Sillas tipo 1. C) Sillas tipo 2. D) Jarra de agua. E) Platos. F) Cuencos y bols. G) Copas. H) Mesa. Zona inferior; materiales a emplear en esta parte de la escena definidos como a, b, c, d, e, f, g, h, i. Siendo "a"; cristal dieléctrico, "b"; bronce abrigantado, "c" goma de recubrimiento, "d"; material difuso con apariencia de madera, "e"; de apariencia metálica con amplio grado de reflectividad, "f"; plástico especular, "g"; material difuso con componente especular que imita la madera lacada.

El desarrollo formal de **las lámparas** viene determinado en parte por las influencias estudiadas en el apartado anterior (Ver Figura 8). En una primera instancia, se elige una forma de cono básica, algo redondeada, para el recipiente donde va a ir integrada la bombilla, con tal de aplicarle en un futuro un material metálico que provoque brillos y reflejos. Esta idea se va desarrollando hasta que se obtiene la decisión de preservar la aplicación futura de ese material manteniendo totalmente visible la bombilla, y que, además, esta sea de un tamaño bastante grande. Aplicando estas dos decisiones, la luz proveniente de filamento emisor del interior de la bombilla, tendrá que chocar primero contra el cristal de la bombilla, rebotar, y generar numerosos caminos de luz al interactuar con los distintos materiales del entorno.



Se toma la decisión de que existan **dos tipos de sillas** ubicadas en el salón comedor. Para el desarrollo conceptual de cada una de ellas, se tienen en cuenta distintos tipos (sillas colocadas en la zona intermedia de la Figura 8) o simplemente se realiza un proceso de evolución, quedándose una mezcla de ideas procedentes de distintos tipos de sillas (sillas colocadas en la zona inferior de la Figura 8). Finalmente se obtiene una silla clásica y simple de madera estructurada con barras metálicas, y una silla, mezcla de alguna otra, con una estructura de barras curvas metálicas y un asiento compuesto en un futuro por un material algo complejo.

En cuanto a **la vajilla** a utilizar, se usan principalmente vasos y jarras de cristal, platos y cuencos de cerámica (en este caso, la forma tanto de los cuencos como la de los boles, ha sido reutilizada de los lavabos de la escena del baño, capítulo anterior). Se opta por un diseño curvo para la jarra de agua y un proceso de evolución de los vasos va a parar a una copa de volumen tubular.

Se conceptualizan dos tipos simples de diseño de mesas de madera y se elige la que de menos elementos va a constar, optimizando el tiempo de su fabricación ya que sus patas van a estar escondidas.

## Zona B: Fondo

Esta zona va a constar únicamente de tres elementos fundamentales. Pegada a la pared, una nueva silla, concretamente un taburete, que quizá se emplee también en la Zona A; utilizada aquí para efectuar la función de soporte, un cuadro rectangular anclado sobre la zona superior derecha de la pared y un accesorio iluminativo de decoración el cual va a ser soportado por la misma silla.

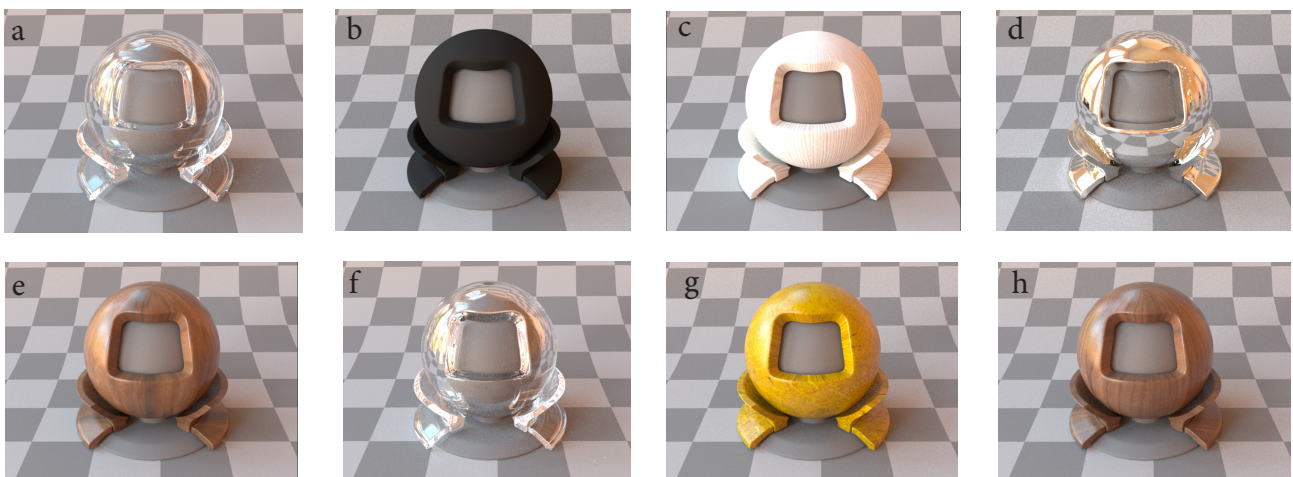
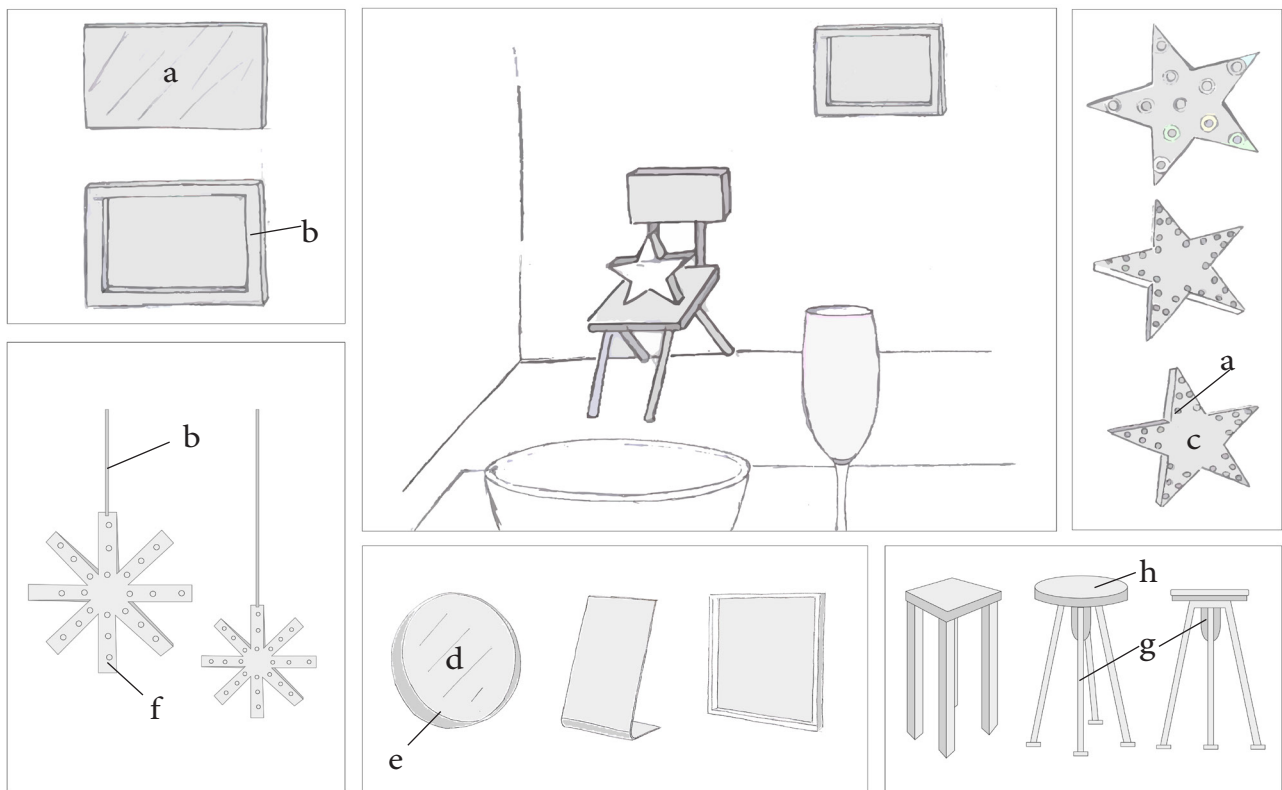


Figura 9, Zona superior; vista rápida sobre el desarrollo conceptual de cada accesorio perteneciente a la zona B de la habitación. A) Desarrollo conceptual del cuadro. B) Desarrollo conceptual del accesorio de iluminación. Zona inferior; materiales a emplear en esta parte de la escena definidos como a, b, y c. Siendo "a"; cristal dieléctrico, "b"; plástico oscuro (material reutilizado de la zona anterior A, "goma de recubrimiento"), "c"; material difuso de apariencia de madera blanca, "d"; espejo, "e"; madera desgastada lacada, "f"; cristal rugoso, "g"; pintura metálica amarilla y "h"; otro tipo de madera oscura lacada.

El concepto del cuadro queda suplantado por la idea de colocar **un espejo** sobre el suelo, ocupando esa zona. La idea es que se provoquen reflejos y se amplíe la trayectoria de la luz al colocar una serie de figuras colgantes sobre la zona superior. Se trata de un tipo de **estrellas decorativas** con algún material traslúcido que deje pasar la luz, además de a través de su estructura, a través de unos pequeños agujeros pasantes colocados sobre su superficie.

Tras darle vueltas al tipo de foco de iluminación colocado sobre la Zona B (Figura 9), finalmente se vuelve a las influencias iniciales como aparecen en la sección anterior, luego el accesorio de iluminación elegido ha sido una **estrella compuesta por pequeñas esferas de luz** que rodean o abarcan toda su superficie. El motivo por el que se ha elegido este tipo de accesorio es debido a iluminar esa parte del salón comedor que queda un poco más oscura al no acaparar bien del todo esa zona la luz de la ventana. Además, si se emplean los materiales adecuados tanto en la silla como en la propia base de la estrella o en el suelo, el hecho de que haya pequeñas fuentes de luz de una radiancia no muy alta (para evitar que deslumbren excesivamente), colocadas a una cierta distancia sin llegar a quedar unidas todas en el centro, puede dar juego a distintos tipos de reflejos o brillos sobre estos componentes. La silla que va a ejercer de soporte

# Diseño Final

Una vez desarrollados formalmente cada uno de los elementos del salón, se representa, como muestra la Figura 10, el concepto final, bocetado a modo de previsualización de la escena que será renderizada.

