



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

## Apéndices del TFG

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013



# Índice de contenidos:

---

1. Túneles y situaciones de emergencia en túneles	5
2. Señalética y normativa	28
3. La física de la visión	50
4. Ecuación de rendering basado en la física	66
5. ¿Qué software de rendering utilizar?	77
6. Otros experimentos que describen el comportamiento del ojo	83
7. Implementación del algoritmo	88
8. ficha_tecnica_implaled	97
9. Impacto visual del humo en túneles	100
10. Capítulo 13. Iluminación de túneles INDAL	113
11. Resultados obtenidos utilizando otros reproductores de tono	116





## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 1/11

### Túneles y situaciones de emergencia en túneles

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

- 1. ¿Qué es un túnel?**
- 2. Situaciones críticas en un túnel**
  - 2.1. Incendios**
    - 2.1.1. Tipos**
    - 2.1.2. Causas**
    - 2.1.3. Problemática de los incendios en túneles**
    - 2.1.4. Comportamiento del humo en un túnel**
    - 2.1.5. Antecedentes de accidentes en túnel**
      - 2.1.5.1. Túnel de Tauern (1999)**
      - 2.1.5.2. Túnel de Montblanc (1999)**
      - 2.1.5.3. Túnel de San Gotardo (2001)**
      - 2.1.5.4. Comentarios en forma de conclusiones**
    - 2.1.6. Problemas de la intervención externa en caso de incendio**
    - 2.1.7. Problemática específica referente a los cuerpos de bomberos**
    - 2.1.8. Consecuencias estructurales de un incendio**
  - 2.2. Congestión**
  - 2.3. Vehículo roto**
- 3. Bibliografía**

## 1 ¿Qué es un túnel?

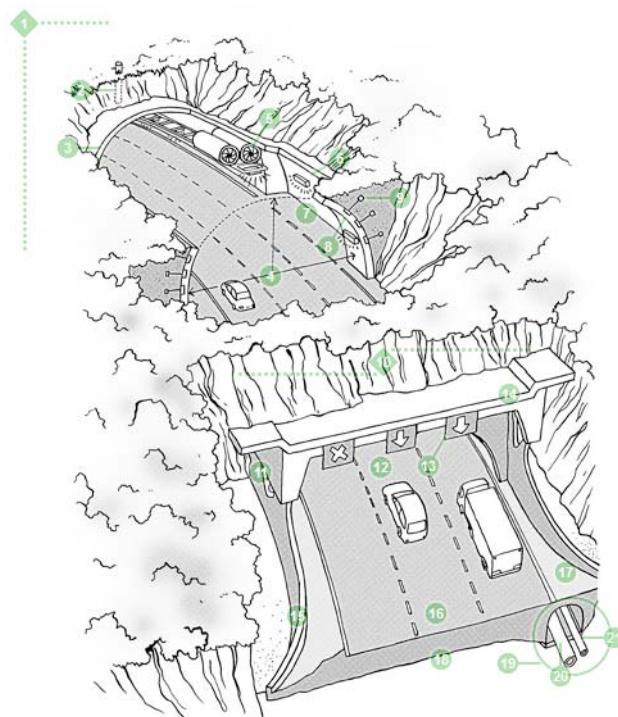
Desde el punto de vista general se define como. Paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación.

Los túneles proporcionan hoy en día unas facilidades de comunicación que se traducen en: una reducción de tiempos de desplazamiento, de consumos de combustibles y de cierto tipo de riesgos viarios (caídas en taludes por salirse los vehículos de la calzada en puertos de montaña, etc. )[Orta, 2001].

Todo ello, se traduce en una mayor eficiencia económica y en una mayor seguridad y comodidad para los conductores.

### 1.1 Partes estructurales de un túnel [Orta, 2001]

- 1. Clave: Es la parte más alta del túnel.
- 2. Pozo de ventilación
- 3. Revestimiento
- 4. Gálibo: Es la altura libre que hay sobre la calzada o zona de circulación de vehículos. Siempre es menor que la altura de la clave.
- 5. Ventiladores
- 6. Puntos de luz
- 7. Apartaderos: Son sobre anchos para paradas de emergencia de los vehículos.
- 10. Bocas: Son los pórticos por los que se penetra y se sale del túnel.
- 11. Hastiales: Son el lateral izquierdo y derecho del túnel. Suelen estar forrados con chapa, cuando el túnel no está revestido de hormigón.
- 16. Calzadas: Es por donde ruedan los vehículos.
- 17. Aceras: Si existen, son para el tránsito de personas.
- 20. Cunetas: Son para recogida de líquidos de materias peligrosas.



Partes estructurales de un túnel

### *1.2 Equipamiento general de un túnel según RD 635 de 2006 túneles BOE 126 de 27 de mayo.*

- Semáforos y sus controladores
- Nodos de comunicación
- Estaciones de captura de datos
- Sensores de distintos tipos
- Cámaras de videovigilancia
- Paneles de señalización variable (de información)
- Controles de acceso
- Radares de velocidad
- Sensores climatológicos
- Sensores de calidad de aire (gas, partículas, ruido)
- Centros de control equipados (software y hardware)
- Ventilación
- Iluminación
- Megafonía
- Opacímetros
- Equipos de detección y extinción de incendios
- Señalización
- Salidas de emergencia

## 2 Situaciones críticas en un túnel

### 2.1 Incendios

La situación de mayor riesgo derivada de un accidente en un túnel es un caso de incendio. Esto es debido a que los túneles, al ser cavidades muy aisladas del exterior, presentan el problema de la dificultad de eliminación del calor, el humo y las sobrepresiones.

#### 2.1.1 Tipos [Esparza, 2002]

De combustible:

- *Gases*: Son los fuegos más peligrosos. Se mezclan íntimamente con el aire y su ignición puede provocar una explosión. Producen llamas.
- *Líquidos*: Estos fuegos son tanto más peligrosos cuanto más volátiles sean. Cuando se manejan a temperatura superior a la de inflamación, la mezcla de sus vapores con el aire puede inflamar con violencia, y si hay suficiente volumen de mezcla se pueden provocar explosiones. Producen llamas.
- *Sólidos*: Son tanto más peligrosos cuando menos densos sean. Cualquier combustible reducido a polvo y dispersado en el aire (formando una nube), se inflama con violencia explosiva. Al arder normalmente producen llamas y brasas (excepto la cera, parafina y similares).

#### 2.1.2 Causas [Romana, 2011]

Ignición de un vehículo (con fugas de combustible)

- Por calentamiento del vehículo (Frecuente en túneles de montaña con rampas)
- Por problemas del circuito eléctrico

Ignición de la carga

- Materiales combustibles (paja, margarina, neumáticos)
- Infrecuentemente mercancías peligrosas.

### 2.1.3 Problemática de los incendios en túneles. [Orta, 2002]

#### Efecto horno

La concentración del humo y calor que se produce en el interior de un túnel, es debida a que no existe hueco alguno por donde pueda salir el humo y el calor de una forma inmediata y natural.

Esto genera el denominado “efecto horno”, que consiste en acumulación progresiva del calor, que se traduce en un aumento continuado de la temperatura.

Se le denomina efecto horno, porque la situación es muy parecida a lo que ocurre con el horno de una cocina.

#### Efecto cañón

Este efecto se presentará, cuando se produzcan explosiones en un túnel.

Por ejemplo un camión-cisterna que contenga un gas presurizado que por efecto del calor de un incendio explota.

Dado que estamos en una cavidad lineal, esta se comportará como si fuera el cañón de una escopeta. Esto es debido a que la sobrepresión generada por la explosión en el interior del túnel solo puede liberarse hacia ambos lados a partir del punto de origen de dicha explosión.

Si tal explosión se produce, la sobrepresión creada será mayor que si ocurriese a cielo abierto, con lo cual, los daños para las personas debidos a la onda expansiva, serán mayores que en un lugar a cielo abierto. También los objetos proyectados por la explosión, que se concentrarán, debido a que serán direccionados a través del túnel (como los perdigones de una escopeta).

#### Control de humos (problema derivado de un incendio)

El riesgo del humo es muy elevado, causa baja visibilidad, con la consecuente desorientación del usuario y asfixia, dificultando la salvaguardia del usuario. Es además la principal causa de muerte de los accidentes en túneles.

Hay que basarse en criterios de presurización para evitarlo. Un incendio es tan malo airearlo como ahogarlo (efecto flashback).

Hay que intentar situar la salida de humo lo más alejada posible de la de personas.

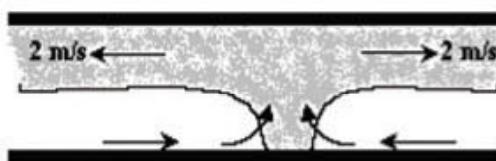
Riesgos para la vida humana [Romana, 2011]

- Alta temperatura del aire ( $>80^{\circ}\text{C}$ )
- Radiación de calor del fuego
- $<2,5 \text{ KW/m}^2$  para usuarios
- $\sim 5 \text{ KW/m}^2$  para bomberos equipados
- Gases tóxicos (CO, NO, HCl....)
- Pérdida de la visibilidad a menos de 7 m
- Caída de objetos y/o elementos ( $>450^{\circ}\text{C}$ )
- Destrucción de equipamiento de seguridad
- Lajeo (Spalling) del hormigón

#### 2.1.4 Comportamiento del humo en un túnel. [Hacar, 2012]

La evolución de los gases generados y las temperaturas que se alcancen dependen de la velocidad de la corriente de aire en el túnel.

En un caso general los humos calientes que se generan tienden por flotabilidad a ascender a la bóveda del túnel, produciéndose la estratificación en la que los humos más calientes ocupan la parte superior y los más fríos la inferior de la sección del túnel.



**Avance los humos calientes en un túnel horizontal incluso sin ventilación. (AIPCR. 2007)**

Incluso con velocidad del aire nula en el área del fuego, los humos calientes avanzan por la bóveda del túnel hacia cada lado del fuego, haciéndolo en un túnel horizontal a una velocidad de  $\approx 2 \text{ m/s}$ .

Los humos se van enfriando conforme se alejan del foco y descienden hacia la parte inferior del túnel mezclándose con el aire limpio y ocupando la sección del túnel completa.

En el caso de un túnel en pendiente (es decir, perfil longitudinal descendente), con sentidos de tráfico y de la ventilación igualmente descendentes, en un incendio, por "efecto chimenea" los humos calientes pueden llegar a remontar la pendiente, es decir, podrán avanzar a contracorriente del aire fresco. Si eso sucediera, los usuarios que intenten escapar de los humos avanzando contra la corriente de aire fresco (es decir, con el aire fresco de cara) podrían tener dificultadas por la presencia de dichos humos calientes avanzando hacia el mismo lado que ellos intentan escapar. Ese fenómeno de retroceso de los humos es conocido como efecto "backlayering".



**Túnel en pendiente, sentidos de tráfico de ventilación descendente. Sin retroceso de humos  
(Velocidad del aire en el túnel igual a la velocidad crítica). (Kawabata y otros. 1991)**

Si se trata de un túnel unidireccional con ventilación longitudinal, típico de autovías o autopistas, con la corriente de aire en el mismo sentido que el de avance de los vehículos, los vehículos que se encuentren antes del foco de fuego quedarán bloqueados por el propio fuego, mientras que los que se encuentren por delante podrán continuar la marcha y salir al exterior, y, en el caso deseable para un túnel unidireccional, los humos impulsados por los aceleradores lo harán igualmente por esa misma boca.

Si existe congestión de tráfico, el supuesto de que los vehículos que estén situados por delante del origen del fuego salgan del túnel sin mayores complicaciones podrá no ser cierto, pues permanecerán también bloqueados por la propia congestión del tráfico.

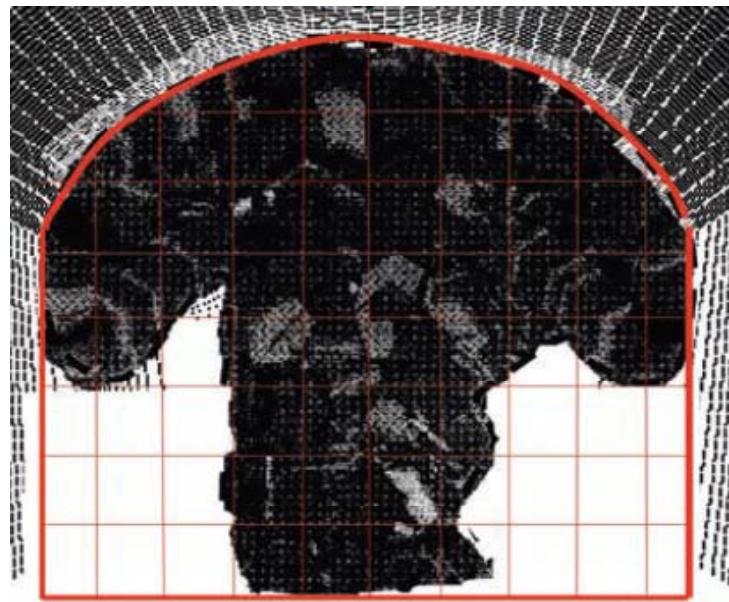
Incluso suponiendo que se mantiene una estratificación, los humos calientes tenderán a propagarse en ambos sentidos desde el foco, salvo que exista suficiente corriente de aire favorable (natural o forzada por la ventilación) que empuje los humos hacia la salida y evite ese retroceso (“backlayering”).

Tal estratificación puede durar unos ≈15 min, dando tiempo a que los usuarios abandonen el túnel por las salidas de emergencia (o escapando por las bocas) con el túnel aún con visibilidad y con el aire aún fresco por no haberse mezclado con los humos que progresan por la parte superior de la sección del túnel.

Si además hay extracción de humos, y si la velocidad del aire se controla, dicha duración de la estratificación puede ser significativamente mayor. Por esa razón los cálculos de la ventilación, así como las estrategias de ventilación asociadas son de lo más importante.

La zona de extracción de humos (bien por medio de los exutorios empleados en ventilación transversal o semitransversal, bien por pozos, etc.) debe hacerse tan cerca como sea posible del punto donde se produce el fuego y extrayendo todos los humos que se generen.

La velocidad del aire en el túnel que deberá asegurarse con el propósito de evitar el retroceso de humos.



**Zonas no afectadas directamente por la corriente de aire fresco. (Tetzner, D.;Pollak; Sippel, M.1999)**

#### 2.1.5 Antecedentes de accidentes en túnel [Romana, 2011][WRA]

En los últimos 20 años el número de accidentes en túneles ha aumentado de manera significativa, muchos de ellos motivados por falta de protocolo y ausencia de instalaciones adecuadas (muchos de los túneles de las principales arterias europeas de transporte están anticuados y son necesarias reformas). Así pues, el estudio de estas situaciones puede ayudar a la extracción de conclusiones que ayuden a una mayor protección del usuario durante la evacuación, así como a un menor recuento de daños en las instalaciones.

Año	Lugar	País	Tipo de túnel	Muertos	Heridos
1971	Vranduk	Bosnia	Carretera	34	Sin datos
1972	Fukui	Japón	Ferrocarril	29	Sin datos
1979	Nihonzaka	Japón	Carretera	7	2
1987	Londres	Reino Unido	Metro	31	150
1995	Baku	Azerbaiyán	Metro	289	256
1999	Mont Blanc	Francia /Italia	Carretera	39	34
1999	Tauern	Austria	Autopista	12	49
2000	Kaprun	Austria	Funicular	155	ninguno
2001	San Gotardo	Suiza	Carretera	11	19
2003	Daegu	Corea del Sur	Metro	130	140
2006	Viamala	Suiza	Carretera	9	Sin datos

### 2.1.5.1 TÚNEL DE TAUERN (1999)

*Procedimientos:*

La ventilación se regulaba:

- Normal:
  - Por mediciones de CO
- De incendio:
  - Corte automático de impulsión en la sección del incendio.
  - Activación automática al 100% de extracción en la sección del incendio.