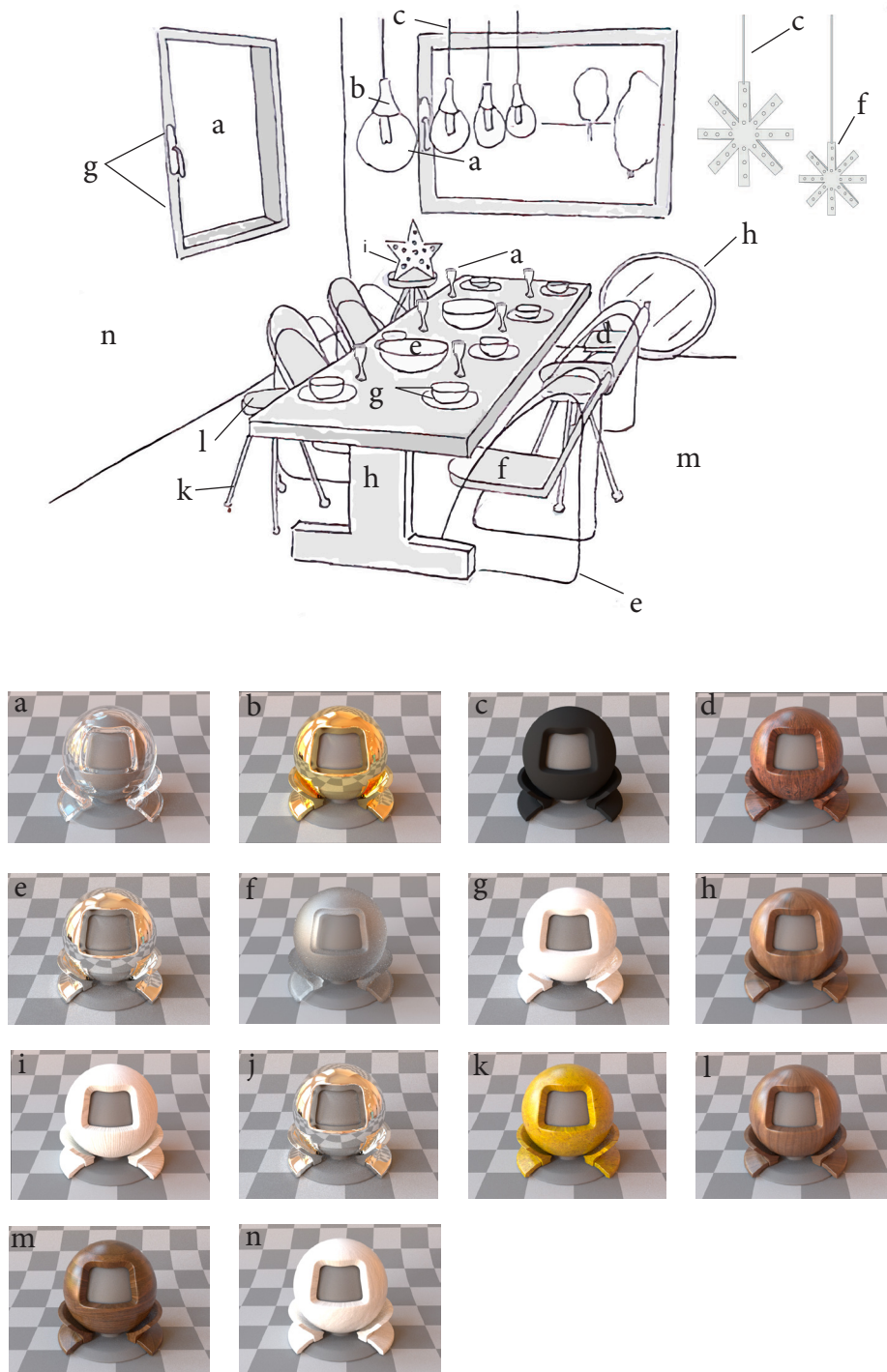


Figura 10. Asignación de materiales pertenecientes a cada elemento de la Escena Salón. Señalizada la asignación sobre el boceto superior. Siendo "a" cristal dieléctrico, "b"; conductor dorado, con amplio grado de reflectividad, "c"; material difuso con acabado mate, "d"; material difuso con apariencia de madera, "e"; de apariencia metálica con amplio grado de reflectividad, "f"; cristal rugoso, "g"; plástico especular, "h"; material difuso con componente especular que imita la madera lacada, "i"; material difuso de apariencia de madera blanca, "j"; espejo, "k", plástico rugoso que imita pintura metálica amarilla, "l"; otro tipo de madera oscura lacada, "m"; madera laminada lacada, "n"; plástico rugoso con textura.

## 2 Fase 2. Modelado y Ensamblaje

De igual manera que en el capítulo anterior, en esta fase se lleva a cabo un modelado tridimensional de la escena diseñada a partir de los bocetos finales surgidos de la evolución formal mostrada en la sección anterior, con los programas correspondientes; Autodesk Inventor y Autodesk 3ds Max.

### 2.1 Modelado Tridimensional

Una vez modelada la habitación "recipiente", se realiza el modelo de cada elemento perteneciente a la escena. Los elementos de esta escena en comparación con la escena anterior del baño, estarán a un nivel de detalle algo mayor debido a la integración de algún elemento más complejo. Los procesos empleados para modelar, expresados a alto nivel, han sido los siguientes:

- Solevación entre dos superficies distintas ayudadas por planos de trabajo
- Empalmes y suavizados en aristas para evitar contornos y esquinas agresivas (geometría suave)
- Vaciados de pieza
- Extrusiones de superficies simples
- Barridos entre una superficie y un carril guía para crear piezas de una forma determinada cuya largura sigue un recorrido
- Creación de perfiles y superficies de revolución.

En general se hacen presentes las áreas de revolución, sobre todo aplicadas a la vajilla, los bordes suavizados tanto en esquinas con ángulos agresivos (la mesa, por ejemplo), como en los cantos de los extremos de volúmenes. También existe una cierta abundancia de una geometría cilíndrica curva plasmada en la estructura de las sillas. Una visualización de la geometría se puede observar en la Figura 11.

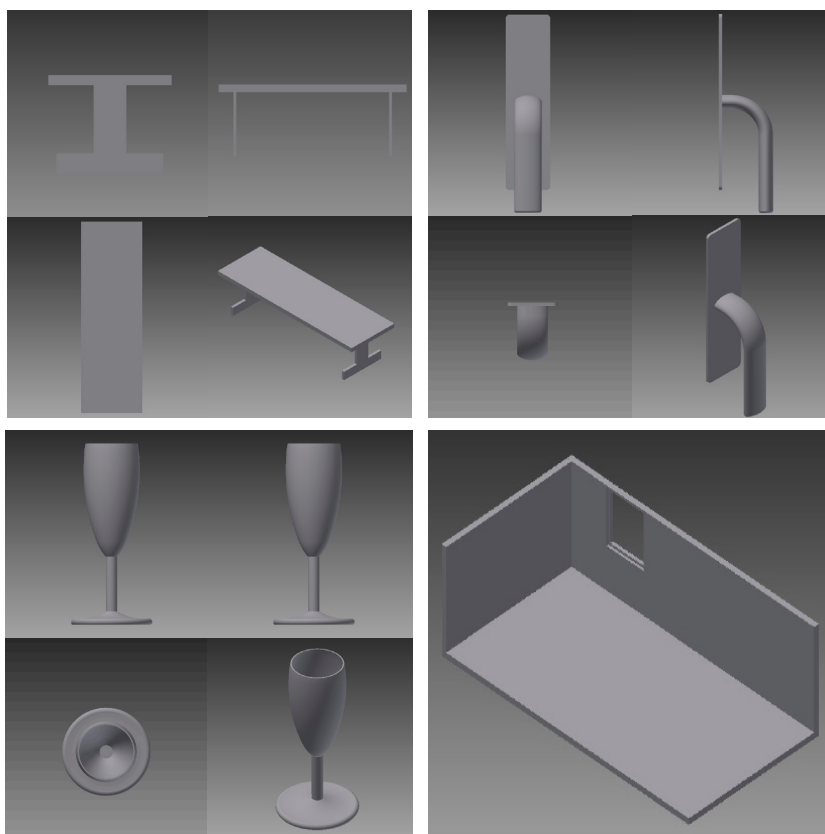


Figura 11. Alzado, planta, perfil y vista isométrica de (de izquierda a derecha y de abajo a arriba) la copa, la mesa y el pomo de la ventana. Como geometría de la habitación (abajo derecha) se desarrolla una habitación hexaédrica rectangular, con una ventana en el lateral (vista isométrica, nótese la eliminación de las paredes ocluidoras para poder ver el interior de la habitación).

## 2.2 Ensamblado

Como en el capítulo anterior, se comienza a ensamblar la parte que va a contener a todos los elementos pertenecientes del salón-comedor, por lo que en un primer momento se lleva a cabo el posicionamiento sobre la escena del modelo 3D de la habitación. Entonces, se realiza la unión de cada una de las partes de cada componente, y la colocación sobre su ubicación. Algunas de las características que presentan los componentes de los ensamblajes son las siguientes: existe una cierta simplicidad en los ensamblajes que constan de ciertos componentes que no se van a ver, como es el caso del ensamblaje de la ventana (ausencia de elementos que comporten una unión), o el ensamblaje carente de tornillos de la Figura 12. No obstante, en el caso de la lámpara, al no ser el propio volumen de la bombilla un elemento emisor, si no que este elemento emisor vendrá integrado por el filamento, se tendrá que mostrar con claridad la diferencia entre estos dos elementos por separado (este ensamblaje, por otro lado, seguirá carente de elementos de unión).

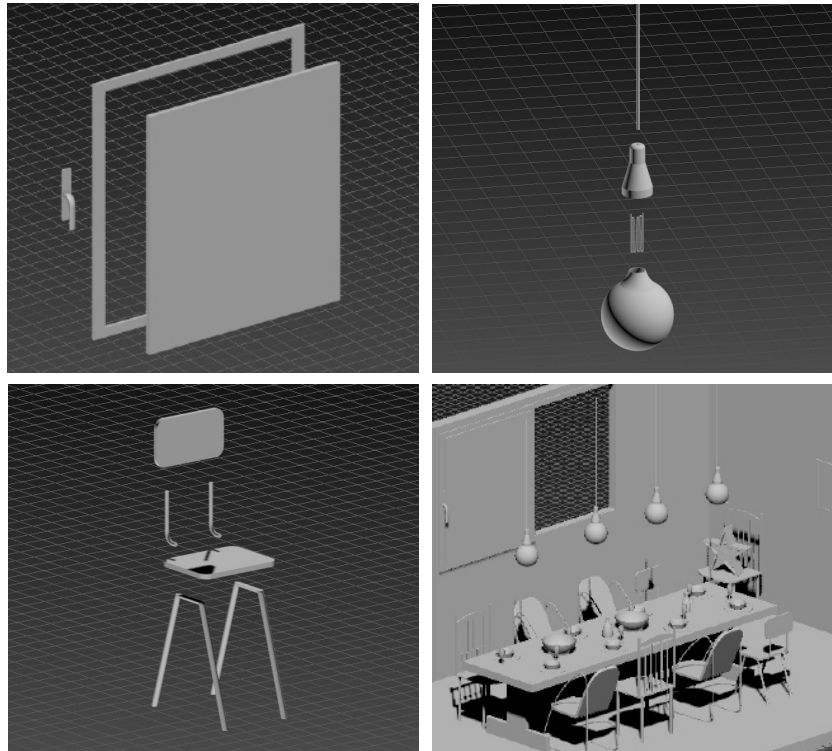


Figura 12. De izquierda a derecha y de arriba a abajo; ventana con un ensamblaje de sólo tres piezas de distintos tipos de material, lámpara compuesta por un cable, soporte, filamento y bombilla, elementos ensamblados de la silla tipo 1, y la última imagen aparece representada por la unión y ubicación de los elementos en el interior de la habitación.

## 3 Fase 3. Iluminación

Se realiza una distribución de los focos de luz de la escena del salón-comedor, estudiando el tipo de luz a enfatizar y tomando decisiones sobre la preferencia de un tipo de iluminación u otro según las condiciones de la escena.

### 3.1 Distribución de la Iluminación

Debido al área rectangular de la habitación, el modo en el que está estructurada y la distribución de sus elementos, se disponen cuatro focos de iluminación centrados y alineados transversalmente sobre la mesa, en dirección hacia el fondo de la habitación, como indica el plano de la Figura 13, de tal forma que se llegue a abarcar la zona centro de la habitación y además, cada recoveco de los elementos sobre los que se sitúa que quede desprovisto de luz porque la iluminación natural no llega hasta él, sea albergado por esta iluminación artificial.

De las dos zonas de la habitación, la zona Fondo es la que más desprovista está de iluminación. Esto sucede porque tal y como se pretende colocar el mapa de luz natural y tal y como están distribuidas las lámparas del centro, se produce una sombra en esa parte de la escena, por tanto, para iluminar ese tramo, se coloca una fuente de luz.

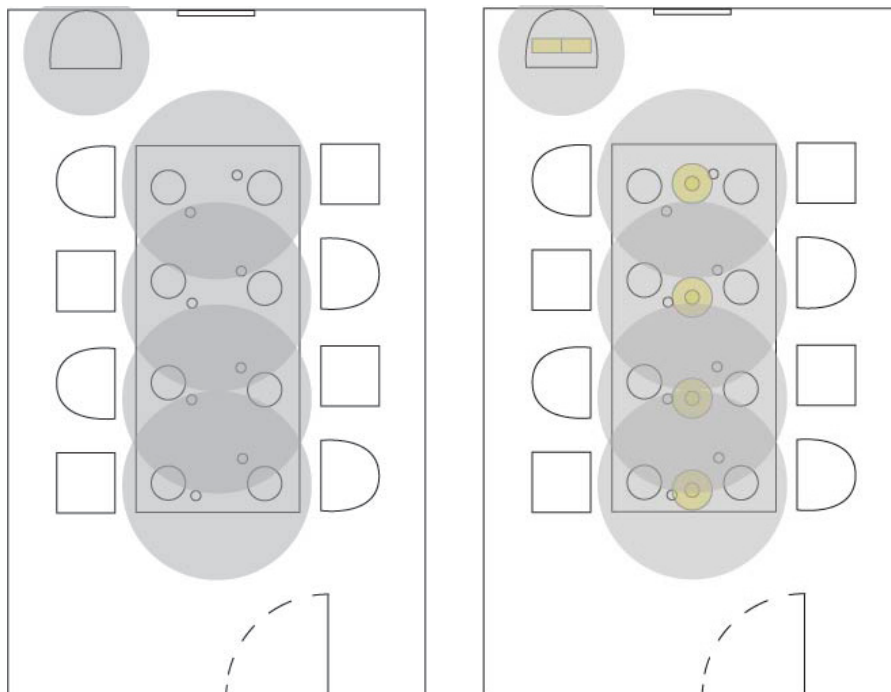


Figura 13. Organización de la luz artificial sobre el plano. Imagen izquierda, sin focos emisores. Imagen derecha, con focos emisores.



## 3.2 Tipología

Como en el anterior capítulo, se elabora un esquema gráfico en el que se observa un alzado de las dos zonas principales de la habitación, tanto la zona Mesa como la zona Fondo. Sobre cada una de ellas, se aplica un tipo de iluminación a estudiar, analizando en un primer momento los focos de luz situados en la zona superior de la habitación. En la Figura 14 se puede observar el empleo de tres tipos de focos superiores, nombrados como foco A, foco B y foco C. El foco A se descarta debido a la escasa cantidad de luz que proporciona al tener esa pantalla que le hace focalizar su luz hacia el centro de la mesa, por tanto ni siquiera llega a iluminar del todo ciertas esquinas o elementos de la mesa que pueden ser interesantes. El foco B produce un tipo de iluminación que abarca más campo que el anterior y además, presenta la ventaja que dos de sus componentes compuestos por materiales especulares van a quedar visibles (el gorro o pantalla y la bombilla). No obstante, al considerar que el foco C, además de proporcionar una iluminación mucho más expandida en el entorno (va a iluminar la zona del techo y no va a estar restringida por un "gorro" que focaliza su iluminación), y que también presenta visibles los dos componentes de materiales especulares (un soporte en lugar del gorro y la bombilla), se toma este foco como preferente y se elige como foco superior el foco C. La Figura 15 muestra el foco finalmente seleccionado.

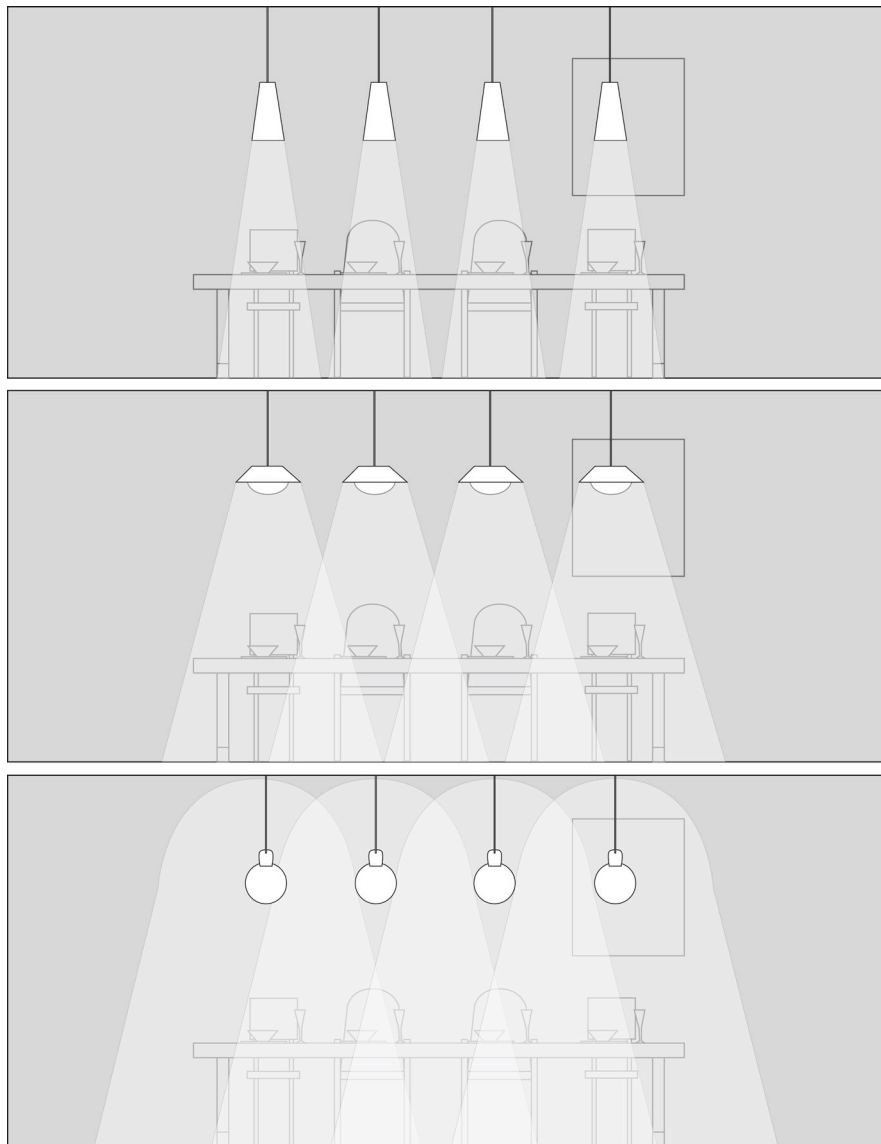


Figura 14. Franja superior; iluminación foco superior A. Franja intermedia; iluminación foco superior B. Franja inferior, iluminación foco superior C.

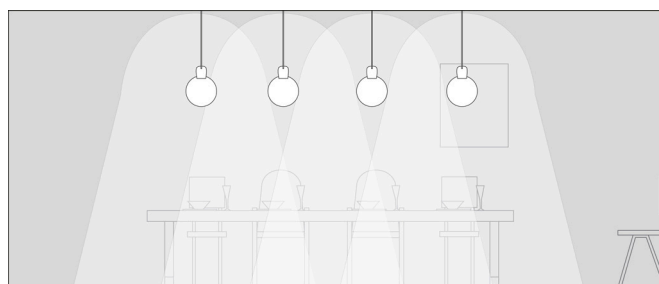


Figura 15. Elección sobre la Iluminación del foco C, vista general.

Una vez realizada la selección del foco superior, se lleva a cabo un estudio del tipo de luz que deberá aparecer en la zona fondo de la escena, sobre la parte inferior. Para ello, se obtienen tres fuentes de iluminación principales de la fase de desarrollo de ideas (foco D, E y F), y se analiza la iluminación que proporciona cada una de ellas (Ver Figura 16).

Finalmente se elige el foco F debido a que la zona iluminada que abarca es suficiente y no se desea que haya una gran iluminación sobre esa zona. Por otro lado, el haber reducido el número de bombillas deja ver la estructura principal de la lámpara, así como su material. El resto de focos han sido descartados debido a la escasa iluminación, y además, focalizada, que en este caso no nos interesa proporcionar a esta zona de la escena. En las Figuras 17 y 18 se visualiza la combinación de estos dos focos juntos, y con iluminación natural.

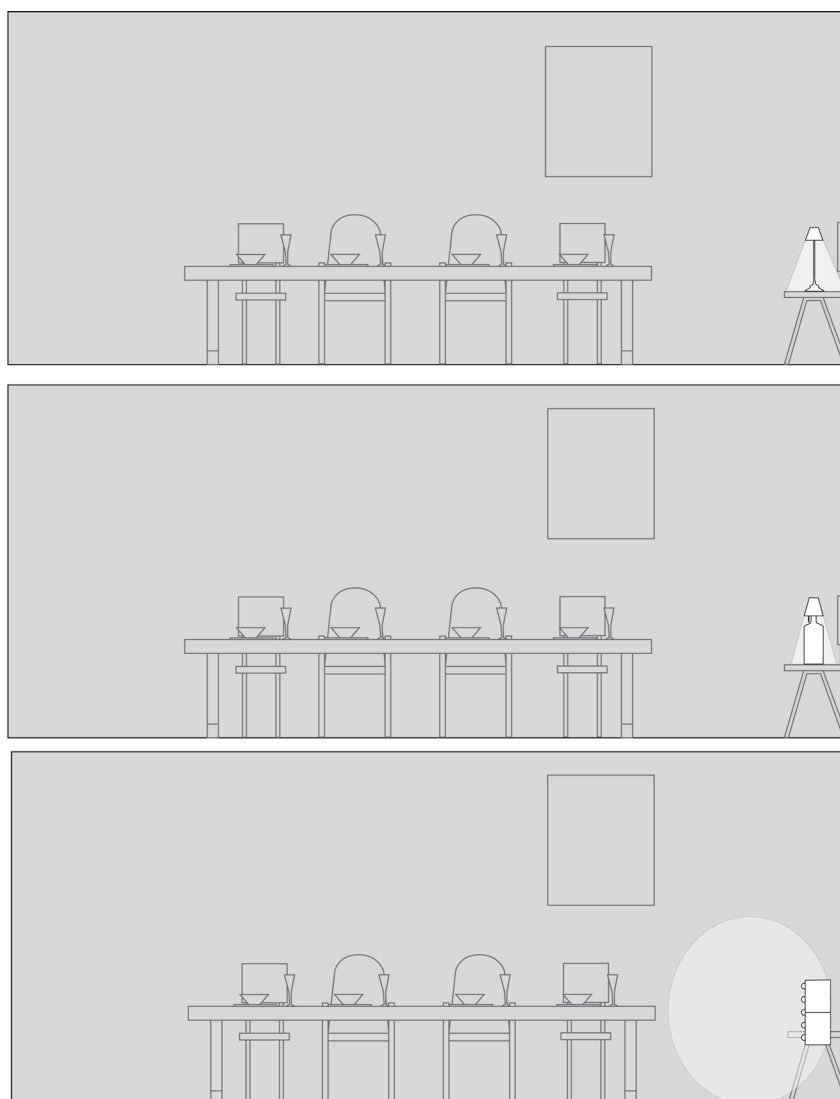


Figura 16. Iluminación inferior sobre el fondo de la habitación. Arriba del todo; iluminación proporcionada por el foco D. Imagen intermedia; foco E. Imagen de abajo, foco F.



Figura 17. Iluminación foco C y foco F. Vista general.



Figura 18. Combinación iluminaciones; focos superiores (foco C), foco inferior (foco F), y luz natural (ventana).

### 3.3 Comportamiento de la Luz en Elementos Significativos

En este apartado también se tienen en cuenta superficies principales sobre las que la luz actúa de manera significativa. Tanto esta escena, como la escena anterior del baño, comparten un elemento en común; la ventana. En este caso, la luz entrará a través de una ventana situada en una pared lateral de la habitación, luego este elemento entrará en consideración.

De distinta manera que en la escena del baño, ya que este constaba de un par de elementos fundamentales para la trayectoria de la luz como son los espejos, al ser una escena que carece de este tipo de material, se pasa a considerar de manera individual otro elemento significativo del que la iluminación dependerá en función del tipo de material del que esté formado; las bombillas de cristal que cuelgan del techo. No sólo influirá el material en el tipo de iluminación del mismo objeto (tanto si es cristal rugoso como cristal únicamente dieléctrico o cristal suave), si no que también, la luz que va a entrar por la ventana (y a su vez dependiente del tipo de cristal a utilizar) quedará o no reflejada sobre el cristal de la bombilla. En la Figura 20 se puede observar el recorrido de la luz en función de si se ha utilizado un cristal dieléctrico para la ventana y para la bombilla, si el cristal de la ventana es un cristal rugoso y la bombilla continúa siendo dieléctrico, si ambos dos son cristales rugosos, o si el cristal de la ventana es dieléctrico y la bombilla está compuesta de cristal rugoso. Finalmente se elige un cristal dieléctrico tanto para la iluminación superior, como para el cristal de la ventana. Así mismo, el recorrido de la luz transmitida y reflejada por la fuente de iluminación F sobre la ventana de la Zon Fondo, se puede observar en la Figura 21.

Como en la escena anterior, se utiliza un mapa de ambiente capturado, que permite incrementar el realismo de la iluminación de la escena (ver Figura 19).