*Equipamiento de intervención:*

- Ningún destacamento privado de rescate.
- Servicios comunitarios de bomberos en cada boca.
- Varios jefes y bomberos de los servicios comunitarios forman parte del personal de mantenimiento de la explotación.

*¿Qué ocurrió?*

El túnel tiene un tramo en obras, el conductor de un vehículo pesado no ve vehículos parados y colisiona con 4 turismos, se declara un incendio. El primer aviso es la alarma del sistema de detección de incendios, otros avisos activados por alarmas de personas en nichos. El accidente ocurre cerca de la boca norte del túnel.

*¿Cómo se actuó?*

- Se cierran los semáforos de manera manual.
- Se alerta a los servicios de emergencia de ambos lados del túnel.
- Se cambia de manera automática la ventilación a modo incendio.

*Resultados*

Se consigue la estratificación de humos y que por la boca norte del túnel no salga humo durante 20 minutos, a los 50 minutos de haberse dado la alarma el servicio de emergencias rescata a 3 personas de un nicho a 700 metros del incendio.

### *¿Cómo actuaron los usuarios?*

- No utilizaron extintores debido a la rápida propagación del fuego.
- Los conductores de los vehículos más cercanos al fuego huyeron.
- Dos personas permanecieron en sus vehículos y perecieron.
- Una persona huyó, volvió a por unos documentos y pereció.
- Una persona huyó en dirección sur y pereció a los 800 metros.
- 80 personas huyeron a pie o en vehículo.
- 3 personas se refugiaron en un nicho a los 700 metros y fueron rescatados a los 50 minutos por los servicios de emergencias.

### *Balance*

12 víctimas

- 8 en la colisión
- 4 durante el incendio

49 heridos leves

40 vehículos incendiados

- 16 camiones
- 24 vehículos ligeros

Graves daños en la bóveda a lo largo de 500 m

Daños intermedios en la calzada a lo largo de 300 m

### *Problemas*

Los errores que se cometieron fueron humanos, el procedimiento de emergencia actuó como debía y las muertes podrían haberse evitado si la concienciación de las víctimas sobre incendios en túneles hubiese sido mayor.

## 2.1.5.2 TÚNEL DE MONTBLANC (1999)

### *Procedimientos:*

La ventilación se regulaba:

- Normal:
  - Por mediciones de CO
- De incendio:
  - Activación impulsión al 100%
  - Activación extracción al 100% a ser posible concentrada en la zona de incendio.

### *Equipamiento de intervención:*

- 1 equipo de rescate permanente (1 bombero + 1 motorista) en el lado francés.
- Empleados entrenados de la explotación (6 personas).
- Vehículo pel - 2.000 l. Agua, extintores, ERAs, Camión cisterna 6001. Agua y ambulancia' (boca francesa).
- Vehículo multiuso contra incendio, uso transporte en accidente (boca italiana).

### *¿Qué ocurrió?*

En el túnel entró un camión, compuesto por tractor y remolque refrigerado, con 9 Tm. de margarina y 12 Tm. de harina y unos 550 litros de gasoil en el depósito de combustible, entra en el túnel por el lado francés. El vehículo desprende humo blanco que no es percibido ni por el operario del peaje ni por el conductor.

Salta la alarma del opacímetro en un tramo del túnel, el operario francés se percata de que hay humo en el túnel.

El camión pasa a lado italiano, la alarma del opacímetro de ese tramo esta desconectada porque a veces saltaba sin motivo.

El camión se detiene bloqueando el paso y el conductor huye en dirección al lado italiano.

Un usuario llama desde un puesto de SOS

Salta una alarma de incendios

Se cierra el túnel

### *¿Cómo se actuó?*

- Lado francés: Se aplicó procedimiento de emergencia
  - Impulsión al 100%
  - Extracción al 100%
- Lado italiano: NO se aplica procedimiento de emergencia
  - Impulsión al 100%
  - El conducto reversible se mantuvo en modo impulsión, para permitir a los usuarios que se dirigían a pie a la boca italiana.

### *Resultados*

Como no se aplicó el procedimiento de emergencia en ambos lados no se consiguió la estratificación, el humo salió por la boca francesa.

### *¿Cómo actuaron los usuarios?*

- Los usuarios entraron en el túnel una vez cerrado.
- Se alerta a los servicios de emergencias con un cierto retraso.
- 8 conductores se refugian en un nicho, son rescatados.
- 2 conductores intentan huir a pie al lado francés, fallecen a los 200 m
- 4 conductores intentan huir a Francia y fallecen
- La mayoría permanece dentro o cerca de sus vehículos.

### *Balances*

39 víctimas

- 29 en vehículo
- 2 en un refugio
- 7 intentando huir

49 heridos leves

40 vehículos incendiados

- 16 camiones
- 24 vehículos ligeros

Graves daños en la bóveda a lo largo de 900 m

Daños importantes en calzada y losas

### *Problemas*

Dos empresas distintas para cada lado del túnel (difícil de coordinar)

Se aviso tarde a los servicios de emergencia

El humo era tóxico

Los usuarios no hicieron caso de los semáforos

Los servicios de emergencia eran pocos y no tenían experiencia

### 2.1.5.3 TÚNEL DE SAN GOTARDO (2001)

*Procedimientos:*

La ventilación se regulaba:

- Normal:
  - Por mediciones de CO
- De incendio:
  - Corte automático de impulsión en la sección del incendio.
  - Activación automática al 100% de extracción en la sección del incendio.

*¿Qué ocurrió?*

Colisión entre dos camiones viajando en dirección contraria, tras el derrame de gasoil de uno de los camiones se produce una explosión. A los 4 minutos del choque los dos camiones estaban ardiendo.

*Balance*

23 vehículos ardieron totalmente (13 camiones + 10 turismos), se alcanzó una potencia de fuego de entre 120 a 200 MW.

30 a 35 personas escaparon por las galerías de evacuación.

Hubo 11 víctimas (5 en sus vehículos, 3 después de caminar 200 m. y 3 a distancias entre 300 a 600 m del incendio que no utilizaron las salidas de emergencia).

### 2.1.5.4 Comentarios en forma de conclusiones

Estadísticamente los túneles son muy seguros (1 incendio cada 4 millones de vehículos por km)  
Las principales causas de incendio son:

- Accidente de tráfico
- Averías de vehículos
- Abandono o avería de instalaciones
- Trabajos en instalaciones
- Incendios intencionados

Las muertes y daños son provocadas por un encadenamiento de sucesos, actuaciones deficientes del personal involucrado, instalaciones averiadas o inadecuadas y el hecho de que las víctimas no hayan sabido reconocer el peligro y alcance de la situación.

La educación y el entrenamiento de personas (tanto conductores como personal del propio túnel así como personal de emergencia – bomberos y policías) es una asignatura pendiente.

La falta de mantenimiento y actualización por parte de algunas administraciones de la seguridad en túneles.

A su vez se detecta la falta de regulación nacional e internacional referente a seguridad en túneles y de lo que deriva en los estados de muchos de los túneles de estos momentos.

#### 2.1.6 Problemas de la intervención externa en caso de incendio

[<http://www.slideshare.net/cadersl/intervencion-tuneles>]

Como consecuencia de los accidentes de los últimos años en toda Europa se ha detectado una serie de problemas relacionados con la intervención de los equipos de emergencia:

- Espacios aislados
- Existen pocos puntos de acceso
- Limitaciones en la evacuación
- Dificultades de penetración
- Grandes longitudes de penetración
- Limitaciones del ERA (equipo de respiración autónoma)
- Penosidad de los trabajos
- Demoras en el tiempo de intervención
- Elevada densidad del tráfico
- Gran cantidad de víctimas
- Numerosos obstáculos en el avance
- Colapso circulatorio que dificulta la aproximación

#### Limitaciones en la ventilación

- Presencia de gases tóxicos
- Incremento de temperatura
- Reducción de la visibilidad

#### Aislamiento térmico

- Elevadas temperaturas
- Dificultad para el ataque directo
- Colapso del revestimiento

#### Dificultades en las comunicaciones

- Descoordinación de intervenientes
- Fallos de información
- Descontrol del riesgo

#### Comportamiento de fluidos peligrosos

- Fuga o derrame de una MMPP (materias peligrosas)

#### Efecto psicológico

Como resultado de la reducida visibilidad, las largas distancias y escasos accesos; se produce en los intervenientes y especialmente en el público, un efecto psicológico negativo que puede conducir a comportamientos impredecibles.

### 2.1.7 Problemática específica referente a los cuerpos de bomberos

#### Falta de experiencia

- Pocos siniestros
- Escasa información
- Dificultades para simulacros

#### Falta de equipamiento específico

- Vehículos adaptados
- Protección respiratoria
- Ventiladores de gran caudal
- Otros equipos (camillas, etc)

Problemática de la comunicación en situaciones de emergencia.

- La comunicación es de importancia vital para la correcta gestión de las situaciones críticas y catastróficas.

Necesidad de discriminar las distintas situaciones de emergencia

- La catástrofe
  - Una catástrofe mal gestionada puede derivar en crisis.
- La crisis
  - Una crisis mal resuelta puede tener efectos catastróficos.

### 2.1.8 Consecuencias estructurales de un incendio



Daños en un túnel después del incendio de una tuneladora



Daños en el túnel del Mont Blanc después del incendio



Daños en el túnel del Negrón



Daños en el túnel de Kaprun



Elementos caídos en el túnel de San Gotardo después del incendio



Incendio en un túnel

## *2.2 Congestión*

Las congestiones incrementan la posibilidad de incidentes

En caso de incendio lidiar con el fuego y la evacuación de las personas de un túnel es mucho más difícil cuantas más personas y cuantos más vehículos haya dentro del túnel.

Para evitar la congestión en túneles hay señales que indican la distancia mínima de seguridad, pero la experiencia demuestra que es casi imposible que los conductores mantengan esta distancia en caso de congestión.

La congestión en un túnel es si cabe más estresante que una congestión al aire abierto.

## *2.3 Vehículo roto*

Cuando su vehículo se rompe la gente tiende a actuar dentro de un túnel de la misma manera que fuera de él, apartándolo del carril donde estén, y pegarlo a un lado (ya sea sobre el arcén, sobre carriles de emergencia, o en algún sitio donde consideran que molestan menos), el problema es que la gran mayoría de túneles no tienen carril de emergencia por lo que la gente bloquea el tráfico (congestión), o mucho peor bloquea la entrada a una salida de emergencia, nicho o boca de incendios.

#### 4. Bibliografía

[Esparza, 2002] Esparza, F.; **Manual de Extinción de Incendios.** Capítulo “Combustibles líquidos, sólidos y gaseosos”. [http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/combustibles.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/combustibles.pdf), 2002.

[Hacar, 2012] Hacar, F.; **Incendios en túneles de carretera: Velocidad crítica y ensayos de incendio.** <http://www.obrasurbanas.es/index.php/articulos-tuneles/624-incendios-en-tuneles-de-carretera-velocidad-critica-y-ensayos-de-incendio>, 2012.

[Orta, 2002] Orta, C.; **Manual de Extinción de Incendios.** Capítulo “Incendios en túneles”. [http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/tuneles.pdf](http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/tuneles.pdf), 2002.

[Romana, 2011] Romana, M.; **Incendios en túneles. Una visión de conjunto.** Jornada Técnica “Fuego en túneles”. <http://www.etcg.upc.edu/docencia/aula-paymacotas/foc-en-tunels/fuego.pdf>, 2011.

[WRA] Lessons learned from recent tunnel fires. World Road Association.  
<http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/1/49,2006-05.16.B-Chap-3.pdf>





**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 2/11 Señalética y normativa

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

El conjunto de temas relacionados con este bloque podría constar de los siguientes apartados

- Concepto de señal
- Segmentación
- En función del canal
- En función de la aplicación
  - Significado propio/complementario
  - Criterios de aceptabilidad
  - Consideraciones de diseño
  - Estudio de tecnologías y materiales

De todo ello, los aspectos que considero relevantes para este TFG son los siguientes

## ÍNDICE

---

- 1. Definiciones generales**
- 2. Segmentación**
  - 2.1. En función del canal**
  - 2.2. En función de la aplicación**
- 3. Consideraciones de diseño**
- 4. Estudio de recursos tecnológicos y materiales de señales luminosas**
  - 4.1. Tipos de iluminación en señalética**
  - 4.2. Tecnología LED**
  - 4.3. Tecnología de electrónica impresa**
  - 4.4. Materiales fotoactivos o fotoluminiscentes**
- 5. Comentarios a modo de conclusiones**
- 6. Normativa**
- 7. Bibliografía**

## 1 Definiciones generales

Una señal es un signo, un gesto u otro tipo de interacción que permite informar o avisar algo. La señal sustituye, por tanto, a la palabra escrita o al lenguaje. Obedecen a convenciones, por lo que son fácilmente interpretadas.

Las primeras señales en carreteras eran montones de piedras a los lados de los caminos. Posteriormente fueron sustituidas por pilones de piedra. La siguiente evolución surgió con los postes de madera, que indicaban distintas direcciones y estos postes, asimismo, fueron sustituidos por las señales metálicas de hoy en día (ver figura 1).

Dichas señales metálicas están actualmente evolucionando a señales luminosas, que mejoran la visibilidad y, en última instancia, la seguridad vial.



Figura 1. Evolución histórica de las señales

Cuando se trata de símbolos, las señales se colocarán en lugares visibles y están realizadas normalmente en colores y formas acordes a dichas convenciones.

En el caso de los gestos, usualmente se contemplan los realizados mediante las manos y los brazos. También hay indicaciones consistentes en banderas, utilizadas sobre todo en la navegación marítima, y señales luminosas, como las de los faros en las costas.

## 2 Segmentación

### 2.1 En función del canal

Podemos distinguir los siguientes tipos de señales, en función del canal por el que son transmitidas, concretando ejemplos relacionadas con la circulación vial y peatonal:

## Señal luminosa

Señal emitida por medio de un dispositivo formado por materiales transparentes o translúcidos, iluminados desde atrás o desde el interior de tal manera que aparezca por si misma como una superficie luminosa.

### Tipos

Señales de tránsito variable

Semáforos

Balizas (señalización/tráfico rodado, túnel y balizas solares)

Paneles electrónicos, información, marcadores, parking

Paneles LED

Señalización ferroviaria

Señalización de escaleras

## Señal acústica

Señal sonora codificada, emitida y difundida por medio de un dispositivo apropiado sin intervención de voz humana o sintética.

### Tipos

Bocinas

Sirenas

Pitos

Campanillas

## Señal haptica

Señal que utiliza métodos de comunicación táctiles. La dificultad de esta señal reside en la dificultad de dar feedback al usuario en una situación de emergencia

### Tipos

Texturas en las aceras peatonales

## 2.2 En función de la aplicación [según ISO 3864-1]

### Evacuación: Ejemplo imagen E001 (ver figura 2)

Rutas de evacuación, localización de equipamiento o recinto y acciones de seguridad.

- *Sintáctica general*

Las señales pertenecientes a esta categoría son cuadradas o rectangulares y utilizan los colores verde, usualmente utilizado para el fondo, y blanco, para los símbolos implementados.

- *Aclaraciones semánticas*

En muchas de estas señales se observa el uso de cruces. Según normativa ISO, dicha cruz podrá ser adaptada según requisitos culturales.

### Equipamiento contra el fuego: Ejemplo imagen F002 (ver figura 2)

- *Sintáctica general*

Las señales que nos encontramos en esta categoría son cuadradas y utilizan los colores rojo, para el fondo y blanco, para el símbolo.