Figura 19. El mismo mapa de ambiente de la escena baño, utilizado para la escena del salón.

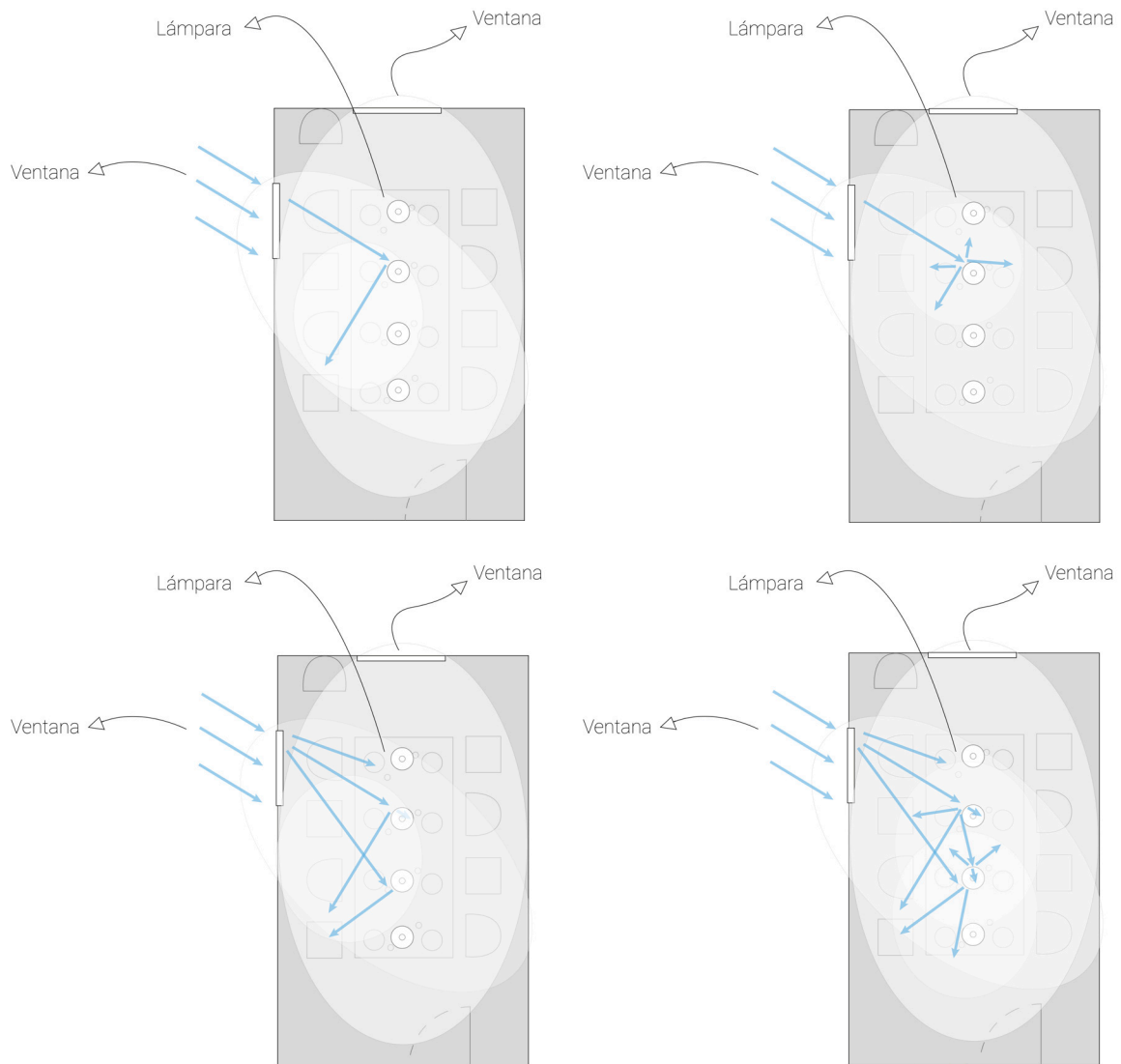


Figura 20. Recorrido de la luz transmitida y reflejada en las lámparas. Arriba izquierda; ventana con cristal dieléctrico sobre lámpara dieléctrica. Reflejo de la luz y mayor campo iluminado. Arriba derecha, ventana con cristal dieléctrico y lámpara de cristal rugoso, dispersión de la luz a la llegada a la lámpara, mayor campo iluminado pero de más baja frecuencia. Abajo izquierda, cristal rugoso de la ventana sobre lámpara dieléctrica. La luz se encuentra dispersa al llegar a la lámpara, luego el reflejo es muy leve al ser de baja frecuencia. Abajo derecha, ambos con cristal rugoso; mayor campo abarcado por la luz pero la frecuencia de la luz es la menor de todos.

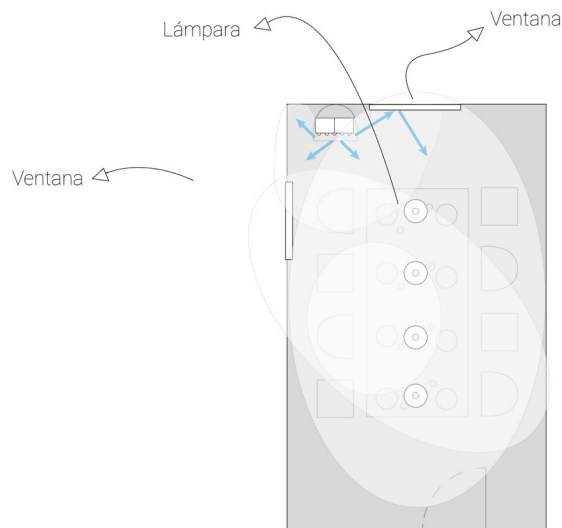


Figura 21. Recorrido de la luz transmitida y reflejada por la fuente de iluminación F sobre la ventana del la zona Fondo. La luz emitida procede de las pequeñas esferas colocadas a lo largo del área del objeto, luego la luz se dispersará chocando una parte de ella contra el cuadro colocado detrás, provocando así su reflejo y una mayor iluminación sobre esa zona que no consta de ninguna fuente de luz.

### 3.4 Distribución de la Iluminación zona a zona

Sobre la zona central de la escena, se mantienen encendidos los cuatro focos de luz seleccionados que pretenden aportar una iluminación general, aunque de pequeña radiancia, y abarcar el máximo área posible incluso con la ausencia de la luz natural, como se comprueba en la imagen izquierda del esquema gráfico de la Figura 22. Del mismo modo, el único foco inferior que está colocado sobre la silla de la zona Fondo, imagen del medio, también de menos radiancia que los focos superiores, produce una iluminación escasa, aunque deseada, para encontrarse encendido él solo.

Así mismo, la unión de los focos superiores con el foco inferior son un buen complemento para una iluminación reducida, como es el caso de esta escena al darle una importancia mayor la luz natural por el nivel de su exposición, que queda reflejado en la imagen de la derecha de la misma figura.



Figura 22. Esquema de simulación de la iluminación por separado sobre la escena en total oscuridad de los focos seleccionados. De izquierda a derecha; foco C, foco F, y de los focos C y F juntos.

# ANEXO 3

## Resultados y Discusión



A

# 1 Prueba de Algoritmos

En este capítulo se lleva a cabo una comparación de los algoritmos de render descritos en el Capítulo 2, usando las dos escenas desarrolladas en los Capítulos 5 y 6 (baño y salón, respectivamente). El objetivo es discutir los beneficios de cada algoritmo en cada escena, teniendo en cuenta qué caminos de luz son más evidentes. Para ello, utilizamos la versión de dichos algoritmos implementada en Mitsuba, bajo tres tipos de iluminación. Estos tipos consisten en cada escena renderizada con iluminación natural, iluminación artificial (lámparas, bombillas, etcétera) y con la combinación de ambas. Cada una de las combinaciones escena-iluminación se han renderizado a una resolución de 768x576, con números de muestras variables. Las imágenes se han generado en alto rango dinámico (HDR), y transformadas a 8 bits para impresión usando mapeo de tono simple, basado en una curva gamma y un ajuste del valor de exposición. Estos valores se han dejado fijos para cada una de las escenas, eligiendo los valores de exposición manualmente utilizando únicamente criterios estéticos.

Cada algoritmo presenta sus propios parámetros (Tabla 1), modificables dentro del programa de render. Nosotros modificaremos únicamente el valor de las muestras por píxel. Debido a esto, las anomalías que vayan surgiendo, en caso de no obtener los resultados de ruido esperados para un algoritmo en concreto, se deberán a que estos parámetros no han sido ajustados.

Cabe destacar que el caso en el que ambas escenas presentan iluminación natural y artificial, no se considera necesario realizar explicaciones acerca, de ello dado que la luz natural tiene bastante importancia en estas condiciones y los resultados son muy parecidos a las escenas con iluminación natural. No obstante sí podrá observarse una comparación de los algoritmos utilizados para ese tipo de iluminación.

<b>Path Tracer</b>	<b>Bidirectional Path Tracer</b>	<b>Path Space MLT</b>
<b>Property PT</b>	<b>Property BDPT</b>	<b>Property PSMLT</b>
Maximum depth -1	Maximum depth -1	Maximum depth -1
Russian Roulette starting depth 5	Create light image <input checked="" type="checkbox"/>	Direct samples 16
Strict surface normals <input type="checkbox"/>	Use direct sampling methods <input checked="" type="checkbox"/>	Two-stage MLT <input type="checkbox"/>
Hide directly visible emitter <input type="checkbox"/>	Russian Roulette starting depth 5	Luminance samples 1000
<b>Low discrepancy sampler</b>	<b>Low discrepancy sampler</b>	Bidirectional mutation <input checked="" type="checkbox"/>
Samples per pixel X	Samples per pixel X	Lens perturbation <input checked="" type="checkbox"/>
Effective dimension 4	Effective dimension 4	Caustic perturbation <input checked="" type="checkbox"/>
<b>Gaussian filter</b>	<b>Gaussian filter</b>	Multi-chain perturbation <input checked="" type="checkbox"/>
Standard deviation 0.5	Standard deviation 0.5	Manifold perturbation <input type="checkbox"/>
		Probability factor 50.0
<b>Primary Sample Space MLT</b>	<b>Stochastic Progressive PM</b>	<b>Low discrepancy sampler</b>
<b>Property PSSMLT</b>	<b>Property SPPM</b>	Samples per pixel X
Bidirectional <input checked="" type="checkbox"/>	Maximum depth -1	Effective dimension 4
Maximum depth -1	Initial radius 0.0	<b>Gaussian filter</b>
Direct samples 16	Photons per iteration 2500000	Standard deviation 0.5
Two-stage MLT <input type="checkbox"/>	Work unit granularity 0	
Luminance samples 100000	Russian Roulette starting depth 5	
Large step probability 0.3	Size reduction parameter 0.7	
Russian Roulette starting depth 5	<b>Low discrepancy sampler</b>	
<b>Low discrepancy sampler</b>	Sampler per pixel X	
Samples per pixel X	Effective dimension 4	
Effective dimension 4	<b>Gaussian filter</b>	
<b>Gaussian filter</b>	Standard deviation 0.5	
Standard deviation 0.5		

Figura/ Tabla 1. Parámetros modificables según el tipo de algoritmo a emplear. En negrita únicamente se muestran las secciones donde están incluidas el resto de características (que no se encuentran en negrita). Las muestras por píxel (***samples per pixel***), coincidentes en cada una de las tablas, es el único valor que se va a modificar en nuestro caso.



## 1.1 Iluminación Natural

Aquí analizamos el comportamiento de cada algoritmo para las dos escenas (baño y comedor) iluminadas con sólo iluminación natural, procedente de un mapa de entorno iluminando la escena a través de las ventanas. Las pruebas se realizan para 500 y 1000 muestras, para mostrar el comportamiento de los algoritmos antes de haber convergido a soluciones sin ruido. Las distintas comparaciones se pueden ver en la Figuras (2, 3, 4, 5), y los detalles numéricos de las pruebas se pueden ver en las Tablas (2, 3, 4, 5).