### Obligación: Ejemplo imagen M003 (ver figura 2)

- *Sintáctica general*

Este tipo de señales tendrán una volumetría circular y se utilizarán los colores azul, para el fondo, y blanco, para los símbolos.

### Prohibición: Ejemplo imagen P001 (ver figura 2)

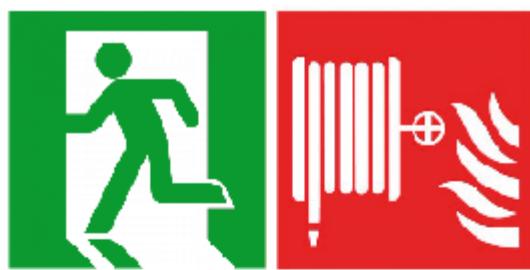
- *Sintáctica general*

Estas señales dispondrán de una volumetría circular, bordeada con una circunferencia además de una banda diagonal que expresará la exhortación prohibitiva.

### Precaución: Ejemplo imagen W003 (ver figura 2)

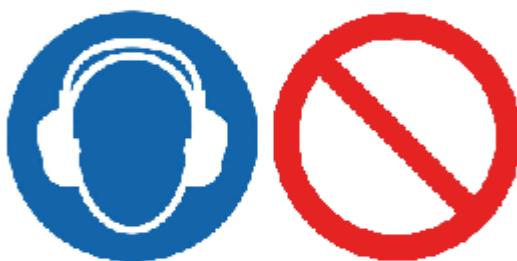
- *Sintáctica general*

Se trata de señales triangulares cuyos colores son negro, tanto para el bordeado como para el símbolo utilizado, y amarillo, para el fondo.



Señal ISO E001. Salida de emergencia.

Señal ISO F002. Manguera contra Incendio.



Señal ISO M003. Llevar protección auditiva.

Señal ISO P001. Prohibición.



Señal ISO W003. Precaución, material radioactivo o radiación ionizada.

Figura2

### **3 Consideraciones de diseño [ISO 3864-1, 3864-3, 3864-4]**

Dentro de la normativa ISO encontramos principios de diseño para la elaboración de señalética que, si bien no es aplicable a carreteras (puesto que puede diferir de las normas estatutarias del país) sí que pueden servir como una útil referencia respecto de los aspectos básicos.

- **Significado:**

Cuando un símbolo gráfico no está disponible para indicar el significado deseado, el significado debe obtenerse mediante el uso preferente de la señal general apropiada junto a una señal suplementaria.

- **Borde de contraste:**

Los bordes son recomendables para conseguir el contraste entre la señal y el contexto circundante. El valor del borde es entre 0.025-0.05.

- Prohibición: El color de seguridad debe cubrir al menos 35% del área total de la señal.
- Obligación: El color azul debe cubrir al menos un 50% del área de la señal.
- Precaución: El color azul debe cubrir al menos un 50% del área total.
- Evacuación: El color azul debe cubrir al menos un 50% del área total.

- **Señales múltiples:**

El texto deberá ir situado en una señal suplementaria separada o incluida como parte de la combinación de la señal. Esta deberá utilizar el mismo color de seguridad de la señal principal o blanco y para el texto/símbolo deberá utilizarse un color que contraste.

En señales múltiples, el orden de las señales de seguridad (y/o sus señales suplementarias correspondientes) deben estar organizados de acuerdo a la importancia de los contenidos.

Un símbolo gráfico, con una señal suplementaria y una flecha direccional pueden ser combinados para proveer un mensaje direccional de seguridad comprensiva. Las flechas pueden ir situadas encima, debajo o a los lados de la señal.

- Relación entre las dimensiones de las señales y la distancia de observación:

La relación entre la mayor distancia desde la cual la señal es legible y sobresaliente en forma y color, y la altura de la señal es dada por la fórmula:

$$h = L / Z$$

Donde:

- L es la distancia de observación
- h es la altura de la señal
- Z es el factor de distancia ( $1 / \tan \alpha$ ) de la extensión angular de la señal.

El factor Z dependerá de la altura de la señal, la dimensión de los detalles críticos, la luminancia de la señal y su contraste respecto del fondo.

El ratio r es el cociente entre la altura de la señal y el tamaño de los detalles críticos y debe ser menor o igual a 15. Si es mayor, el valor de Z deberá corregirse por factor multiplicador ( $15/r$ ).

Bajo esta condición geométrica, el factor de distancia Z sin corregir, válido para señales iluminadas debe ser 100 si la luz incidente de la superficie de la señal es más de 50 lx y, preferentemente más de 80 lx.

Las señales de salida iluminadas y señales de rutas de escape direccional con luminancia promedio del color de contraste mayor de  $500 \text{ cd/m}^2$  debe doblar el factor de distancia y, por lo tanto, la distancia de observación.

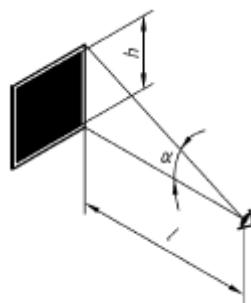


Figura 3. Relación entre la dimensión de la señal y su distancia de observación

También debe ser suficientemente llamativo en contextos brillantes.

En contextos oscuros, la luminancia debe reducirse para evitar reflejos o alteración.

- **Materiales:**

Los materiales siguientes no son considerados adecuados para su uso en señales:

- Materiales retroreflectantes si, mientras su uso, los valores fotométricos de la retroreflectancia del material cae por debajo del 50% de los mínimos requeridos o si las coordenadas cromáticas caen fuera de los límites de las áreas dadas en la tabla 2.
- Materiales fluorescentes si, mientras su uso, las coordenadas cromáticas caen fuera de los límites dados en la tabla 2.

- Antes de diseñar un símbolo gráfico, el diseñador debe:

- Desarrollar una descripción clara y objetiva del riesgo.
- Confirmar que un símbolo gráfico nuevo es necesario.
- Identificar el mensaje de seguridad que la señal debe comunicar.
- Definir las características del público objetivo, incluyendo sus aptitudes y habilidades para comprender la información y diseñar el símbolo para ese grupo.
- Asignar un significado y una función a la señal.
- Identificar el tipo de señal requerida.

- El diseñador debe determinar:

- Si hay señal en ISO 7010
- Si no la hay en ISO 7010, buscar si la hay en otras normativas. Si símbolos con significados similares pueden adaptarse o combinarse para la nueva señal.
- Si hay determinantes (aquellos grafismos que son imprescindibles para comprender el símbolo completo) estandarizados para usar con el símbolo.

En caso de que elementos gráficos específicos sean utilizados de símbolos existentes, deberían utilizarse con el mismo significado que posee en el símbolo existente.

- Criterios de diseño:

El símbolo gráfico debe ocupar el máximo área posible y estar centrado. También deberá respetar el área de distancia entre el símbolo y el borde de la señal, situado entre un borde desfasado y el borde normal.

- En prohibición: anchura igual a  $0.033 \times$  diámetro exterior de la señal.
- En obligación: anchura igual a  $0.08x$  diámetro exterior.
- Precaución: anchura igual a  $0.033x$  altura de la señal.
- Evacuación: anchura igual a  $0.08x$  altura del cuadrado.

- Anchura de las líneas:

Mínimo 1 mm excepto cuando es absolutamente necesario una anchura menor. En dicho caso, la anchura mínima puede ser reducida a 0.5 mm.

- Detalles críticos:

Las dimensiones mínimas de los detalles críticos deben ser 1 mm de anchura x 2.5 mm de longitud excepto cuando es necesario que las líneas sean más finas, donde se deberá respetar las dimensiones 0.5 mm de anchura x 5 mm de longitud.

Asimismo, un detalle crítico no debe estar localizado en el área oculta por la raya diagonal en el signo de prohibición.

- Determinantes:

El uso de elemento común a lo largo de una familia de señales puede conseguir una unión básica entre los significados, mejorándose su comprensión (ejemplo de las llamas en las señales de fuego).

Los determinantes deben utilizarse sin modificaciones.

El nuevo símbolo debe utilizar el menor número de componentes posible, y debe ser claro.

- Contenido:

Letras, números, marcas de puntuación y símbolos matemáticos como parte del símbolo gráfico no deben ser usados (la única excepción es el uso de la marca de exclamación de la señal de advertencia general).

Cuando hablamos de un símbolo en general este debe:

- Ser simple
- Tener un significado asociado al mensaje
- Estar basado en objetos, conceptos, actividades, etc, o en una combinación de estos, los cuales sean familiares para el público objetivo.
- Ser fácilmente distinguibles
- Solo añadir aquellos detalles que contribuyen a su entendimiento.

Si la interacción humana es parte del mensaje, es preferible representar el elemento humano en el símbolo. Por ello, cuando se diseñen figuras humanas, se debe considerar la posición de los elementos constituyentes en relación a lo siguiente:

- La naturaleza del riesgo.
- La dirección desde la cual proviene el riesgo y su orientación.
- Movimientos o posiciones resultantes tras la interacción con el riesgo.
- Tipo de daño causado por el riesgo.
- Movimientos de las posiciones implicadas en la acción u operación.
- Además, se deberá evitar la representación de sangre.
- Las figuras humanas se establecen en base a una figura normalizada, disponible en la norma, y articulada con la que se puede diseñar todas las posiciones derivadas de una acción.
- La cabeza no deberá llevar ningún elemento étnico.

## 4 Estudio de recursos tecnológicos y materiales de señales luminosas

### 4.1 Tipos de iluminación en señalética

El siguiente paso en la evolución de las señales consiste en su iluminación. En el caso de las señales de tráfico, el uso de tecnología LED es el mecanismo más extendido y también el más útil, sin embargo, la electroluminiscencia y la retroiluminación también son utilizados.

Esta evolución se ha visto sobre todo en los semáforos, por ejemplo, ahora es casi imposible ver uno que no use LEDs.

Sin embargo, hay pocos sitios en España que utilicen este tipo de señales (a excepción de los semáforos), siendo pionero el ayuntamiento de Bilbao (figura 4) que utiliza tecnología LED o tecnología electroluminiscente. En ambos casos es necesaria una toma de corriente, aunque también es posible el uso de paneles solares.



Figura 4

Las características formales de este tipo de señales son exactamente las mismas que sus equivalentes sin luz o sonido, pero funcionalmente son sustancialmente mejores, puesto que mejoran la visibilidad y, con ello, transmiten mejor el mensaje.

En cuanto al sector de la iluminación, podremos ver una serie de empresas potenciales que implementan dichas tecnologías, como Ceprenor, Implaser, Jalite, LightLed, One 2 see, Luminous Media y signature Ltd. Estas empresas son líderes en cuanto a la amplitud de la cartera de productos.

Las siguientes características que se pueden encontrar en el párrafo siguiente se han extraído de la información disponible en las webs, catálogos y fichas técnicas de dichas empresas.

Por último, podemos observar las características definitorias de las tecnologías nombradas:

#### Señales electroluminiscentes

- Reducen el consumo de energía hasta en un 70%
- Durabilidad de hasta 10 años sin mantenimiento
- Visibilidad perfecta en entornos oscuros
- Gran contraste
- No falla de manera catastrófica (no se funde, no se puede romper) y se desgasta de manera paulatina
- Gran flexibilidad en cuanto a forma

#### Señales iluminadas con LEDs

- Uso de ciertos materiales retro – reflectantes concretos (Avery 6600T o 3M 4090T)
- Las características de visibilidad de los materiales están regulados por normativa
- Resistentes a los daños climatológicos
- Resistentes al vandalismo (cubierta de policarbonato)
- Trabajan con voltajes de entre 50 – 150v RMS
- Trabajan en temperaturas de entre - 10°C a + 25°C
- Cuerpo de aluminio, recubrimiento de poliéster
- Pueden equiparse con un CMS (content management system) y configurar de manera automática para que se enciendan o se apaguen, o lo que muestren sea configurable.
- Ajustable a cualquier montura o cuerpo del mercado
- Pueden funcionar con paneles solares
- Una placa de 600 mm de diámetro usa 5.4 W
- Pueden trabajar con ELV (extra low voltaje) 12 V, 24 V, 48 V.
- Métodos de activación: Radar, peso, sensores varios (de inundación, fuego, humo...), altura e “induction loops”.

#### Señales retroiluminadas

Las señales retroiluminadas son usadas en los paneles de publicidad. Consisten en una fina capa de tinta iluminada por la parte trasera mediante los dispositivos habituales de iluminación (LEDs, fluorescentes, etc), por lo que sus características vienen dadas por el tipo de iluminación usado.

#### 4.2 Tecnología LED [<http://www.menoswarios.com/tipos-de-led.html>]

A continuación vamos a hablar de los tipos de LEDs que existen en el mercado y sus características.

##### LED común

Se usan en la mayoría de electrodomésticos ya sea como emisor o receptor de infrarrojos o como pilotos luminosos, actualmente se están utilizando para señalización vial (señales, semáforos, etc)

##### LED SMD

- Se trata de un LED encapsulado en una resina semirígida y que se ensambla de manera superficial, tiene ciertas características interesantes:
- Su encapsulado permite una gran superficie semiconductor, lo que proporciona una gran cantidad de luz mejorando la calidad del LED.
- Una forma de instalación es colocarlos en serie sobre algún circuito impreso (montaje superficial o SMD) para crear una luminaria o bombilla. Aunque se dañe alguno de estos LEDs, cuentan con un dispositivo que los suplen para que los demás sigan funcionando a pleno rendimiento.
- Permiten una amplia variedad de colores, según el material semiconductor que se utilice en su fabricación.
- El índice de reproducción cromática (CRI) es alto, de hasta el 80%. Esto quiere decir que se reproducen los colores fielmente.
- Al no tener filamento, son resistentes a los golpes, y es relativamente complicado que se averíen. El tiempo de vida estimado de un LED SMD ronda las 50000 horas o lo que es lo mismo, casi 6 años funcionando las 24 horas del día.
- No generan calor
- El nombre LED SMD suele ir acompañado de las medidas del encapsulado. De esta manera, los que más se han estandarizado (hablamos siempre de iluminación) son el SMD 3528 y SMD 5050.

## LED COB

Corresponde a las siglas “Chip on board” (chip en la placa), en el cual se han insertado multitud de LEDs en un mismo encapsulado.

Tiene ciertas características importantes:

- Proporcionan más rendimiento lumínico que los SMD, esto quiere decir que con la misma potencia y tamaño, el LED COB aporta más luz que el SMD.
- Al proporcionarnos más luz, no necesitamos concentrar tanto el haz de luz para conseguir suficiente intensidad lumínica. De esta manera, hay muchos productos con este tipo de LED que emiten con un ángulo de apertura de hasta 160º.
- El LED COB tiene un mayor IRC (índice de reproducción cromática) que el SMD, por lo que conseguiremos una luz de mayor calidad. El IRC es mayor que 90.

## OLED [TPE, 2012]

Se basa en una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos que reaccionan a una determinada estimulación eléctrica generando y emitiendo luz por si mismas.

Ventajas:

- Más delgados y flexibles
- Más económicos
- Más brillo y contraste, los píxeles de OLED emiten luz directamente. Por eso respecto a otros LEDs posibilitan un rango más amplio de colores y contrastes.
- Menos consumo
- Mejor visión en ambientes ya iluminados.



Figura 5

#### 4.3 Tecnología de electrónica impresa [TPE, 2012]

Consiste en la fabricación de dispositivos electrónicos mediante procesos de impresión estándar (serigrafía, flexografía, huecograbado, litografía, offset e inyección de tinta), que incluyen varios componentes, como por ejemplo, transistores, diodos, antenas y otros con un conductor de tinta en la superficie del papel, cartón, plástico, etc. Por lo general, la tinta y las superficies que se van a imprimir pueden variar para proporcionar funciones determinadas.

La electrónica convencional se basa en los semiconductores inorgánicos. Estos materiales sólidos poseen una conductividad entre un material conductor y un dieléctrico.

La electrónica impresa se basa en conductores semiorgánicos, estos son compuestos orgánicos en forma de cristal o polímero. Este tipo de compuestos poseen propiedades similares a los semiconductores inorgánicos.

#### Ventajas

- Ligeros
- Flexibles: Menos frágiles que los inorgánicos
- Mucho más económicos de fabricar que los conductores inorgánicos convencionales
- Son muy fáciles de reparar o sustituir

#### Desventajas

- Tiempo de vida: La vida útil de los dispositivos orgánicos es inferior al de los tradicionales. Esto es debido a la decoloración de las moléculas orgánicas que emiten luz de color.
- Ecología: Se considera más barato y fácil desechar los dispositivos eléctricos de electrónica impresa que repararlos, lo cual plantea algunas dudas acerca del aspecto ecológico.



Figura 6

## Aplicaciones

- Diodos orgánicos (OLEDs), con los que se pueden fabricar dispositivos que compitan con los LCD actuales.
- Captación de energía fotovoltaica.
- Transistores de efecto de campo o FET.
- Ventanas inteligentes que se oscurecen cuando detectan que hay demasiada luz solar.
- Papel electrónico.
- Dispositivos de identificación de radio frecuencia (etiquetas RFID).
- Baterías.
- Dispositivos electrocrómicos.
- Músculos y nervios artificiales.
- Supercondensadores o condensadores redox.
- Membranas inteligentes.
- Electrodos y sensores.
- Antenas electrónicas.

- Chipsets.
- Películas conductoras (láminas plásticas con propiedades conductoras)
- Sistemas de identificación.
- Productos electroluminiscentes.

#### *4.4 Materiales fotoactivos o fotoluminiscentes. [<http://www.actimat.es/web/fotoycromo.asp>]*

Los materiales fotoactivos o fotoluminiscentes son aquellos capaces de responder de una manera diferenciada a ser expuestos a la luz (solar o artificial).

Los materiales utilizados para la iluminación de las señales se pueden desglosar en: fluorescentes, fosforescentes y electroluminiscentes.

##### Fluorescentes

Aquellos materiales que poseen la propiedad de emitir luz cuando son expuestos a radiaciones del tipo ultravioleta, rayos catódicos o rayos X. Las radiaciones absorbidas (invisibles al ojo humano), son transformadas en luz visible, o sea, de una longitud de onda mayor a la incidente. Su efecto cesa tan pronto como desaparece la fuente de excitación.

##### Fosforescentes

Aquellos materiales capaces de emitir luz después de haber sido excitados mediante luz (natural o artificial). Su emisión de luz continúa después de que la fuente de excitación haya cesado. Esto último es lo que los diferencia de los fluorescentes. Devuelven más intensidad de luz que la que reciben.

##### Electroluminiscentes

Aquellos materiales que al ser estimulados mediante electricidad responden produciendo luces de diferentes colores. Su emisión de luz no conlleva producción de calor.

Se aplican ya a sistemas de señalización y seguridad.

Los materiales electroluminiscentes permitirán la emisión de luz fría y su disposición en forma de film (lámparas planas) están siendo combinados en piezas plásticas mediante técnicas como IMD (In Mold Decoration) para realizar piezas 3D que emiten luz propia.

## **5 Comentarios a modo de conclusiones**

- La iluminación led es mejor porque tiene menor consumo, mayor vida útil, ocupa menos espacio y tiene más potencia lumínica.
- La potencia lumínica viene determinada por el tipo de iluminación usado. Incluso del tipo de LED (de alta luminosidad, de baja luminosidad).
- El consumo también está relacionado con el tipo de iluminación usado.
- La autonomía depende también del tipo de iluminación usado y de los materiales foto luminiscentes y de la capacidad de los mismos. La normativa UNE 23035 cataloga los tipos de material foto luminiscente en función de su autonomía y potencia lumínica.
- A mayor diversidad de zonas de posicionamiento mejor, permite ser posicionado en cualquier lugar (incluso lugares de difícil acceso o posicionamiento) lo cual mejora la visibilidad general.
- La incorporación de sensores en una gran mayoría de los productos no es posible, sin embargo es una característica muy útil que debe tenerse en cuenta.
- La posibilidad de que las señales sean foto luminiscentes también está poco explotada (aunque más que la incorporación de sensores) y también puede resultar muy importante. Es mejor añadir materiales fotoluminiscentes que añadir baterías que son más caras y aumentan la complejidad del producto.

## **6 Normativa**

Normativa consultada relacionada con señales

PNE\_199171

PNE\_199181-1

UNE\_135421-1

UNE\_135421-3

UNE\_135441-1

UNE\_135441-2

UNE\_135441-3

UNE\_135441-4

UNE\_135441-5

UNE\_135460-3

UNE\_135490-1

UNE\_199021-1

UNE\_199021-2

UNE\_199021-3

UNE\_199031-2

UNE\_199051-1

ISO\_3864-1

ISO\_3864-3

ISO\_3864-4

ISO\_7010

## **7 Bibliografía**

[TPE, 2012] **Trabajo Printed Electronics**, Asignatura de Prospección, Grado de Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto, Zaragoza, 2012.





**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 3/11 La física de la visión

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

1. Lo que vemos
2. Unidades radiométricas que caracterizan la radiación espectral
3. Sistema de visión humano (el ojo). Parte 1
4. Sistema de visión humano (el ojo). Parte 2
5. Espacios de color
  - 5.1. Espacio de color CIE 1931 XYZ
  - 5.2. Significado de las coordenadas CIE 1931 X, Y, y Z
6. Conclusión
7. Bibliografía

## 1 Lo que vemos

Lo que un observador ve, es el resultado de (figura 1):

- La radiación electromagnética que denominamos “luz”, que proviene de un emisor, que llega a un objeto donde se refleja o se transmite.
- Dicha radiación se propaga entonces hasta el ojo humano e incide en la retina.
- Una vez allí dará lugar al nacimiento de un impulso eléctrico que viaja a través de las conexiones nerviosas hasta la corteza cerebral, originando la percepción de la imagen cromática del objeto.

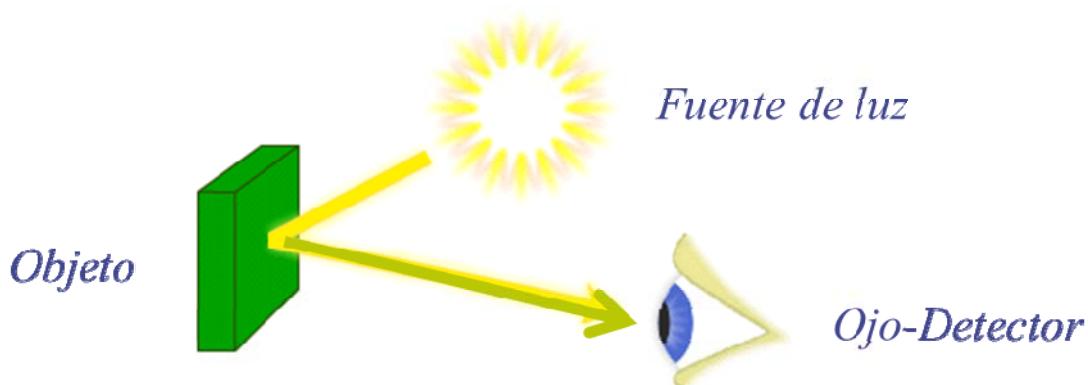


Figura 1. Proceso de visión humana

Por lo tanto, desde un punto de vista físico, en la sensación del color intervienen:

- El espectro luminoso que interactúa en el interior del ojo con los receptores sensibles a las distintas componentes espectrales de la luz (ver figura 2)

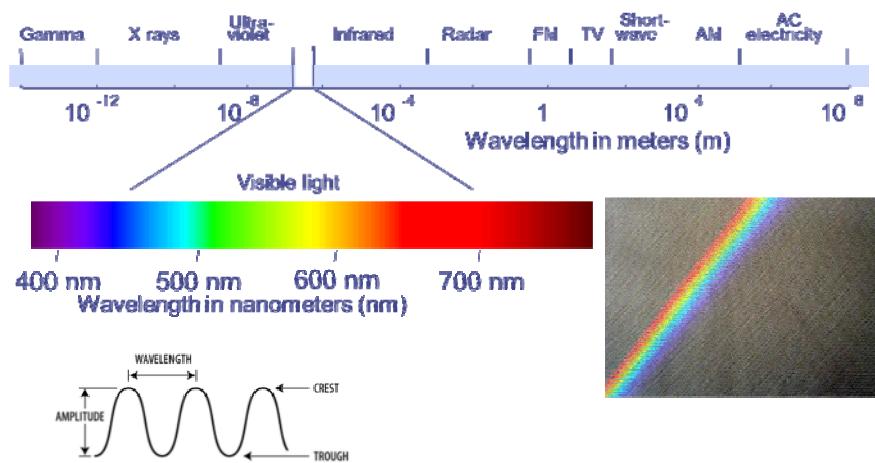


Figura 2. Espectro luminoso global y se resalta el intervalo del espectro visual

- Las características luminosas de las diferentes fuentes de luz.
  - Cualquier fuente radiante emite ondas electromagnéticas que se caracterizan por su funciónpectral  $P(\lambda)$  que describe su composiciónpectral y la distribución de intensidades a lo largo del espectro (ver figuras 3 y 4)

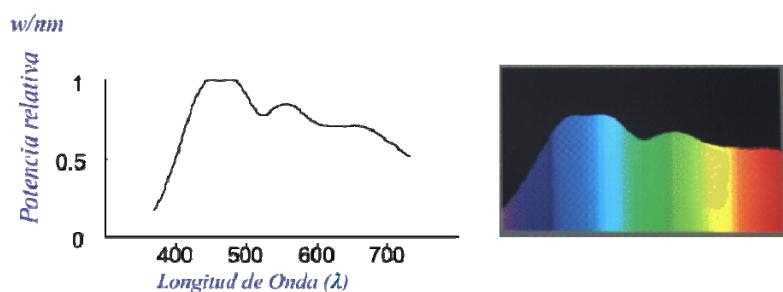
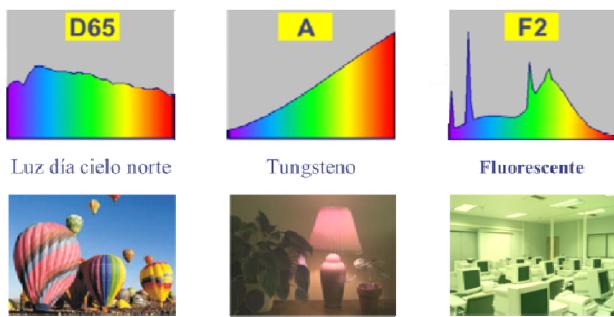


Figura 3. Ejemplo de funciónpectral de una luz

Distintos tipos de fuentes producen diferentes espectros.



¡Las cosas parecen diferentes bajo diferentes iluminaciones!

Figura 4. Diferentes fuentes de luz y su comportamiento

<http://www.abnexo.com/html/product01.asp?part=2&sno=290> (imagen editada)

- Las propiedades ópticas de los objetos que están relacionadas con la interacción de la luz con la materia son:
  - Parte de la radiación o toda puede ser reflejada, absorbida o transmitida, dependiendo de las características ópticas de los objetos, (ver figura 5)



Figura 5. Posibles interacciones de la luz con la materia

<http://teoriadelcoloryobjo.blogspot.com.es/>

- La variación del flujo radiante reflejado difusamente por el objeto, recibe el nombre de reflectancia espectral del objeto y se denota por  $R(\lambda)$ , (ver figura 6)

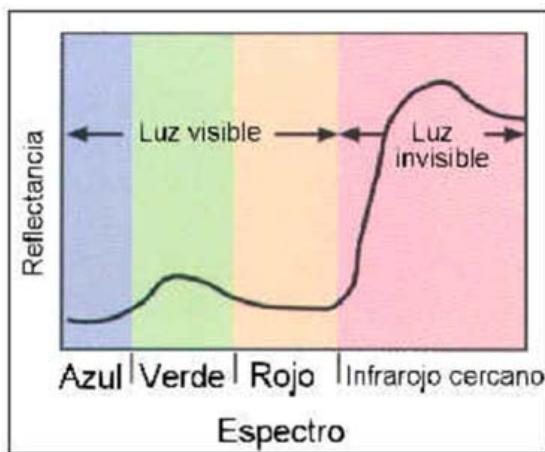


Figura 6. Ejemplo de reflectancia espectral de un objeto

<http://www.elsitioagricola.com/articulos/bragachini/VRT%20en%20Refertilizacion%20Nitrogenada.asp>

**Conclusión**, lo que ve el observador es por lo tanto  $P(\lambda) = R(\lambda) E(\lambda)$  (ver figura 7)

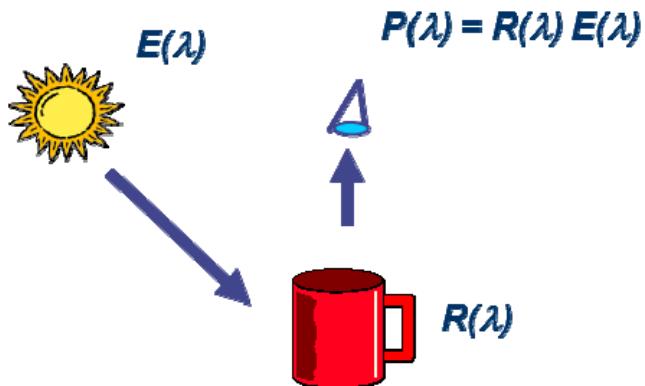


Figura 7. Lo que ve un observador

<http://www.abnexo.com/html/product01.asp?part=2&sno=290> (imagen editada)

## 2 Unidades radiométricas que caracterizan la radiación espectral

Las unidades radiométricas son aquellas que se pueden medir en un laboratorio de óptica con los dispositivos de medida adecuados. Estas magnitudes por lo tanto son objetivas.

Teniendo en cuenta que se está hablando de la física de la luz habrá que describir las principales magnitudes “radiométricas” que se van a usar en este estudio:

- Energía radiante ( $E_e$ ) Unidad básica para la luz. Se mide en julios (J)
- Potencia radiante ( $\Phi = \frac{dE_e}{dt}$ ) La cantidad de energía que fluye por unidad de tiempo. Se mide en watos (W)
- Radiancia (L), es la cantidad de potencia radiante que llega o deja un punto de la superficie de un objeto en una dirección particular. Se mide en watos por estereoradian por metro cuadrado ( $W * sr^{-1} * m^{-2}$ )

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA d\Omega \cos \theta} \approx \frac{\Phi}{\Omega A \cos \theta}$$

- Nota: La aproximación que aparece en la fórmula es válida para pequeños valores de A y valores de  $\Omega$  en los que  $\cos \theta$  puede considerarse constante.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Radiance>

### 3 Sistema de visión humano (el ojo). Parte 1

El ojo no se comporta como un dispositivo de medida de laboratorio ya que no reacciona del mismo modo a las diferentes longitudes de onda, es decir no tiene la misma eficiencia. En la figura 8 se muestra dicho comportamiento

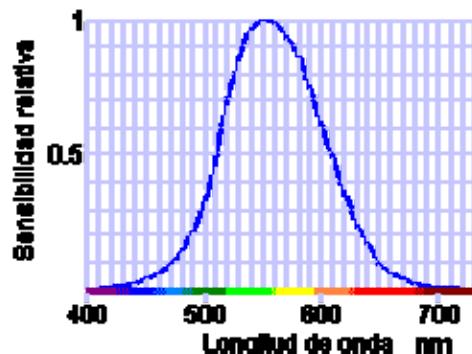


Figura 8. Curva de eficiencia espectral del ojo

Por esa razón las magnitudes que describen lo que el ojo “ve” no son las mismas que las que detectan los dispositivos de laboratorio. A ese conjunto de magnitudes se denominan “fotométricas”.