### **Path Tracing (PT)**

Se puede visualizar cómo el baño genera mucho ruido de igual manera en cada uno de sus elementos. En el salón, sin embargo, se concentra sobre todo en las estrellas colgantes de la derecha y más aún en el reflejo de ellas que provoca el espejo. Esto es debido a que el espejo, al estar colocado entre los distintos elementos y la cámara, aumenta el número de rebotes en la escena, y genera un camino cáustico difícil de encontrar por el muestreo no-informado.

### **Bidirectional Path Tracing (BDPT)**

BDPT converge a una solución muy similar a la de PT. La razón es que en esta configuración (iluminación desde mapa de ambiente a través de una ventana pequeña, especialmente en el baño) hace que sea muy difícil que muestras aleatorias desde la propia luz afecten a la escena. Por tanto, sólo los caminos de luz muestreados desde la cámara contribuyen notablemente a la escena. Esto hace que la solución sea, en este caso, muy similar a PT, y que el beneficio de la bidireccionalidad se pierda.

### **Stochastic Progressive Photon Mapping (PM)**

De forma similar a BDPT, los caminos trazados desde la luz apenas contribuyen a la imagen con iluminación natural. Esto hace que pocos fotones contribuyan a la escena, lo cual genera que las zonas difusas, calculadas usando estimación de radiancia a partir de los fotones, tengan una enorme cantidad de ruido. Mientras que esto es visible en el comedor (especialmente en el techo visto reflejado por el espejo), es especialmente notorio en el baño, donde prácticamente ningún fotón contribuye a la iluminación interior, y por tanto el suelo (difuso) es renderizado en negro. No obstante, el resto de superficies especulares sí que son renderizadas gracias a la segunda fase en la que Photon Mapping utiliza una variante de PT.

### **Primary Sample Space Metropolis Light Transport (PSSMLT)**

En las imágenes generadas con iluminación natural, destaca el ruido generado sobre todo en la ventana, donde normalmente no se genera ruido. En el salón también destaca el ruido generado en puntos en los que normalmente no se genera, como el que aparece en la pared. Esto se produce porque, cuando un objeto brillante (como el mapa de ambiente) es visible en el rendering, se dedican más muestras a renderizar ese objeto a costa de los demás elementos de la escena (al igual que pasa con la ventana del baño). Sin embargo, estas muestras no se distribuyen uniformemente, lo cual lleva a un ruido extremadamente notorio en las zonas con mucha luminancia, si éstas tienen baja frecuencia.

### **Path Space MLT (PSMLT)**

En las imágenes generadas para la iluminación natural del baño, el comportamiento del ruido de las escenas es parecido al trazado con PSSMLT, en cuanto a generar patrones de ruido en distintas zonas de toda la escena, ya que actúa de manera similar. Además, en este algoritmo también aparece ruido reflejado en el espejo del baño (procedente de la ventana). Esto último sucede en todas las pruebas de iluminación con este algoritmo. Como con PSSMLT, también aparece ruido la pared del salón. La diferencia con el algoritmo anterior, es que también aparece bastante sobre las estrellas colgantes del baño, que apenas pueden ser distinguibles debido al ruido en esas zonas. Se debe a que esos caminos de luz no se llegan a encontrar, y el algoritmo se centra en objetos más brillantes. Esto último también sucede en todas las pruebas de iluminación con este algoritmo.

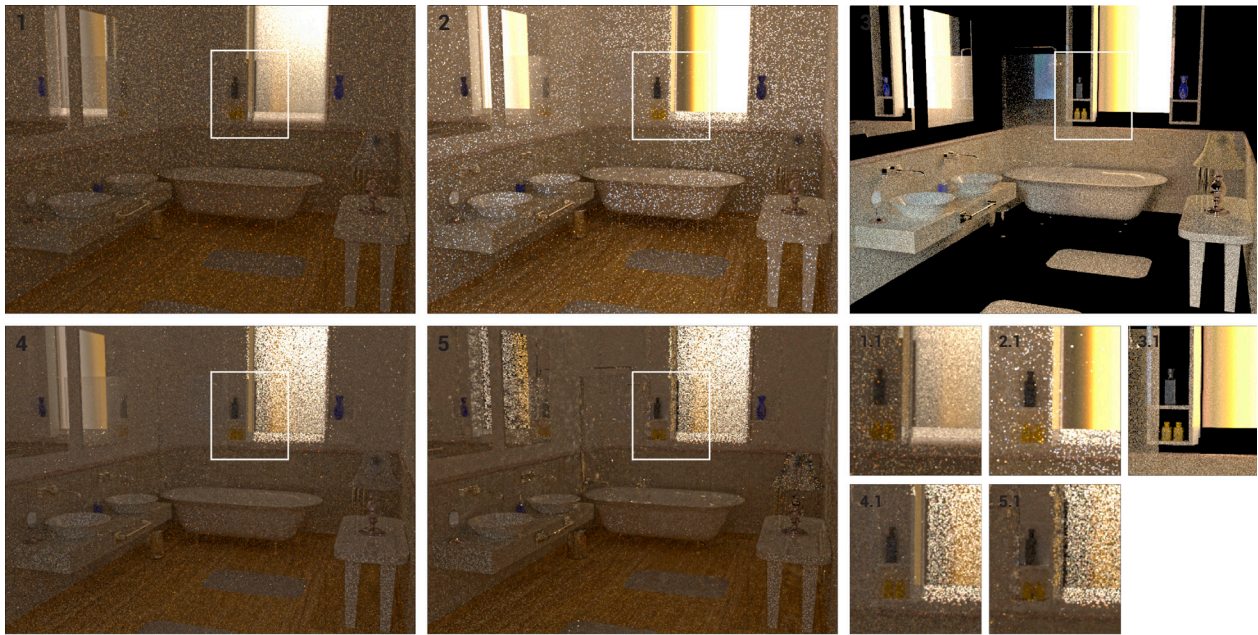


Figura 2. Escena Baño con iluminación natural, renderizada con 500 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. A la derecha de la figura, las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural	7 min	500	Total	Uniforme	
BDPT	Natural	6 min	500	Total	Total	
SPPM	Natural	5 min	500	Uniforme	Pared + suelo	Pared y suelo oscuros
PSSMLT	Natural	10 min	500	Ruido en general	Ventana	Ruido en puntos donde normalmente no se genera
PSMLT	Natural	3 min	500	Ruido en general	Toda la pared	Comportamiento similar a iluminación natural

Table 2. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Baño con iluminación natural para 500 muestras. Relacionada respectivamente con los renders del baño de la zona superior de esta página (Figura 1).

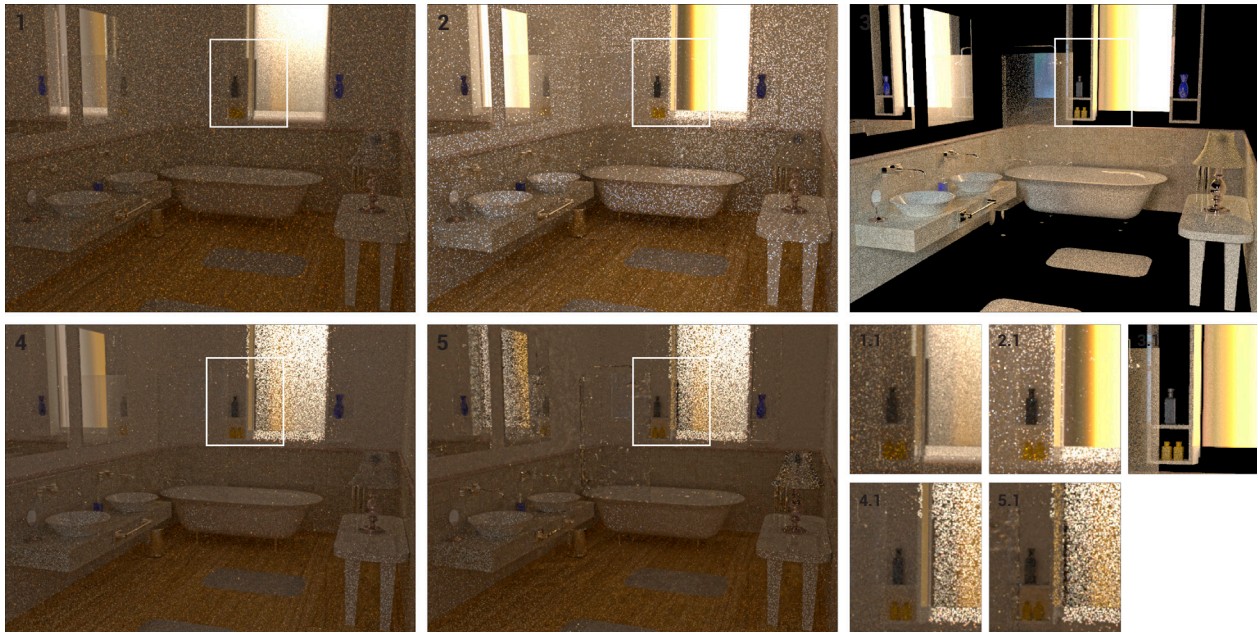


Figura 3. Escena Baño con iluminación natural, renderizada con 1000 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. A la derecha de la figura, las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural	27 min	1000	Total	Uniforme	
BDPT	Natural	13 min	1000	Total	Total	
SPPM	Natural	42 min	1000	Uniforme	Pared + suelo	Pared y suelo oscuros
PSSMLT	Natural	44 min	1000	Ruido en general	Ventana	Ruido en puntos donde normalmente no se genera
PSMLT	Natural	12 min	1000	Ruido en general	Ventana + reflejo espejo	Comportamiento similar a PSSMLT

Tabla 3. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Baño con iluminación natural para 100 muestras.



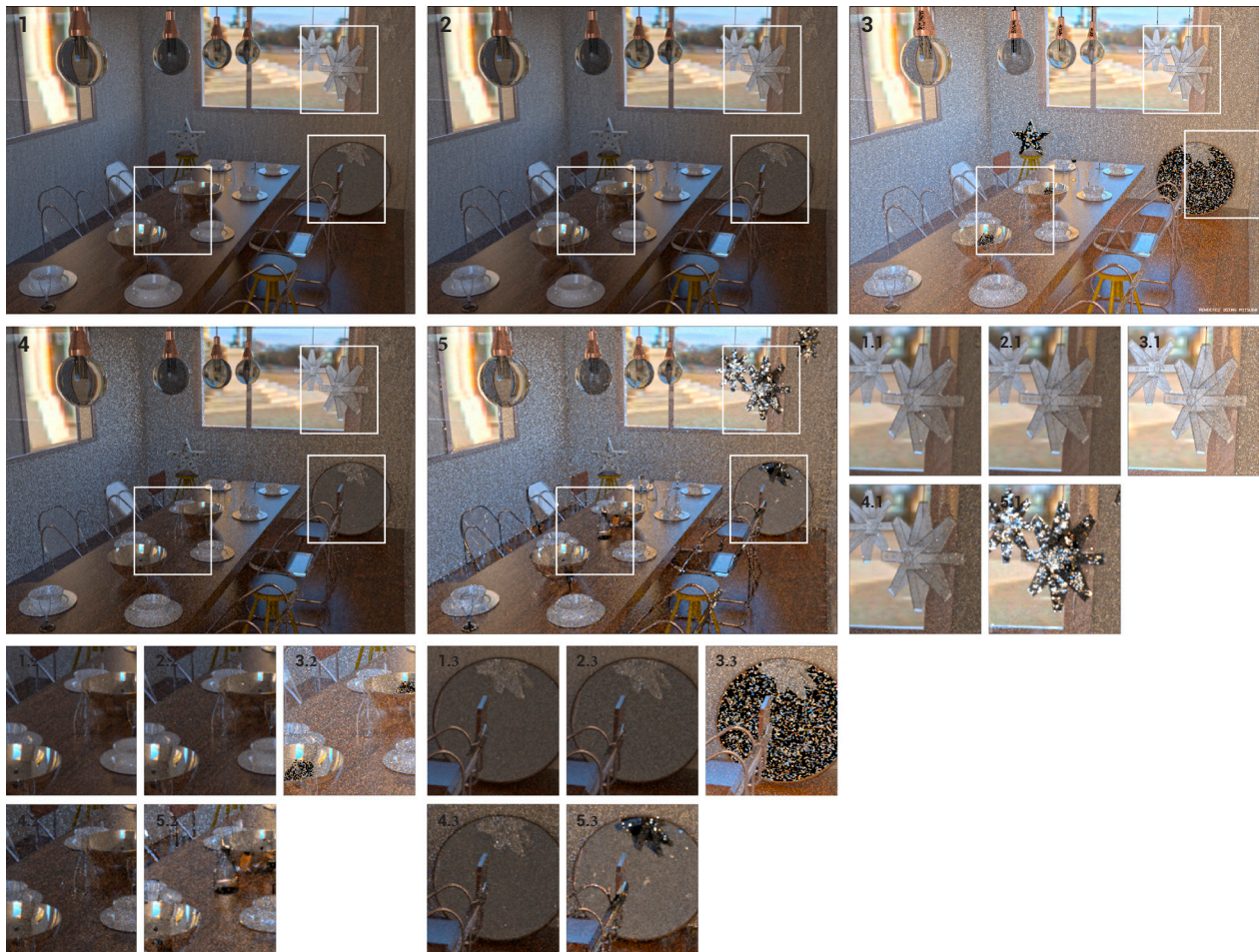


Figura 4. Escena Salón con iluminación natural, renderizada con 500 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural	15 min	500	Ruido escaso	Estrellas + reflejo estrellas espejo	
BDPT	Natural	13 min	500	Menos que PT	Reflejo estrellas espejo	
SPPM	Natural	23 min	500	Ruido en general	Estrella estática + espejo	
PSSMLT	Natural	13 min	500	Ruido en general	Toda la pared	Ruido en puntos donde normalmente no se genera
PSMLT	Natural	5 min	500	Total	Pared + estrellas colgantes	Comportamiento similar PSSMLT

Tabla 4. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Salón con iluminación natural para 500 muestras.