Como ya se ha indicado, la magnitud radiométrica que se va a utilizar en este proyecto es la radiancia espectral. La magnitud fotométrica equivalente se denomina luminancia espectral.

El paso de magnitudes radiométricas a fotométricas se describe en la figura 9

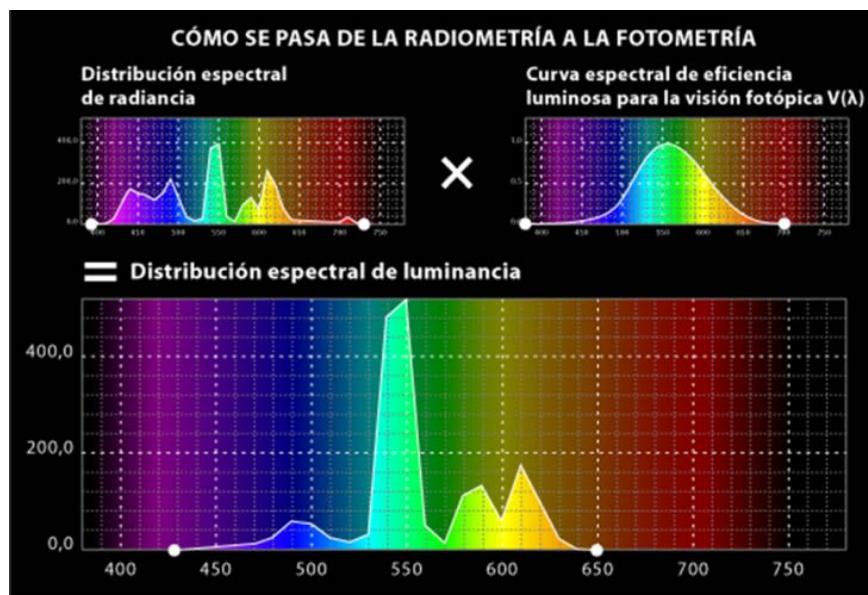


Figura 9. Paso de un espectro radiométrico a un espectro fotométrico

[http://gusgsm.com/radiometria\\_fotometria](http://gusgsm.com/radiometria_fotometria)

Si un punto de un objeto recibe una radiancia espectral como la de la figura 9, la radiancia total sería el área bajo dicha distribución.

Por lo tanto, matemáticamente la luminancia total  $L_v(\lambda)$  en un punto, que recibe una radiancia espectral  $L(\lambda)$  se puede calcular sin más que ponderar cada longitud de onda por la curva de sensibilidad del ojo  $V(\lambda)$ .

Por lo tanto, si  $L_v(\lambda)$  es la luminancia total,  $L(\lambda)$  representa la radiancia espectral y  $V(\lambda)$  simboliza la curva de sensibilidad del ojo, entonces:

$$L_v = K \int_{\text{visible}} L(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Siendo  $K = 683.002 \text{ lm/W} = 683.002 \text{ 1cd*s}/\text{W}$

Ecuación de dimensiones

- $L(\lambda)$  radiancia dimensiones  $\text{W}(\lambda)/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$
- $(\lambda) \text{ o } d(\lambda)$  dimensiones  $10^{-9} \text{ metros}$
- $V(\lambda)$  función de eficiencia del ojo, adimensional

$$L_v(\lambda) = \frac{\text{cd*s}}{\text{W}} \frac{\text{W}}{\text{sr*m}^2} = \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

La magnitud asociada a la luminancia es la candela/metro<sup>2</sup>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Luminancia>

#### 4 Sistema de visión humano (el ojo). Parte 2 [Casas, 1994]

Como se ha dicho, hay dos tipos de fotoreceptores, los conos y los bastones (ver figura 10).

- Los conos, son sensibles a los niveles de luminancia entre  $10^{-2}\text{cd/m}^2$  y  $10^8\text{cd/m}^2$  (visión fotóptica diurna) y son responsables de la percepción de patrones de frecuencia alta, movimiento rápido y colores. Hay tres tipos de conos, los conos de onda corta o conos **S** (sensibles a 435 nm), los conos de onda media o conos **M** (sensible alrededor de 530 nm) y los conos de onda larga o conos **L** (sensibles alrededor de 580 nm).
- Los bastones, alrededor de 90 millones, son sensibles a los valores de luminancia entre los  $10^{-6}\text{cd/m}^2$  y los  $10^2\text{cd/m}^2$  (visión escotóptica nocturna). Son más sensibles que los conos pero no proveen de la sensación de color visual. Esta es la razón por la cual no podemos discernir colores con un nivel de iluminación bajo.

A niveles de luz comprendidos entre  $10^{-2}\text{cd/m}^2$  y  $10\text{cd/m}^2$  los conos y los bastones están ambos activos, esto se conoce como el rango mesóptico.

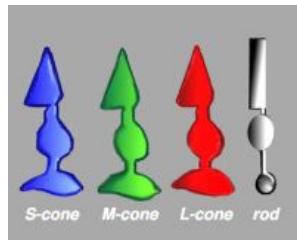


Figura 10. Conos (en color) y Bastones (en gris)

Debido a ese tipo de comportamiento, existen dos curvas de eficiencia del ojo, ver (figura 11).

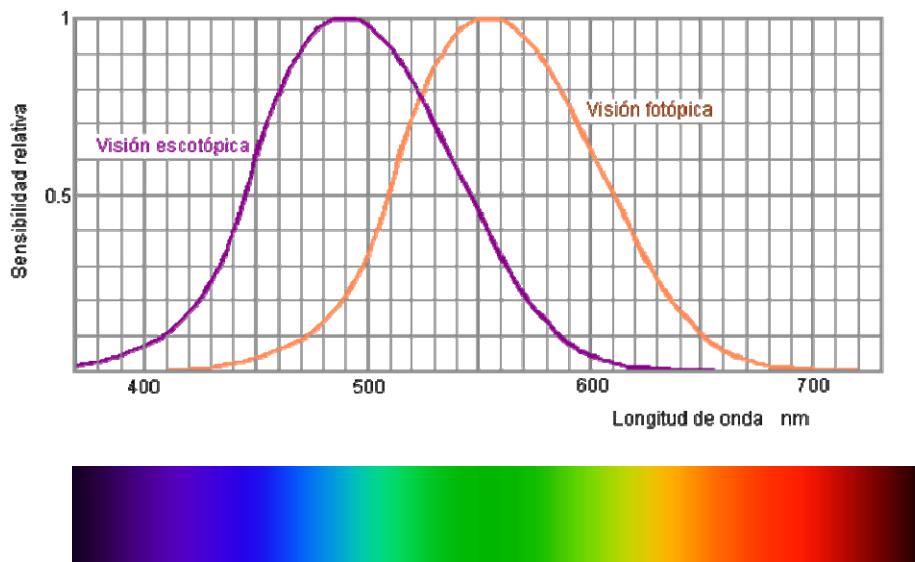


Figura 11. Representación de las curvas de sensibilidad del ojo para  
Visión nocturna (escotópica), visión diurna (fotópica)  
<http://edison.upc.edu/curs/llum/vision/proceso-visual.html>

Pasar de visión fotópica a escotópica o viceversa requiere un tiempo de adaptación.

Por último se va a comentar que la percepción de la luminosidad no es lineal con respecto a la intensidad de la fuente. Existe suficiente (o por lo menos considerable) evidencia experimental que indica que el brillo subjetivo (es decir, el brillo percibido por el sistema visual humano, ver figura 12) es una función logarítmica de la intensidad luminosa incidente en el ojo.

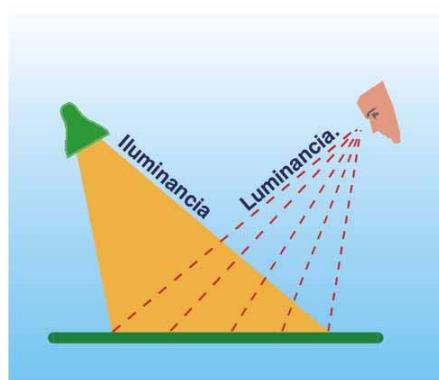


Figura 12. Representación de la Luminancia  
(equivalente psicológico del brillo de una superficie)

## 5 Espacios de color

Un espacio de color es una descripción geométrica que sirve para representar los colores, típicamente en base a tres componentes llamados colores primarios. Hay dos tipos de espacios de color: los dependientes del equipo y los no dependientes del equipo. Los primeros describen el color en relación a la tecnología usada para reproducirlo. La parte negativa de este espacio es que un mismo color con las mismas coordenadas ( $R=150$ ,  $G=40$ ,  $B=180$ ) se verá distinto cuando se represente en diferentes monitores. Por otro lado un espacio de color independiente de la tecnología no depende de las características de esta por lo que el color representado siempre se corresponderá con la misma información de color. Un espacio típico dependiente de la tecnología es el RGB de los monitores, mientras que un espacio independiente típico es el CIE 1931 XYZ.

### 5. 1 Espacio de color CIE 1931 XYZ [[http://en.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1931\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space)]

El espacio de color CIE 1931, es el nombre de uno de los primeros espacios de color independiente de dispositivo, definidos matemáticamente. Fue establecido en 1931, por la Comission Internationale de l'Éclairage (CIE), basándose en una serie de experimentos de laboratorio con seres humanos. Como resultado de dichos experimentos se definieron con precisión los tres colores primarios  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  de la síntesis aditiva de color, a partir de los cuales pueden crearse o especificarse todos los demás. En la figura 13 aparecen las curvas de color base y en la fórmula que acompaña a la figura se describe matemáticamente el significado de síntesis aditiva y coordenadas (X, Y, Z) de color.

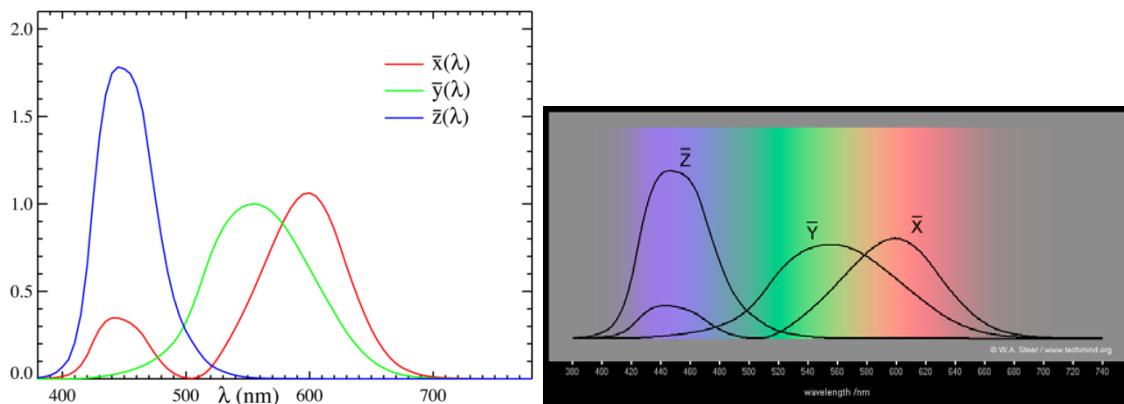


Figura 13. Curvas de color base CIE 1931 en dos presentaciones  
[http://www.pfk.ff.vu.lt/cie/1931CIE\\_explanation.htm](http://www.pfk.ff.vu.lt/cie/1931CIE_explanation.htm)

$$\text{Un Color} = X\bar{x} + Y\bar{y} + Z\bar{z}$$

Si nos proporcionaran una radiancia espectral  $L(x, \lambda)$  en un punto (x) de una escena, entonces la sensación de color que generaría dicha radiancia, vendría dada por el área cubierta por dicha función con respecto a las funciones base, tal y como se muestra en la figura 14.

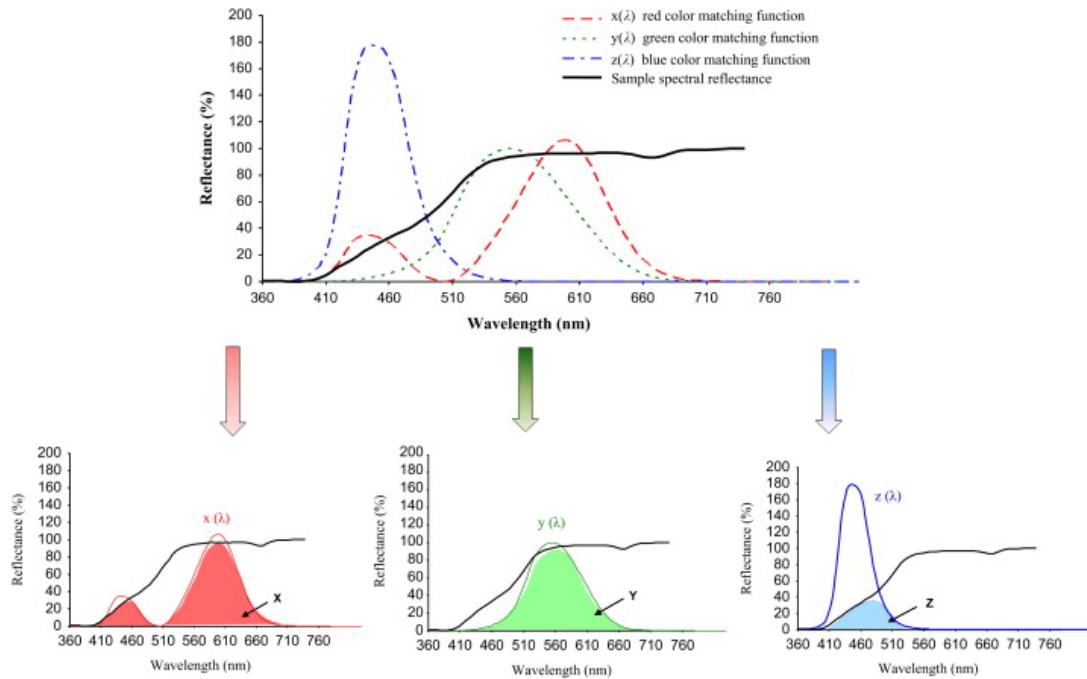


Figura 14. Cálculo del color de una radiancia espectral en coordenadas CIE (X, Y, Z)  
[http://www.pfk.ff.vu.lt/cie/1931CIE\\_explanation.htm](http://www.pfk.ff.vu.lt/cie/1931CIE_explanation.htm)

Esa operación geométrica es equivalente a calcular las siguientes expresiones:

$$X = \int_{380}^{830} L(x, \lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, Y = \int_{380}^{830} L(x, \lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, Z = \int_{380}^{830} L(x, \lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda,$$

## 5.2 Significado de las coordenadas CIE 1931 X, Y, y Z

Al juzgar la luminancia relativa de diferentes colores en las situaciones de buena iluminación, los seres humanos tienden a percibir la luz en las partes verdes del espectro como más brillante que la luz roja o azul de igual potencia. La función de luminosidad que describe el brillo percibido de diferentes longitudes de onda es por lo tanto más o menos análoga a la respuesta de frecuencia de M conos.

El modelo CIE aprovecha este hecho mediante la definición de Y como luminancia, obsérvese que la curva correspondiente al color  $\bar{y}$  primario es exactamente igual a la curva de eficiencia del ojo que es la que interviene en la definición de la magnitud luminancia. Z es casi igual a la estimulación azul, o la respuesta de los conos S, y X es una mezcla de curvas de respuesta de los conos. Los valores triestímulos XYZ son por lo tanto análogo a, pero no igual a, la respuesta de los conos LMS del ojo humano.

Resumen de las características del sistema CIE XYZ (ver figura 15):

- Es un espacio de color independiente de la tecnología
- Se basa en el uso de magnitudes físicas espectrales
- Refleja el comportamiento de los conos y de los bastones del ojo
- La componente (Y) de las coordenadas de color representa la luminancia.

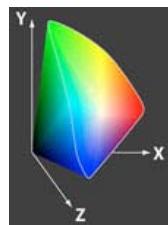
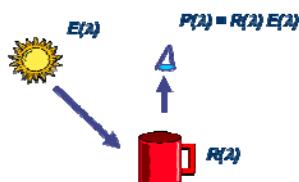


Figura 15. Espacio CIE XYZ

[http://gusgsm.com/espacio\\_triestimulo\\_xyz\\_cie\\_1931](http://gusgsm.com/espacio_triestimulo_xyz_cie_1931)

## 6 Conclusión

- Previamente en esta memoria se había llegado a la siguiente conclusión
  - Lo que ve el observador es por lo tanto  $P(\lambda) = R(\lambda) E(\lambda)$



Copia de la Figura 7. Lo que ve un observador

<http://www.abnexo.com/html/product01.asp?part=2&sno=290> (imagen editada)

- En estos momentos podemos afinar un poco más y decir que las coordenadas de color CIE XYZ que percibiría un ojo serían, (ver figura 16)

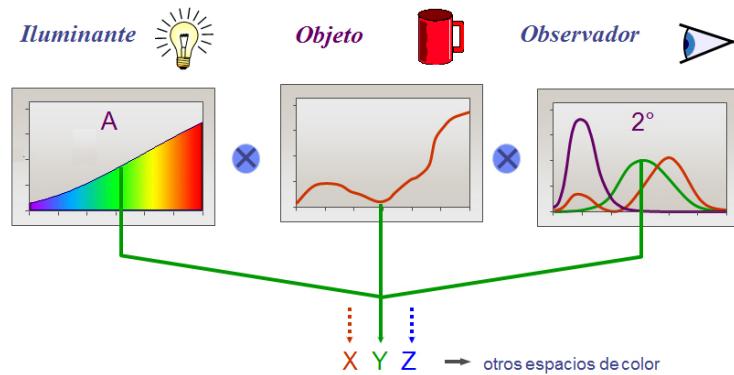


Figura 16. Las coordenadas de color XYZ de lo que ve un observador

- Entre los espacios que se han citado al inicio de este apartado [RGB y XYZ], existe una relación. Los colores RGB se pueden convertir a colores XYZ y viceversa usando las adecuadas matrices de conversión.

[http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn\\_RGB\\_XYZ\\_Matrix.html](http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_XYZ_Matrix.html)

## 7 Bibliografía

- **[Casas, 1994]** Casas, J; **Óptica**, capítulo óptica fisiológica. Editor: CASAS, J., ISBN-10: 8460500624, 1994





# Trabajo Fin de Grado

## Apéndice 4/11

### La ecuación de rendering basada en la física

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

- 1. Rendering basado en la física**
  - 1.1. Simulación de la iluminación (fenomenología)**
  - 1.2. Ecuación de rendering**
  - 1.3. Explicación geométrica**
- 2. Software utilizado. Librería ALEPH**
- 3. Bibliografía**

## 1 Réndering basado en la Física “Physically based Rendering” [Glassner, 1995]

El término “basado en la física” indica que se utilizan modelos físicos y aproximaciones que pueden tener en cuenta propiedades ópticas del tipo (dispersión, difracción, reflexión, refracción, absorción, polarización,...) comportamiento espectral (para trabajar bien con el color) y las propiedades superficiales de los materiales, el comportamiento real de las fuentes de luz y del entorno.

### 1.1 Simulación de la iluminación (fenomenología)

- Cualquier punto de un objeto recibe Radiancia, de todas las direcciones del espacio, parte de manera directa y parte de manera indirecta.
  - La luz directa es la que viene desde las fuentes de luz y que alcanzan el punto directamente (fuentes de luz visibles desde el punto). Ver en la figura 1, los rayos azules que salen de la luminaria y alcanzan la mesa.
  - La Luz indirecta es la que viene reflejada de todos los puntos de la escena que se pueden ver desde (x). Ver en la figura, los rayos verdes y rojos que salen de la luminaria y alcanzan la mesa.

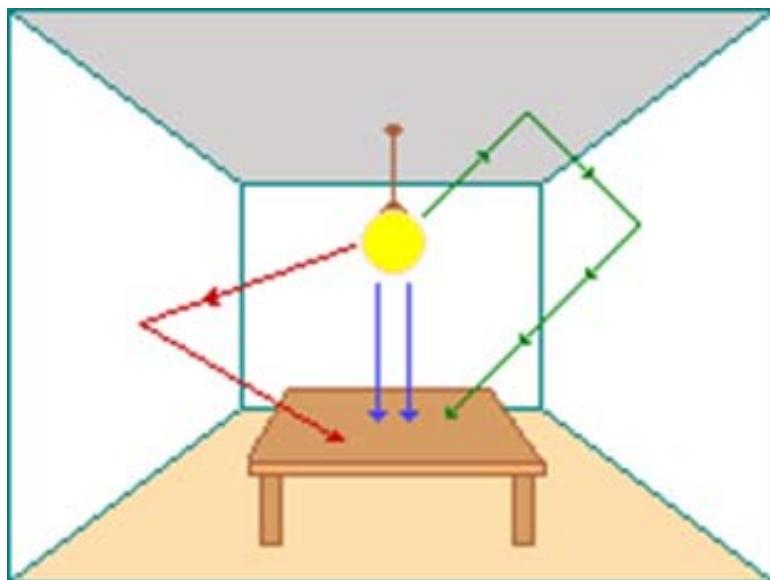


Figura 1. Tipos de Radiancia. Rayos azules (luz directa).  
Rayos rojos y verdes (luz indirecta)

<http://edison.upc.edu/curs/llum/iluminacion-interiores/conceptos-alumbrado-interior.html>

- Cualquier punto de un objeto reemite parte de la Radiancia recibida en todas las direcciones del espacio. Dependiendo del tipo de material puede emitir más o menos en cada dirección. En la figura 2, se representan en 2D y en 3D el comportamiento de tres materiales diferentes para un mismo rayo incidente. Material difuso (por ejemplo el cemento), normal (por ejemplo un dieléctrico), y especular (por ejemplo un espejo).

La función que caracteriza esa cantidad es lo que se conoce como función de reflexión.

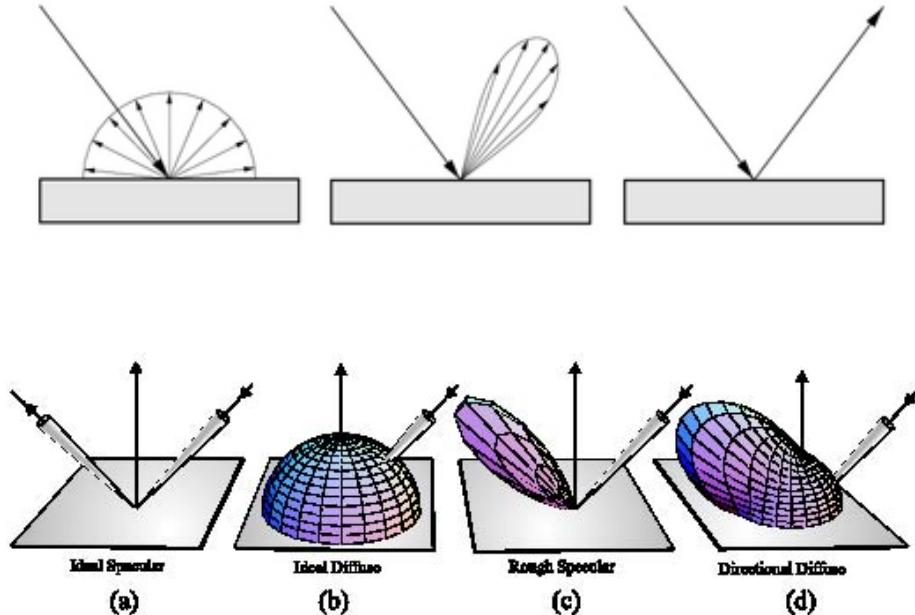


Figura 2. Diferentes comportamientos reflectantes causados por diferentes tipos de materiales, con respecto a un rayo de luz incidente

#### **Notación:**

$X = (x, y, z)$       *un punto del espacio euclídeo en coordenadas cartesianas*

$\omega = (\text{theta y phi})$     *una dirección del espacio en coordenadas esféricas*

En la figura 3, se representa con respecto a un sistema de ejes coordenados, un punto ( $x$ ) de un objeto, observado por un ojo situado en la dirección  $w_r$

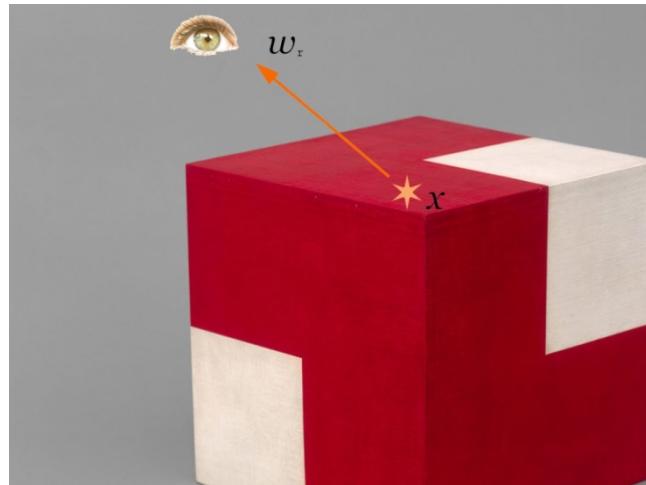


Figura 3  
<http://www.ardena.info/portfolio/objeto-ativowillys-de-castro/> (imagen modificada)

Dicho punto ( $x$ ) va a recibir tanto luz directa de las fuentes de luz como luz indirecta del resto de los puntos de los objetos que lo rodean (en la figura no aparecen para no sobrecargar la imagen) (ver figura 4)

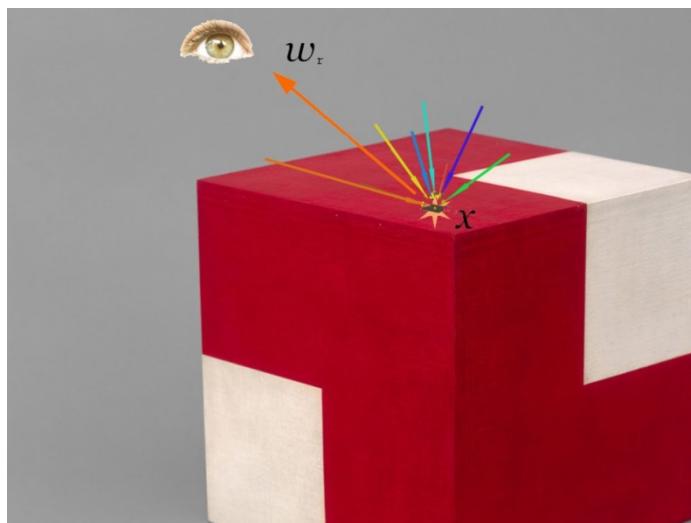


Figura 4

## 1.2 Ecuación de rendering [Glassner, 1995]

Esta ecuación es la que nos permite calcular el fenómeno de cuanta Radiancia ve un ojo cuando mira un punto ( $\mathbf{x}$ ) de un objeto que está rodeado de otros objetos en una escena compleja iluminada por fuentes de luz.

$$L(\mathbf{x}, \omega_r) = L_e(\mathbf{x}, \omega_r) + \int_{\Omega^+} f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_r) L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

## 1.3 Explicación de la ecuación de réndering

1.  $L(\mathbf{x}, \omega_r)$  es la Radiaciancia que deja un punto de un objeto ( $\mathbf{x}$ ) en una dirección dada  $\omega_r$ , que alcanza un ojo que lo está observando. Ver flecha marrón de la figura 5

$$L(\mathbf{x}, \omega_r) = L_e(\mathbf{x}, \omega_r) + \int_{\Omega^+} f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_r) L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

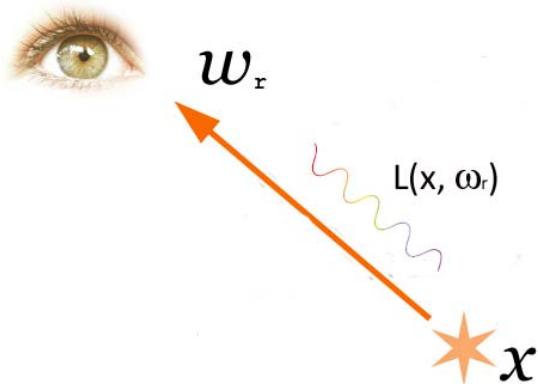


Figura 5

[http://en.wikipedia.org/wiki/Rendering\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_equation) (imagen modificada)

2.  $L_e(\mathbf{x}, \omega_r)$  es la Radiancia que emite dicho punto ( $\mathbf{x}$ ) en la dirección indicada. Este término aparece si el punto ( $\mathbf{x}$ ) del objeto emite luz además de devolver parte de la que recibe.

$$L(\mathbf{x}, \omega_r) = L_e(\mathbf{x}, \omega_r) + \int_{\Omega^+} f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_r) L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

3. Como el punto ( $\mathbf{x}$ ), recibe luz de todas las direcciones (por ejemplo  $\omega_i$ ,  $\omega_j$ ) hay que integrar (sumar) todas las contribuciones en todas las direcciones contenidas sobre la superficie ( $\Omega$ ) (ver figura 6).

$$L(\mathbf{x}, \omega_r) = L_e(\mathbf{x}, \omega_r) + \int_{\Omega^+} f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_r) L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

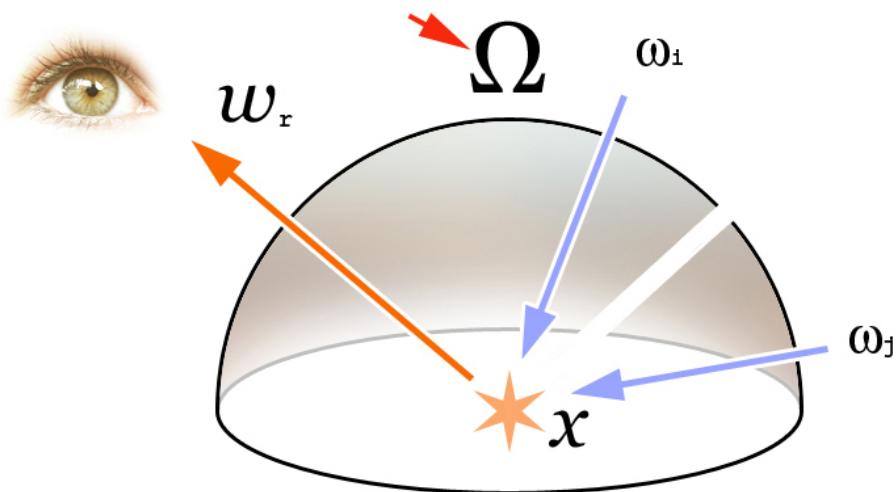


Figura 6  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Rendering\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_equation) (imagen modificada)

4.  $L_i(\mathbf{x}, \omega_i)$  es la Radiancia que llega al punto ( $\mathbf{x}$ ) de una dirección ( $\omega_i$ ) y  $L_j(\mathbf{x}, \omega_j)$  es la Radiancia que llega al punto ( $\mathbf{x}$ ) de cualquier dirección ( $\omega_j$ ) (ver figura 7).