Figura 5. Escena Salón con iluminación natural, renderizada con 1000 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural	23 min	1000	Ruido escaso	Estrellas + reflejo estrellas espejo	
BDPT	Natural	21 min	1000	Menos que PT	Reflejo estrellas espejo	
SPPM	Natural	17 min	1000	Ruido en general	Estrella estática + espejo	Pared y suelo
PSSMLT	Natural	12 min	1000	Ruido en general	Toda la pared	Ruido en puntos donde normalmente no se genera
PSMLT	Natural	5 min	1000	Total	Pared + estrellas colgantes	Comportamiento similar a PSSMLT

Tabla 5. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Salón con iluminación natural para 1000 muestras.



## 1.2 Iluminación Artificial

En este caso, analizamos los resultados de cada algoritmo eliminando la iluminación natural, y usando como fuentes de luz las múltiples fuentes presentes en las escenas. Las pruebas se realizan, de nuevo, para 500 y 1000 muestras. Las distintas comparaciones se pueden ver en las Figuras (6, 7, 8, 9) y los detalles numéricos de las pruebas se pueden ver en las Tablas (6, 7, 8, 9), respectivamente.

### **Path Tracing (PT)**

Existe una reducción significativa del ruido en la escena del baño, respecto al mismo algoritmo para la iluminación natural, aunque, del mismo modo, el ruido se distribuye uniforme en toda la imagen. No obstante, la pantalla de la lámpara tiene más cerca que otros puntos una fuente de luz, por lo que se produce una singularidad, aumentando su concentración de ruido. Esto es debido a que a Path Tracer le es muy complicado encontrar el camino bueno entre una fuente de luz ocluida por un cristal (como es el caso de la esfera emisiva del interior de la lámpara, la cual tapa la mampara de cristal rugoso) y el punto iluminado, debido a la refracción de la luz. Además, ya que PT es relativamente bueno para el transporte de luz en superficies especulares con luz de baja frecuencia, que esos rayos de luz se encuentren con la superficie difusa de la pared, no ayuda a reducir el ruido. En el salón se ha generado gran cantidad de ruido uniformemente en toda la escena.

### **Bidirectional Path Tracing (BDPT)**

BDPT mejora notablemente sobre PT, debido a que es capaz de trazar caminos desde las fuentes de luz, lo cual es especialmente útil para fuentes de luz ocluidas tras cristales (p.ej. las lámparas en el comedor): dado que este tipo de iluminación es el dominante en esta escena, BDPT mejora significativamente sobre PT, aunque resulte algo peor que otros algoritmos (p.ej. PM). Pese a que el ruido en BDPT se distribuye de manera uniforme (como hace en la escena del baño para estas condiciones), en la escena del salón, la mayor cantidad de ruido se concentra únicamente en las zonas acristaladas. En estas zonas predomina el transporte cáustico, que es difícil de muestrear de forma ciega, y que genera más ruido.

Como consecuencia de que con BDPT las muestras son más caras de renderizar, existe un aumento en el tiempo de duración del render para el mismo número de muestras.

### **Stochastic Progressive Photon Mapping (PM)**

En las imágenes con iluminación artificial, el comportamiento es bastante parecido para estas escenas al de Path Tracer, ya que el ruido está distribuido uniformemente, aunque también está bastante reducido. En el salón, el ruido generado es uniforme salvo en el reflejo del espejo (está reflejando el techo difuso) y en la estrella (compuesta por un material difuso también), donde apenas hay ruido. Este ruido se ha producido porque este algoritmo es, a diferencia de PT y BDPT, bueno en encontrar caminos entre una luz ocluida por un cristal y el punto iluminado, ya que lanza fotones desde la fuente de luz (en el caso del salón, la fuente de luz es el filamento de las bombillas, ocluido por el cristal). El problema viene en si estos fotones, una vez lanzados, no se encuentran con superficies difusas, si no que sólo encuentran superficies especulares: el ruido en las superficies especulares actúa de la misma manera que en la iluminación artificial renderizada con PT (tanto en el baño, como en el salón).

### **Primary Sample Space Metropolis Light Transport (PSSMLT)**

En cuanto a la iluminación artificial, al no existir iluminación proveniente del exterior (mapa de ambiente) ya no se concentra tanto ruido en la ventana del baño ni en la pared de salón, teniendo un comportamiento más normal. No obstante, el ruido está distribuido en zonas donde normalmente no se genera ruido (como pasa con la iluminación natural), y en el salón, el ruido tiene un comportamiento parecido al de BDPT para la iluminación artificial.

### **Path Space MLT (PSMLT)**

Dado que las escenas presentan un transporte de luz mayoritariamente cáustico, PSMLT converge rápidamente a una solución sin ruido en ambas escenas con iluminación artificial de alta frecuencia en la mayoría de las zonas de la imagen, especialmente en el comedor. Sin embargo, se puede ver que produce errores en numerosas áreas: esto es debido a que el algoritmo centra sus cálculos en ciertas partes de la escena cuando no ha convergido. Es bien sabido por la comunidad que estos errores impredecibles son habituales en PSMLT (a diferencia de otros algoritmos), lo cual hace complicado evaluar en qué momento el algoritmo converge a la solución correcta.



Figura 6. Escena Baño con iluminación artificial, renderizada con 500 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Artificial	7 min	500	Reducción significativa del ruido	Pantalla lámpara + mampara	
BDPT	Artificial	22 min	500	Sin apenas ruido	Mampara	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Artificial	6 min	500	Reducción de ruido	Pantalla lámpara + mampara	Comportamiento similar a BDPT
PSSMLT	Artificial	49 min	500	Gran reducción del ruido	Uniforme	Incremento significativo de la calidad del render al no haber iluminación exterior
PSMLT	Artificial	3 min	500	Gran reducción del ruido	Ventana + pantalla lámpara	Comportamiento similar a PSSMLT

Tabla 6. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Baño con iluminación artificial para 500 muestras.



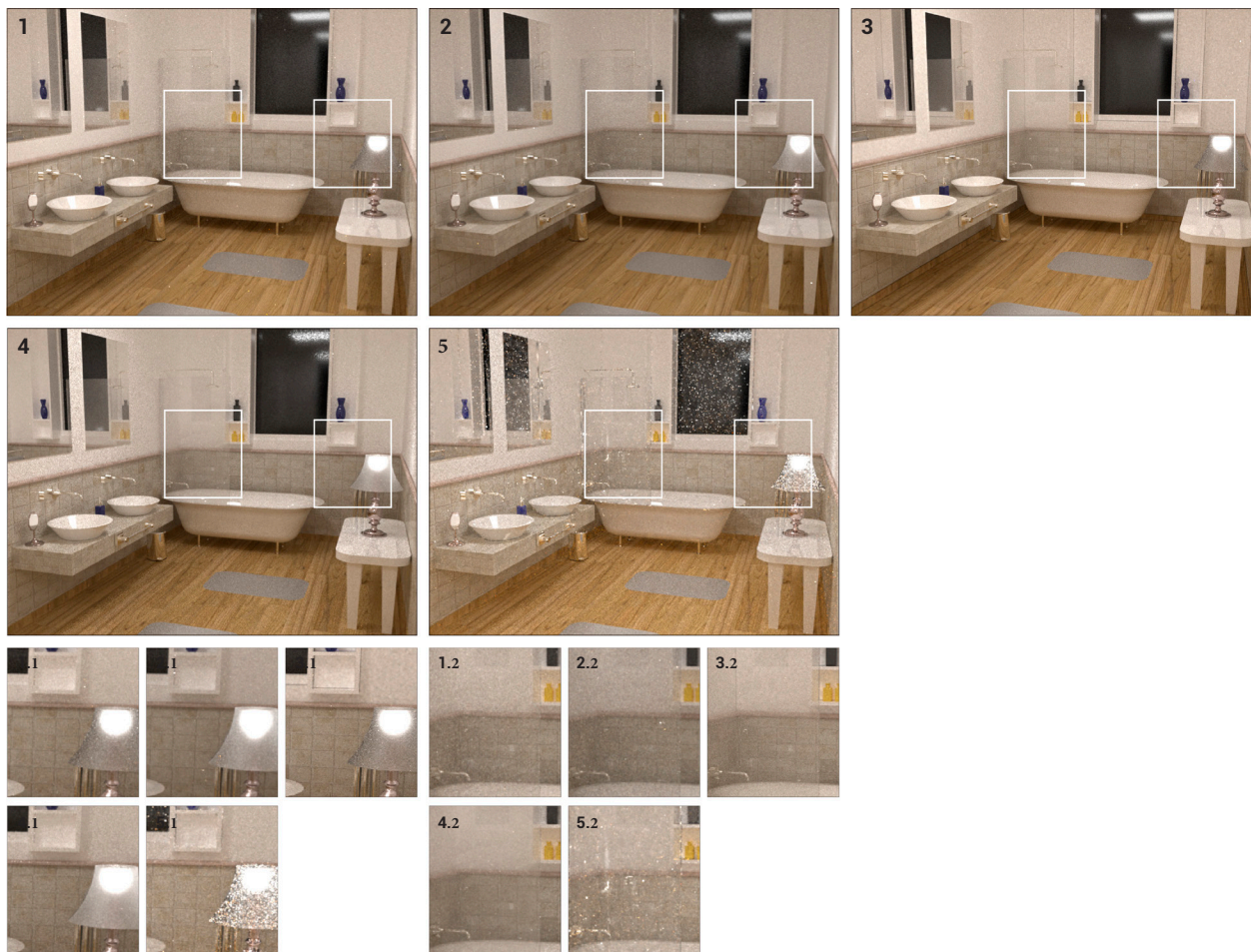


Figura 7. Escena Baño con iluminación artificial, renderizada con 1000 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidi-reccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Artificial	12 min	1000	Reducción significativa del ruido	Pantalla lámpara + mampara	
BDPT	Artificial	46 min	1000	Sin apenas ruido	Mampara	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Artificial	57 min	1000	Reducción de ruido	Pantalla lámpara + mampara	Comportamiento similar a BDPT
PSSMLT	Artificial	1 h 42 min	1000	Gran reducción del ruido	Uniforme	Incremento significativo de la calidad del render al no haber iluminación exterior
PSMLT	Artificial	6 min	1000	Gran reducción del ruido	Ventana + pantalla lámpara	Comportamiento similar a PSSMLT

Tabla 7. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Baño con iluminación artificial para 1000 muestras.