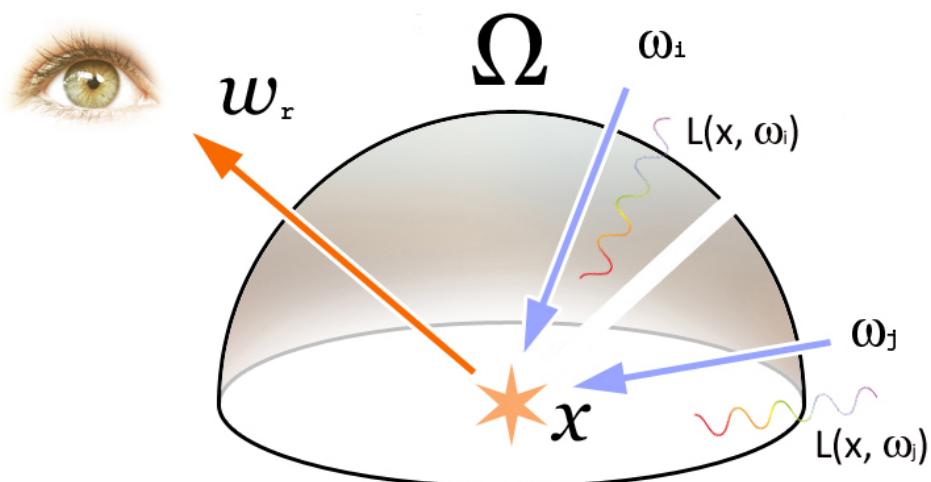


Figura 7  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Rendering\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_equation) (imagen modificada)

5.  $f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_r)$  es lo que se conoce normalmente como coeficiente de reflexión del material, que en el caso más general es una función denominada BRDF (bidirectional reflectance distribution function) que indica, para cualquier dirección incidente  $\omega_i$  sobre ( $\Omega$ ) y cualquier dirección reflejada  $\omega_r$  sobre ( $\Omega$ ), qué valor escalar debe aplicarse (ver figura 8)

$$L(\mathbf{x}, \omega_r) = L_e(\mathbf{x}, \omega_r) + \int_{\Omega^+} f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_r) L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

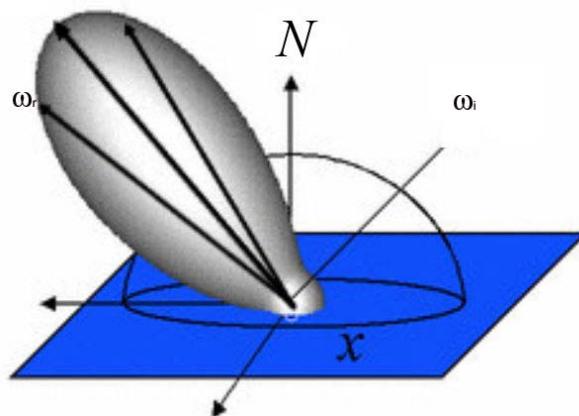


Figura 8

[http://web.cs.wpi.edu/~emmanuel/courses/cs563/write\\_ups/chuckm/chuckm\\_BRDFs\\_overview.html](http://web.cs.wpi.edu/~emmanuel/courses/cs563/write_ups/chuckm/chuckm_BRDFs_overview.html)

6. El término  $\cos(\theta_i)$  viene de la ley de Lambert aplicada a la Radiancia transportada por cualquier rayo (proyección de la sección del rayo sobre el punto ( $x$ ) (ve figura 9)

$$L(\mathbf{x}, \omega_r) = L_e(\mathbf{x}, \omega_r) + \int_{\Omega^+} f_r(\omega_i, \mathbf{x}, \omega_r) L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

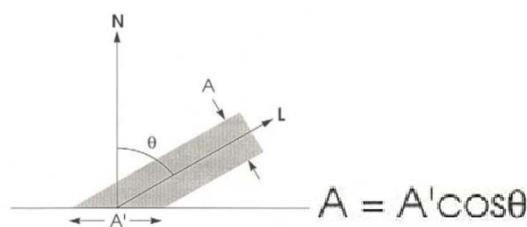
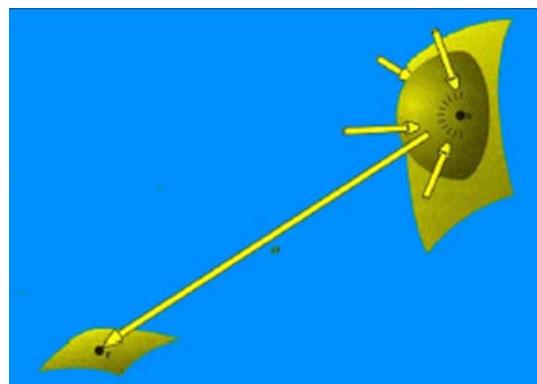


Figura 9

7. Si el medio por el que viaja el rayo es no participativo, lo que sale del punto (x) es lo que llegará al ojo (ver figura 10)



**Medio no participativo**

Figura 10. [Glassner, 1955]

8. Si el medio por el que viaja es participativo, entonces lo que llegará es lo que ha salido por algún coeficiente corrector, (espesor óptico,...) (ver figura 11)



Figura 11. [Glassner, 1955]

## 2 Software utilizado

El programa que se ha utilizado para evaluar la ecuación de rendering en una escena cualquiera, cuyos resultados permiten obtener las luminancias en cada pixel de una imagen de dicha escena, se denomina ALEPH, y es una herramienta desarrollada por el Dr. D. Juan Antonio Magallón Lacarta para su Tesis Doctoral.

A dicho conjunto de librerías y a su autor, se les ha proporcionado el conjunto de algoritmos propuestos en este TFG con objeto de poder generar las imágenes sintéticas que son los resultados de este TFG.

La codificación en C++ la ha realizado el Dr. D. Juan Antonio Magallón, por carecer el autor de este TFG de la formación necesaria.

### Referencia:

- **Título:**
  - *Proyecto ALEPH. Simulación realista de la iluminación global mediante técnicas de Monte Carlo y procesado paralelo*
- **Autor:**
  - *Juan Antonio Magallón Lacarta*
- **Fecha de defensa:**
  - *12/2003*
- **Modalidad:**
  - *Doctorado en Ingeniería Industrial*

### Descripción:

ALEPH es una librería de herramientas que permiten realizar la simulación de la interacción de la luz con la materia en escenas complejas con objeto de generar imágenes sintéticas lo más próximas a la realidad “radiométrica” para aplicarlo a cálculos luminotécnicos, aunque también se ha utilizado para la generación de imágenes “espectaculares” típicas los efectos especiales.

Se basa en la técnica del trazado de rayos, utiliza estructuras de datos especiales para acelerar el seguimiento de los rayos, permite almacenar los resultados en ficheros del tipo “HDR” y “LDR”.

Para realizar el cálculo de la ecuación de Rendering global, hace uso de diferentes técnicas de MonteCarlo, permite utilizar funciones para los coeficientes de reflexión del cualquier tipo de BRDF y en base a la utilización de técnicas de MPI trabaja sobre computadores que ofrezcan cálculo paralelo.

## 3 Bibliografía

[Glassner, 1995] Glassner, A.; **Principles of Digital Image Synthesis**. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics. 2 volúmenes ISBN-10: 1558602763





# Trabajo Fin de Grado

## Apéndice 5/11

### ¿Qué software de rendering utilizar?

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

- 1. Requerimientos necesarios para realizar la simulación**
- 2. Análisis del 3DsMax**
  - 2.1. Resumen**
- 3. Conclusión**

## 1 Requerimientos necesarios para realizar la simulación

Los requerimientos necesarios para realizar la simulación de señalética en túneles en condiciones de emergencia.

- Simulación de la iluminación global basada en física
- Especificación fotométrica espectral de las fuentes de luz a ser posible en formato TM14
- Caracterización óptica de materiales complejos
- Que permita el rendering perceptual
- Que permita realizar diferentes tipos de evaluaciones del campo de iluminación radiométrico obtenido.
- Que permita introducir el comportamiento del humo en la evaluación radiométrica del algoritmo de iluminación global basado en la física

## 2 Análisis del 3DsMax

De partida como posible herramienta de trabajo se seleccionó el paquete 3DsMax, por motivos de ranking, de calidad, de uso y de familiaridad en el entorno del Grado en Diseño Industrial. Su magnífica evolución algorítmica puede seguirse en detalle en [http://es.wikipedia.org/wiki/Autodesk\\_3ds\\_Max](http://es.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max)

Análisis 1: Para poder analizar el comportamiento simulado de un prototipo (señalética) en un túnel, se requiere realizar un proceso de:

- Simulación de la iluminación basada en la física
  - Max 3Ds versión 9 + Mental Ray 3.5 (+shaders programables)
    - iluminación global (geométrica)
    - “Imita” el comportamiento de materiales
    - Dirigido a efectos especiales
    - No “simula”
  - Max 2009, ofrece la versión Design pero no incluye SDK
    - Aparecen objetos 2D (planos) introducidos en la escena 3D como “Light meters” y “Light overlays” que permiten extraer mapas en falso color y valores numéricos producidos por luces fotométricas. Pero la información no es útil para este PFG.
  - Max 2013 + iray render
    - Iluminación global basada en física
    - Simula, pero está pensado para efectos especiales más pensado para “imitar” que para realizar simulaciones cuantitativas. La idea es aprovechar a fondo las posibilidades de las tarjetas gráficas con el hardware y software CUDA de NVIDIA.
    - No he tenido acceso a ninguna versión

- Que permita especificaciones de fuentes luminosas reales (fotometría espectral).
  - Max 3Ds versión 9 (aparece la posibilidad)
  - En la versión actual ofrece acceso a formatos (geométricos, sin información espectral) IES LM-63-1991, LTLL or CIBSE.
- Que permita trabajar con propiedades ópticas complejas de materiales
  - Max 2013 + iray render ofrece un abanico amplio de posibilidades de materiales, pero está pensado fundamentalmente para seleccionar en base a menús de cara a generar imitaciones de efectos más que a la simulación fenomenológica. Aunque con astucia posiblemente podría ser útil.

## Análisis 2: Modelos perceptuales

- Max 2013 + iray render, no ofrece información de la técnica de reproducción de tono que utiliza cuando se configura todo el sistema para “imitar” una simulación de la iluminación global. La única información disponible indica que tiene que ver con la exposición de la cámara fotográfica. Es decir va dirigido a mejorar la “estética”. En cualquier caso, no es accesible, ni modificable.

### 2.1 Resumen:

Habiendo analizado a fondo el software de 3ds MAX en todas sus versiones y sobre todo a nivel de especificación de la versión Max 2013, uno se encuentra que teniendo en cuenta los requerimientos indicados en el apartado 1, se puede afirmar que:

- Simulación de la iluminación global basada en física
  - Algorítmicamente aceptable
- Especificación fotométrica espectral de las fuentes de luz a ser posible en formato TM14
  - Algorítmicamente aceptable la especificación fotométrica
  - No permite fotometría espectral (trabajar con un espectro y varias longitudes de onda)
  - No ofrece trabajar con ficheros TM14
- Caracterización óptica de materiales complejos
  - Algorítmicamente aceptable
- Que permita el rendering perceptual
  - No lo ofrece
- Que permita realizar diferentes tipos de evaluaciones del campo de iluminación radiométrico obtenido.
  - Las posibilidades son muy pobres e inútiles para este proyecto.
- Que permita introducir el comportamiento del humo en la evaluación radiométrica del algoritmo de iluminación global basado en la física
  - No lo ofrece

### **3 Conclusión**

Es evidente por todos los motivos aducidos, que no es factible la utilización de esa herramienta de primera línea. Por lo tanto la salida era abandonar esa línea de actividad o intentar solventarla. Se decidió seleccionar esta última opción.

Por lo que se ha buscado un entorno de laboratorio en el que se pudiera llevar a cabo el planteamiento propuesto, es decir un sistema de simulación de la iluminación basado en la física que reuniera todas las características indicadas. Se tuvo acceso a uno denominado ALEPH (ver Apéndice 4) pero en el que las partes que faltaban eran el “rendering perceptual” e introducir el impacto del humo en la evaluación radiométrica.

Por ello este Proyectando ha dedicado parte de sus esfuerzos a estudiar, seleccionar y algoritmizar los procedimientos necesarios para cubrir esos dos déficits.





## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 6/11

### Otros experimentos que describen el comportamiento del ojo

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

- 1. El cuarto experimento**
- 2. El quinto experimento**
- 3. Bibliografía**

## 1 El cuarto experimento [Ferwerda, 1996]

Dicho experimento muestra el tiempo de adaptación requerido por el ojo cuando hay un cambio brusco en la iluminación (de oscuro a brillante)

La adaptación no ocurre de manera inmediata. Si estás sentado en una habitación oscura y las luces de repente se encienden tardas segundos antes de adaptarte a ese nivel de iluminación. Este proceso se conoce como tiempo de adaptación de iluminación. En las figuras 1(a) y 1(b) se muestra el tiempo requerido (abcisas) frente al cambio en los niveles de iluminación (ordenadas)

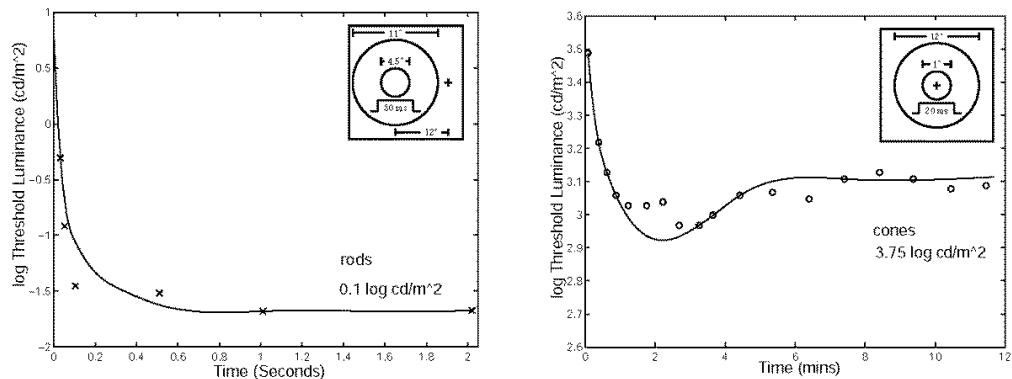


Figura 1.

(a). Secuencia temporal (time course) de adaptación del sistema de bastones. (Adelson 1982).

b). Secuencia temporal (time course) de adaptación del sistema de conos. (Baker 1949)

Cuando pasamos rápidamente de niveles de iluminación bajos a niveles altos, al principio todo es doloroso de mirar y entrecerramos o incluso cerramos un ojo para reducir la incomodidad. Sin embargo con el tiempo el brillo general del campo visual acaba en unos niveles confortables y la visión normal se recupera. Siendo el tiempo necesario en el sistema de conos más lento que el de bastones.

## 2 El quinto experimento [Ferwerda, 1996]

Este experimento muestra el tiempo de adaptación cuando hay un cambio brusco en la iluminación (de brillante a oscuro).