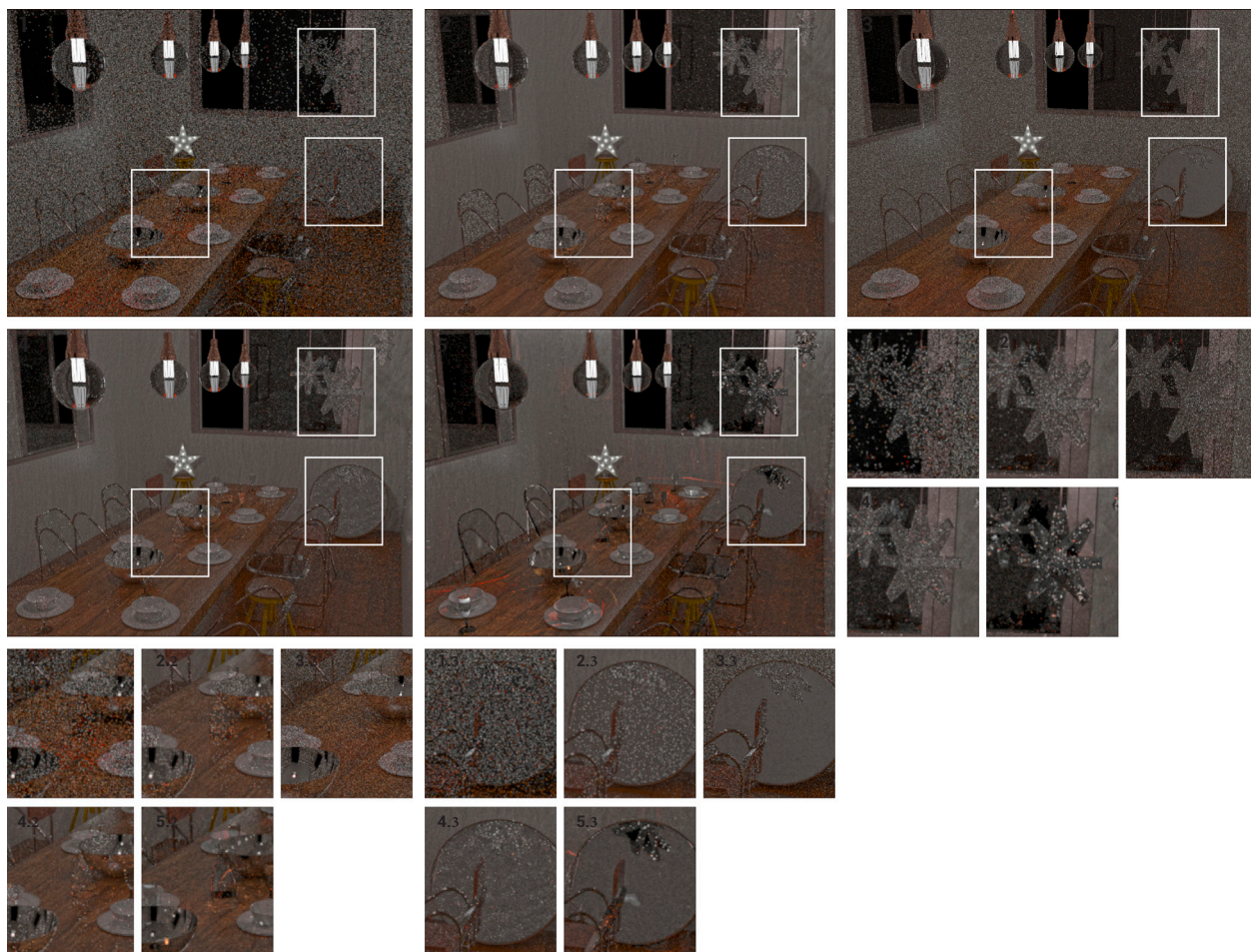


Figura 8. Escena Salón con iluminación artificial, renderizada con 500 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Artificial	14 min	500	Sin apenas ruido	Uniforme	
BDPT	Artificial	27 min	500	Sin apenas ruido	Uniforme	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Artificial	16 min	500	Sin apenas ruido	Reflejo estrella colgante	Comportamiento similar a BDPT
PSSMLT	Artificial	46 min	500	Sin apenas ruido	Distribuido en zonas poco comunes	Incremento significativo de la calidad del render al no haber iluminación exterior
PSMLT	Artificial	3 min	500	Sin apenas ruido	Estrellas colgantes indistinguibles	Comportamiento similar a PSSMLT

Tabla 8. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Salón con iluminación artificial para 500 muestras.





Figura 9. Escena Salón con iluminación artificial, renderizada con 1000 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Artificial	13 min	1000	Sin apenas ruido	Uniforme	
BDPT	Artificial	1 h 34 min	1000	Sin apenas ruido	Uniforme	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Artificial	48 min	1000	Sin apenas ruido	Reflejo estrella colgante	Comportamiento similar a BDPT
PSSMLT	Artificial	56 min	1000	Sin apenas ruido	Distribuido en zonas poco comunes	Incremento significativo de la calidad del render al no haber iluminación exterior
PSMLT	Artificial	7 min	1000	Sin apenas ruido	Estrellas colgantes indistinguibles	Comportamiento similar a PSSMLT

Tabla 9. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Salón con iluminación artificial para 1000 muestras.

## 1.3 Iluminación Natural y Artificial

Como hemos mencionado, no se muestra la explicación del modo en el que actúan los algoritmos sobre las escenas con iluminación natural y artificial. Esto es debido a que los resultados de cada algoritmo sobre estas escenas son similares a las de iluminación natural. No obstante, sí se pueden observar los resultados a nivel gráfico así como la comparación en tiempo de render, concentración de ruido, etc, que aparece en las tablas. Las pruebas se realizan, de nuevo, para 500 y 1000 muestras, comparándose en las Figuras (10, 11, 12 y 13) y los detalles numéricos de las pruebas se pueden ver en las Tablas (10, 11, 12 y 13), respectivamente.



Figura 10. Escena Baño con iluminación natural y artificial, renderizada con 500 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidirectional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural y artificial	8 min	500	Reducción significativa del ruido	Pantalla lámpara + mampara + ventana	
BDPT	Natural y artificial	22 min	500	Sin apenas ruido, aunque algo más que con iluminación artificial	Uniforme	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Natural y artificial	12 min	500	Reducción de ruido	Pantalla lámpara + mampara	Parecida a la escena de iluminación artificial de este integrador
PSSMLT	Natural y artificial	45 min	500	Ruido en general	Ventana	Comportamiento parecido al de la iluminación natural
PSMLT	Natural y artificial	5 min	500	Totalidad	Ventana + reflejo espejo (procedente de la ventana) + pantalla lámpara	Comportamiento similar a iluminación natural

Tabla 10. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Baño con iluminación natural para 500 muestras.





Figura 11. Escena Baño con iluminación natural y artificial, renderizada con 1000 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidirectional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural y artificial	24 min	1000	Reducción significativa del ruido	Pantalla lámpara + mampara + ventana	
BDPT	Natural y artificial	41 min	1000	Sin apenas ruido, aunque algo más que con iluminación artificial	Uniforme	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Natural y artificial	13 min	1000	Reducción de ruido	Pantalla lámpara + mampara	Parecida a la escena de iluminación artificial de este integrador
PSSMLT	Natural y artificial	1 h 31 min	1000	Ruido en general	Ventana	Comportamiento parecido al de la iluminación natural
PSMLT	Natural y artificial	7 min	1000	Totalidad	Ventana + reflejo espejo (procedente de la ventana) + pantalla lámpara	Comportamiento similar a iluminación natural

Tabla 11. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Baño con iluminación natural y artificial para 1000 muestras.

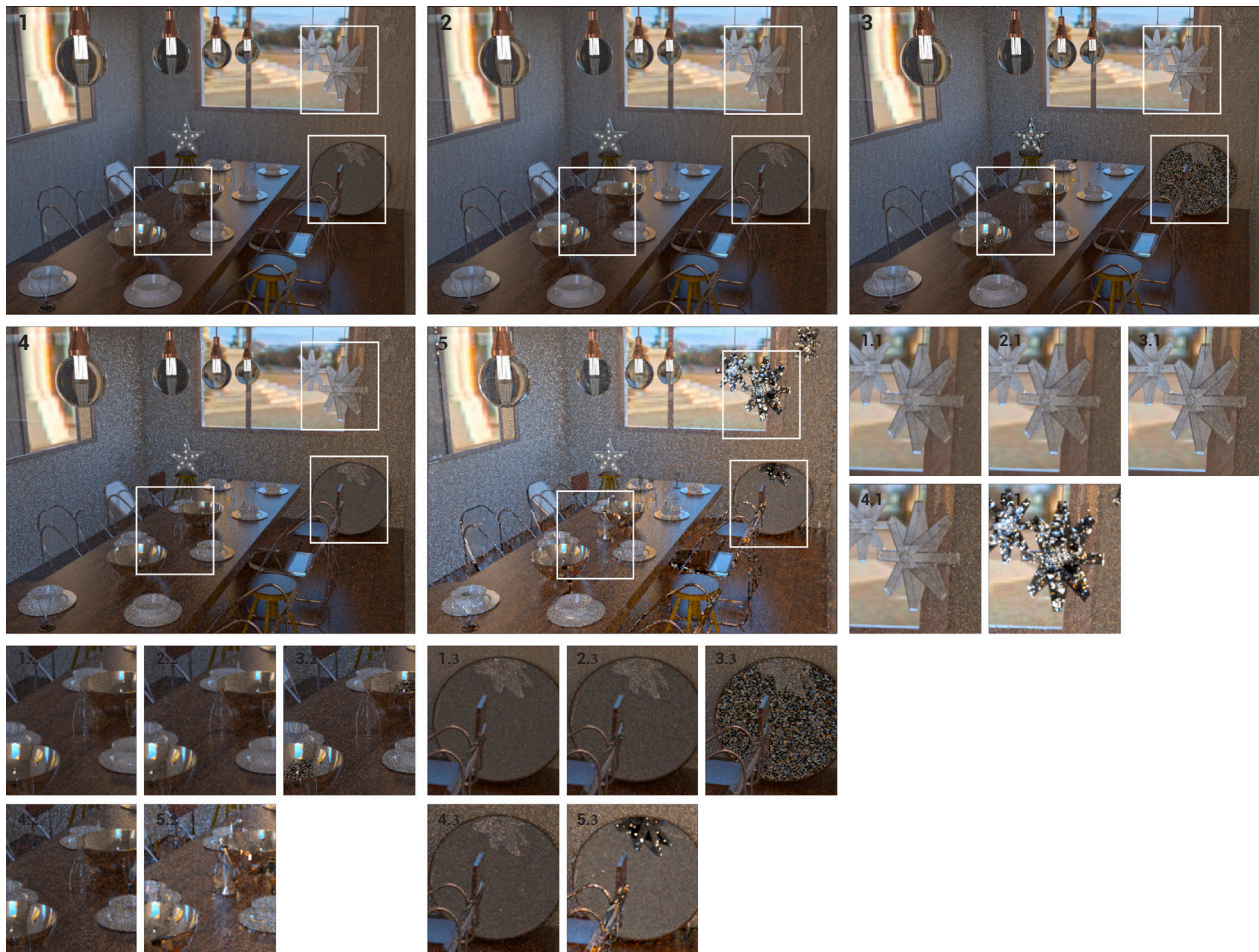


Figura 12. Escena Salón con iluminación natural y artificial, renderizada con 500 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidireccional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural y artificial	15 min	500	Sin apenas ruido	Estrellas + reflejo estrellas espejo	
BDPT	Natural y artificial	1 h 1 min	500	Sin apenas ruido	Estrellas + reflejo estrellas espejo	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Natural y artificial	42 min	500	Ruido en general	Estrella estática + espejo	Parecida a la escena de iluminación natural de este integrador
PSSMLT	Natural y artificial	50 min	500	Ruido en general	Toda la pared	Comportamiento parecido al de la iluminación natural
PSMLT	Natural y artificial	7 min	500	Total	Pared + estrellas colgantes	Comportamiento similar PSSMLT

Tabla 12. Tabla comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Salón con iluminación natural y artificial para 500 muestras.



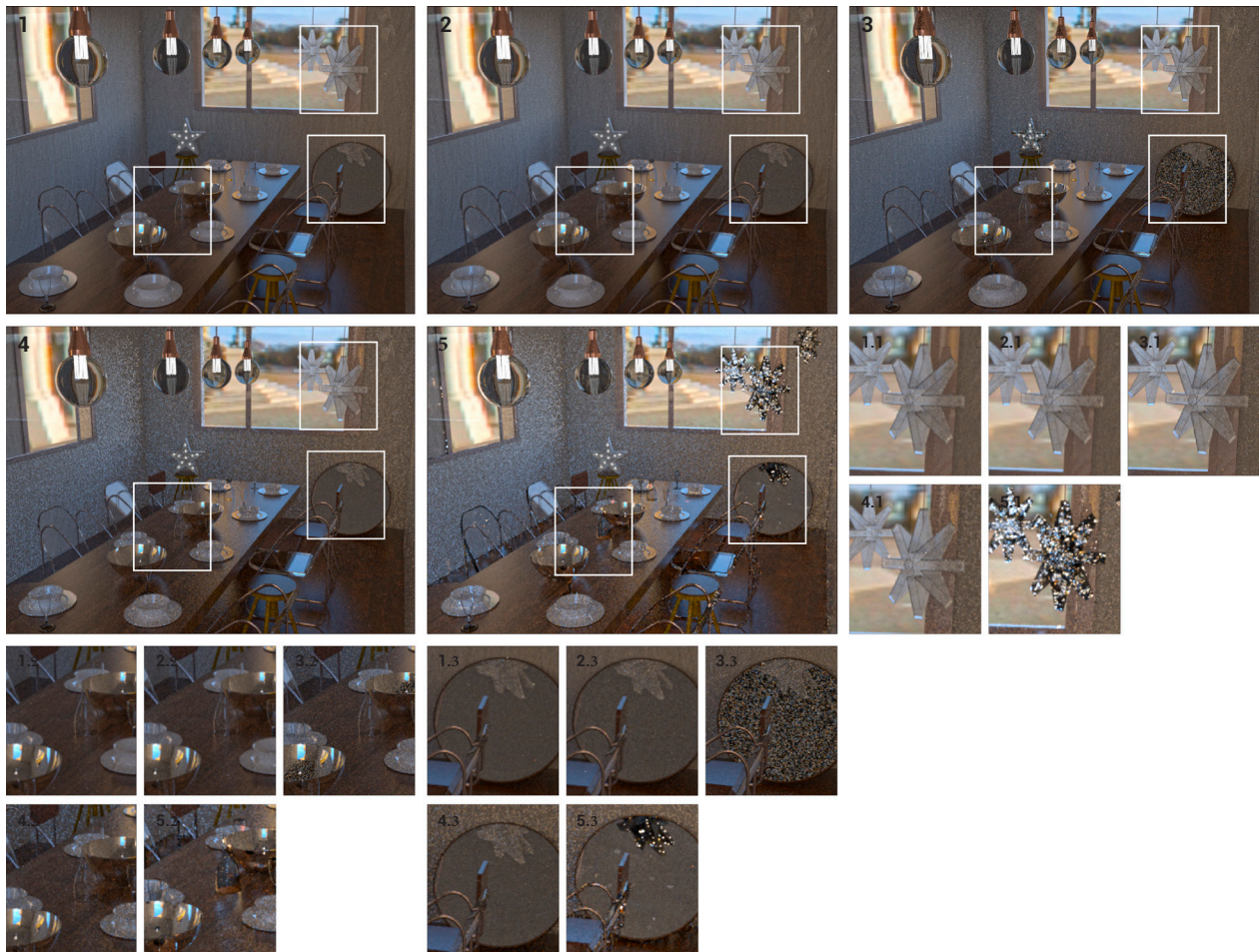


Figura 13. Escena Salón con iluminación natural y artificial, renderizada con 1000 muestras por, de izquierda a derecha y de arriba a abajo; path tracer, bidirectional PT, stochastic progressive photon mapping, primary sample space MLT, path space MLT. Las imágenes ampliadas en las que se puede obtener una visualización del ruido en la zona de la ventana, están ordenadas de la misma manera.

Algoritmo	Iluminación	Duración render	Nº de muestras	Progresión del ruido	Concentración del ruido	Notas
PT	Natural y artificial	27 min	1000	Sin apenas ruido	Estrellas + reflejo estrellas espejo	
BDPT	Natural y artificial	1 h 16 min	1000	Sin apenas ruido	Estrellas + reflejo estrellas espejo	Mejor calidad pero aumento considerable en el tiempo de duración de render
SPPM	Natural y artificial	34 min	1000	Ruido en general	Estrella estática + espejo	Parecida a la escena de iluminación natural de este integrador
PSSMLT	Natural y artificial	46 min	1000	Ruido en general	Toda la pared	Comportamiento parecido al de la iluminación natural
PSMLT	Natural y artificial	12 min	1000	Total	Pared + estrellas colgantes	Comportamiento similar PSSMLT

Tabla 13. Comparativa en tiempo, número de muestras y ruido de cada algoritmo de render para la Escena Salón con iluminación natural y artificial para 1000 muestras.

## 2 ¿Cuál es el algoritmo óptimo para cada escena?

Tras haber realizado un análisis de los valores de la tabla, es necesario cotejar los resultados para conocer cuál es el óptimo algoritmo que va a ejecutar el render de la manera más precisa (en términos de calidad final de la imagen, disminución de ruido, distribución de ruido en zonas de mayor o menor importancia, etcétera) y valorando también el tiempo que va a tardar en su ejecución así como el número de samples empleados.

### **Escena del baño con iluminación natural**

- 1 - Path Tracer
- 2 - Bidirectional Path Tracer

El ruido se genera de manera uniforme en esta escena tanto como para PT, como para BDTP. Sin embargo, PT, además de ser más rápido, es más eficiente que BDPT en este tipo de escenas con iluminación natural. Por lo general, a BDPT le es más difícil renderizar desde un mapa de ambiente (de la misma forma que le resulta difícil a PM), pudiendo tener también un poco de problema en los dieléctricos o cristales rugosos. Por eso se elige PT para esta escena.

### **Escena del salón con iluminación natural**

- 1 - Path Tracer
- 2 - Bidirectional Path Tracer

Las escenas son aparentemente idénticas, por lo que se elige Path Tracer para el render con este tipo de iluminación del salón. Esto es porque teniendo una apariencia similar en esta escena, BDPT renderiza a un mayor número de muestras en un menor tiempo, mejorando el ruido de la imagen.

### **Escena del baño con iluminación artificial**

- 1 - Path Tracer
- 2 - Bidirectional Path Tracer
- 3 - Stochastic Progressive Photon Mapping

En este caso, se elige Bidirectional Path Tracer. Esto se debe a su mejor capacidad de resolución del ruido generado en las superficies difusas, que en otros casos es más complicado, y aunque el tiempo de rendering aumente para menos samples que con Path Tracer, es la mejor opción.

### **Escena del salón con iluminación artificial**

- 1 - Path Tracer
- 2 - Bidirectional Path Tracer
- 3 - Stochastic Progressive Photon Mapping.
- 4 - Primary Simple Space MLT

Para este tipo de iluminación artificial, Bidirectional Path Tracer (que mejora en ruido respecto a Path Tracer) no soluciona el ruido en las zonas acristaladas en el tiempo de rendering, de la misma manera que no lo hace PSSMLT (aunque sí que lo reduce significativamente). SPPM continúa generando una gran cantidad de ruido en las superficies especulares, debido a que su trazador de rayos, similar a PT, no es bueno al renderizar puntos iluminados por fuentes de luz ocluidas. Por tanto, como algoritmo final se escogería PSSMLT, por realizar la mejor aproximación para las cáusticas y no tener tanto ruido uniforme como las imágenes del resto de algoritmos.

Para el caso de la **iluminación natural y artificial** tanto para la escena del baño o la del salón, se utilizarán los mismos algoritmos que se han empleado en las escenas con iluminación natural, ya que casi toda la luz es procedente del mapa de ambiente.

### 3 DISCUSIÓN

PT y BDPT son dos algoritmos que se asemejan en la manera de generar imágenes, aunque distan bastante en su eficiencia. Tanto PT como BDPT son algoritmos relativamente buenos para el transporte de luz con elementos especulares, a una iluminación de baja frecuencia. Sin embargo, PT es generalmente más rápido que BDPT, aunque produce samples de peor calidad, por lo que dependiendo del input, es preferible la utilización de uno u otro. Además, ambos actúan de manera similar generando un ruido distribuido uniformemente sobre la escena renderizada y a ambos dos les resulta muy complicado encontrar el camino bueno entre una fuente de luz (emisor), que está en sombra, es decir, que se encuentra ocluida por otra superficie que provoca una refracción de la luz, y un punto iluminado. En general, salvando las distancias en su manera de ejecución del proceso de rendering; BDPT es como PT pero mejor en según qué configuraciones de luz (especialmente en oclusiones fuertes o zonas donde casi no llega la luz, precisamente por su capacidad de lanzar rayos en dos direcciones; desde el punto de vista o cámara y desde la fuente de iluminación, hasta que esos rayos convergen).

Para el transporte de luz en superficies difusas, PM es un buen algoritmo, ya que los fotones lanzados en su primera fase son ideales para luz de alta frecuencia (cáusticas) y mejores en superficies difusas. Además, PM es bueno encontrando caminos entre una fuente de luz ocluida por una superficie donde se produzca una refracción de la luz y el punto iluminado, ya que este algoritmo lanza fotones desde la propia fuente de luz y los usa en la interpolación. El problema vendría si al lanzar esos fotones no se encuentran con ninguna superficie difusa. Este problema, sin embargo, es propio de la implementación que se utilice de PM: en nuestro caso, hemos usado la implementación de Mitsuba, que sólo usa los fotones para calcular la iluminación en superficies difusas. Además, la iluminación procedente de un mapa de ambiente es problemática para PM, especialmente si los fotones trazados no son guiados para interactuar con la escena (por ejemplo, para atravesar una ventana). Las superficies especulares en el proceso de rendering de PM estarán cubiertas por su segunda fase, en la que un trazador de rayos parecido a PT lanza caminos de luz en todas las direcciones.

En cuanto al transporte de luz de alta frecuencia, tanto PSSMLT como PSMLT (cualquier MLT), funcionan mucho mejor que los fotones de Photon Mapping, aunque si hay algo que destaca en este tipo de algoritmos es la concentración del ruido. El ruido generado en los renders no es uniforme, por lo que da lugar a patrones de ruido estructurados muy visibles. Además, ya que centra las muestras en zonas brillantes, las zonas con poca iluminación son submuestreadas, resultando en un mayor ruido en esas zonas. Para cualquier MLT, al igual que PT y BDPT, también es complicado encontrar el camino bueno cuando existe un ocluidor entre la fuente de iluminación y el punto iluminado. La ventaja es que, una vez que ha encontrado ese camino, se queda con él y calcula mucho más rápido esa iluminación, ya que este algoritmo busca caminos de luz relevantes y cuando los encuentra, busca caminos vecinos para amortizar el coste de la búsqueda.

## 4 Renders Finales

Por último, se realizan una serie de renders finales sobre cada escena, donde se ha elevado el número de muestras reduciendo todo lo posible el error. Concretamente se ha ascendido a 14000 muestras por píxel en cada render, utilizando principalmente los algoritmos que menos ruido producían para ese número de muestras, así como los más apropiados para esa escena.

Por ello, para la Figura 14 en la que aparece la escena del baño con iluminación únicamente artificial, se emplea Bidirectional Path Tracer, debido a su capacidad de reducción de ruido en superficies difusas bajo esas circunstancias de luz. Para la Figura 15 en la que aparece la escena del baño con iluminación natural, se ha empleado Path Tracer por su rapidez y eficiencia ante este tipo de condiciones de luz. La Figura 16 muestra la escena del salón con iluminación natural y artificial, donde se ha empleado Path Tracer (por el motivo anterior). En la Figura 17 se ha utilizado esta vez BDPT.



Figura 14. Escena Baño con iluminación artificial, renderizada por Bidirectional Path Tracer (BDPT). Empleadas 14000 muestras por píxel. Duración de 10 h 52 min.





Figura 15. Escena Baño con iluminación natural y artificial, renderizada por Path Tracer (PT). Empleadas 14000 muestras por píxel. Duración de 10 h 58 min



Figura 16. Escena Salón con iluminación natural y artificial, renderizada por Path Tracer (PT). Empleadas 14000 muestras por píxel. Duración de 11 h 16 min.



Figura 17. Escena Salón con iluminación natural y artificial, renderizada por Bidirectional Path Tracer (PT). Empleadas 14000 muestras por píxel. Duración de 1 día 13 horas