Visualmente la adaptación de brillante a oscuro es experimentada como la ceguera temporal que ocurre cuando pasamos rápidamente de niveles fotópicos a niveles escatópicos de iluminación. La relativamente lenta secuencia de adaptación para este caso significa que la visión puede estar impedida durante varios minutos (ver figura 2)

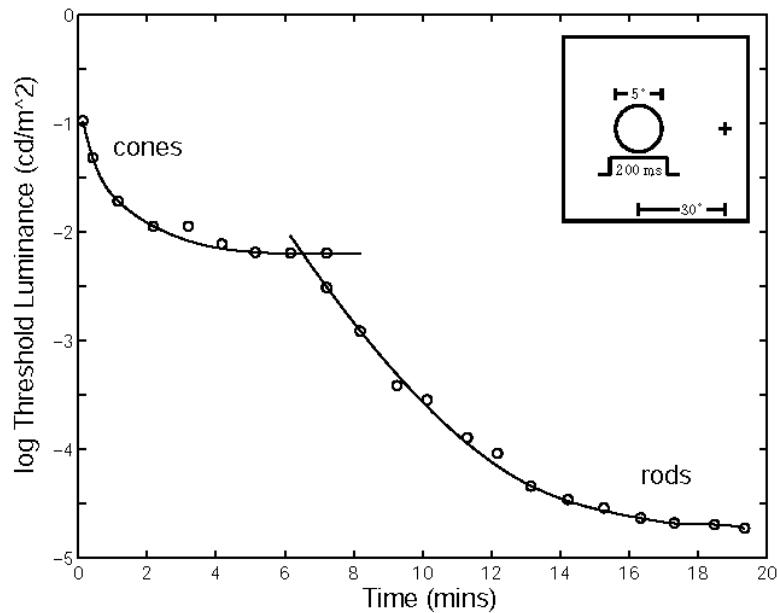


Figura 2. La secuencia temporal de adaptación de brillante a oscuro. (Riggs 1971)

## 3 Bibliografía

[Ferwerda, 1996] Ferwerda, J. A., Pattanaik, S. N., Shirley, P., Greenberg, D., P.: **A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis**, Proceedings SIGGRAPH'96, 249-258, 1996.





**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 7/11 Implementación del algoritmo

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

- 1. Algoritmo de evaluación de la función TPFERWERDA**
- 2. Algoritmo de evaluación de la función TSFERWERDA**
- 3. Método completo**
- 4. Algoritmo reproducción de tono RTPFG**
- 5. Otras funciones**

## 1 Algoritmo de evaluación de la función TPFERWERDA

$$\log T_p(L_a) = \begin{cases} -0.72 & \text{si } \log_{10} L_a \leq -2.6 \\ \log_{10} L_a - 1.255 & \text{si } \log_{10} L_a \geq +1.9 \\ (0.249 \log_{10} L_a + 0.65)^{2.7} - 0.72 & \text{para el resto de los valores} \end{cases}$$

real Funcion TPFERWERDA (real La)

{

/evaluación de la función de Ferwerda que describe el comportamiento fotópico/

```
real IL = log10(La);
real val;

if (IL <= -2.6)
    val = -0.72;
else
    if (IL >= 1.9)
        val = IL - 1.255;
    else
        val = pow [(0.249 * IL + 0.65), 2.7] - 0.72
    endif
endif

val = pow [10.0, val]

return val;
```

Comentario:

Se hace uso de la función pow (x, y) que calcula  $x^y$

## 2 Algoritmo de evaluación de la función TSFERWERDA

$$Log_{10} T_s(L_a) = \begin{cases} -2.86 & \text{si } Log_{10} L_a \leq -3.94 \\ Log_{10} L_a - 0.395 & \text{si } Log_{10} L_a \geq -1.44 \\ (0.405 Log_{10} L_a + 1.6)^{2.18} - 2.86 & \text{para el resto de los valores} \end{cases}$$

real Funcion TSFERWERDA (real La)

{

/evaluación de la función de Ferwerda que describe el comportamiento escotópico/

```
real IL = log10(La);
real val;

If (IL <= -3.94)
    val = -2.86;
else
    if (IL >= -1.44)
        val = IL - 0.395;
    else
        val = pow [(0.405 * IL + 1.6), 2.18] - 2.86
    endif
endif

val = pow [10.0, val]

return val;
}
```

Comentario:

Se hace uso de la función pow (x, y) que calcula  $x^y$

### 3 Método completo para todo el rango de luminancias (escotópica, mesópica, fotópica)

- $L_d(x) = L_{dp}(x) + K(L_a) * L_{ds}(x)$ 
  - $k(L_a) = \text{valor entre } [0, 1]$ 
    - $k(L_a) = \left(1 - \frac{\left(\frac{L_{wa}}{2} - 0.01\right)}{(10 - 0.01)}\right)^2 \text{ clamped}$
  - *donde*
    - $L_{dp}(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * L_{wp}(x)$
    - $L_{ds}(x) = m_s(L_{wa}, L_{da}) * L_{ws}(x)$
    - *siendo*
      - $m_p(L_{wa}, L_{da}) = \frac{T_p(L_{da})}{T_p(L_{wa})}$
      - $m_s(L_{wa}, L_{da}) = \frac{T_p(L_{da})}{T_s(L_{wa})}$
- *Teniendo en cuenta que*
  - $L_{wp}(x) = \text{Luminancia del mundo fotópica} = Y_w(x)$
  - $L_{ws}(x) = \text{Luminancia del mundo escotópica, es un escalar}$ 
    - $= -0.702 * X_w(x) + 1.039 * Y_w(x) + 0.433 * Z_w(x)$
  - *Siendo*
    - $X_w(x) = \text{Coordenada CIE 1931} - X, \text{para el pixel } (x)$
    - $Y_w(x) = \text{Coordenada CIE 1931} - Y, \text{para el pixel } (x)$
    - $Z_w(x) = \text{Coordenada CIE 1931} - Z, \text{para el pixel } (x)$
- Reuniendo todas las expresiones se obtiene el operador final de cálculo

- $X_d(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * X_w(x) + K(L_a) * L_{ws}(x)$
- $Y_d(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * Y_w(x) + K(L_a) * L_{ws}(x)$
- $Z_d(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * Z_w(x) + K(L_a) * L_{ws}(x)$

- El paso final es

$$\begin{pmatrix} r_d(x) \\ g_d(x) \\ b_d(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.24103 & -1.53741 & -0.49862 \\ -0.969242 & 1.87596 & 0.041555 \\ 0.055632 & -0.203979 & 1.05698 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_d(x) \\ Y_d(x) \\ Z_d(x) \end{pmatrix}$$

#### 4 Algoritmo reproducción de tono RTPFG

{  
/Este algoritmo está basado en los trabajos de Ferwerda, et al. Duran et al., Pattanaik et al. /

```
entero      nf, nc;  /nf número de filas, nc número de columnas de la imagen
                      calculada/
real    Ldmax, Lda;
leer   (Ldmax);
Lda = 0.5 * Ldmax;

real   Xw [nf, nc];
real   Yw[nf, nc];
real   Zw [nf, nc];
real   Lws [nf, nc];

Leer imagen (Xw, Yw, Zw, Lws, nf, nc)

real   Lwa;
Lwa = logMean (Yw, nf, nc);

real mp, ms;
mp = TPFERWERDA(Lda)/TPFERWERDA(Lwa);
ms = TPFERWERDA(Lda)/TSFERWERDA(Lwa);

real k;
k= Clamping [ (1-pow [(((Lwa/2)-0.01)/(10.0-0.01)),2]), 0, 1]

real Xd[nf, nc];
real Yd[nf, nc];
real Yd[nf, nc];

for I = 1:nf
beggin
  for j = 1: nc
    beggin
      Xd(i, j) = mp * Xw (i,j) +  k * ms * Lws(I,j) * 1.05;
      Yd(i, j) = mp * Yw (i,j) +  k * ms * Lws(I,j) * 0.97;
      Zd(i, j) = mp * Zw (i,j) +      k* ms * Lws(I,j) * 1.27;
    end
  end

real rd[nf, nc];
real gd[nf, nc];
real bd[nf, nc];
```

```

for l = 1:nf
    beggin
        for j = 1: nc
            beggin
                rd(i, j) = 3.24103 * Xd(l,j) -1.53741 * Yd(l,j) - 0.49862 * Zd(l,j);
                gd(i, j) = -0.969242 * Xd(l,j) +1.87596 * Yd(l,j) + 0.041555 * Zd(l,j);
                bd(i, j) = 0.055632 * Xd(l,j) -0.203979 * Yd(l,j) + 1.05698 * Zd(l,j);
            end
        end
    Visualiza_imagen (rd, gd, rbd, nf, nc);
}

```

Comentario: Se hace uso de las funciones Clamping y LogMean

## 5 Otras funciones

```
real Funcion Clamping (real x, real min, real max)
{
    If (x > max) then x = max;
    If (x < min) then x = min;
    return x;
}
```

---

```
real Funcion logMean (real Yw, entero nf, entero nc)
```

```
{
    entero N = nf * nc;
    real IM = 0.0;

    for l = 1: nf
        beggin
            for j = 1: nc
                beggin
                    IM = IM + log10(Yw);
                endif
            endif

        IM = IM/N;
        IM = pow [10.0, IM]

    return IM;
}
```

Comentario:

Se hace uso de la función pow (x, y) que calcula  $x^y$





**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Apéndice 8/11

Ficha técnica Implaled

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

Este apéndice está disponible en el CD.





**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 9/11 Impacto visual del humo en túneles

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

- 1. Introducción**
- 2. Visibilidad**
  - 2.1. Tiempo de escape**
  - 2.2. Recomendaciones para la visibilidad**
- 3. Descripción del fenómeno**
- 4. Resultados obtenidos en la simulación**
- 5. Referencia**

## 1 Introducción

En la actualidad, a la hora de realizar una simulación precisa sobre el movimiento de humos y gases calientes en incendios, en particular en túneles de carretera, hay que acudir a códigos comerciales o de laboratorio cerrados y usar diferentes modelos para simular flujos turbulentos con combustión, utilizando técnicas de dinámica de fluidos computacional.

La tesis que se ha elegido como referencia versa sobre la generación y movimiento de gases y humos como consecuencia de un incendio dentro de un recinto con un tamaño y ventilación típicos de un túnel de carretera.

El tema a tratar está de la máxima actualidad ante los accidentes ocurridos en los últimos años en Europa:

- San Gotardo (sur de Suiza), 24 de octubre de 2001, 11 fallecidos. Era el túnel terrestre bidireccional más largo del mundo con 16'9 km hasta la inauguración del túnel de Laerdal (Noruega) en 2001.
- Gleinalm (sur de Alemania), 6 de agosto del 2001, 8 muertos.
- Tauern (Austria), 26 de mayo de 1999, 12 fallecido.
- MontBlanc (entre Francia e Italia), 24 de Marzo de 1999, 39 fallecidos.

Un incendio, definido habitualmente como la propagación incontrolada de llamas, es indiscutiblemente uno de los más complejos fenómenos que se pueden estudiar en la ciencia de la combustión. Está ligado a todos los efectos que aparecen en los flujos de reacciones químicas subsónicas. La fluidodinámica, combustión, cinética, radiación y flujo multifásico se unen para provocar un fenómeno físico y químico extremadamente complejo.

Cuando se pretende evaluar los riesgos que aparecen a causa de un incendio hay que tener presente lo siguiente:

- Temperatura alcanzada.
- Calor transmitido por radiación.
- **Visibilidad.**
- Concentración de O<sub>2</sub> y de especies tóxicas y, o, corrosivas.
- Tiempos de escape.
- Velocidad crítica: aquella que contiene los humos en el sentido de la circulación.

Un ejemplo de la combinación de estos efectos lo podemos encontrar en la figura 1 (Babrauskas, 1979). Dicha figura representa la evolución con el tiempo de diversos parámetros y los niveles aceptables de radiación y visibilidad de los humos que se originan en una habitación de 29 m<sup>3</sup> cuando se quema una silla con estructura de poliestireno y asiento y recubrimiento de poliuretano. Alrededor de los 6 minutos desde que comienza el fuego, se alcanza el máximo de las variables. Sin embargo, los límites admisibles se producen mucho antes de ese momento

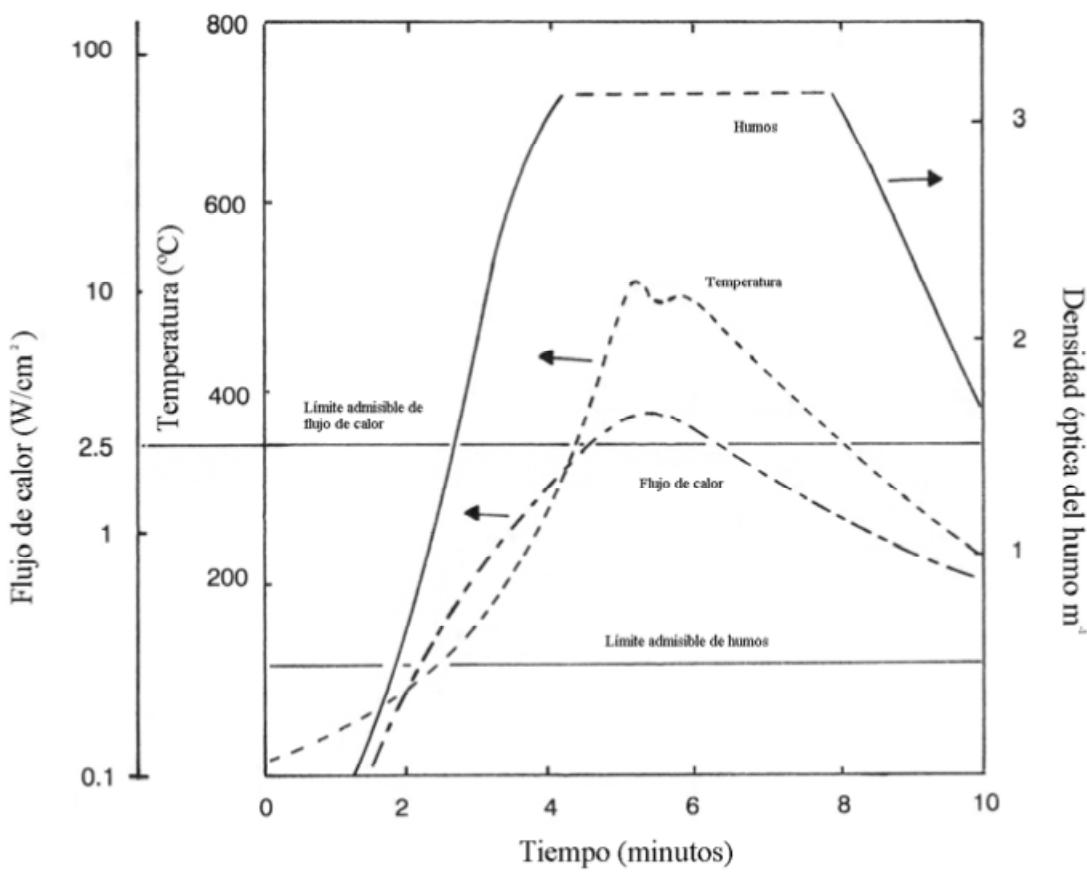


Figura 1. Ejemplo de evolución temporal de parámetros en un incendio.

## 2 Visibilidad

Las propiedades del humo son expresadas comúnmente en términos de transmitancia y otros coeficientes de densidad óptica y de atenuación, también llamados coeficientes de extinción.

- La transmitancia del humo,  $T$ , se define como:

$$T = I_x / I_0$$

Dónde:

- $I_0$  es la intensidad de luz incidente
- $I_x$  la que sale de la capa de humos después de haber atravesado una cierta longitud.

- La densidad óptica por unidad de longitud,  $\delta$ , se relaciona con la transmitancia por la siguiente ecuación:

$$\delta = -(\log_{10} T) / x$$

Dónde:

- $x$  es la distancia atravesada por el rayo de luz.

- El coeficiente de atenuación o extinción por unidad de longitud,  $K$ , se define igual que la densidad óptica sustituyendo el logaritmo decimal por el logaritmo neperiano:

$$K = -(\log_e T) / x$$

- Por lo que se relaciona con  $\delta$  mediante:

$$K = \delta \ln 10 = 2.303 \delta$$

- En ocasiones se usa el porcentaje de oscuridad,  $\lambda$ , definido como:

$$\lambda = 100(1-T)$$

- Con lo que la transmitancia se puede expresar como:

$$\delta = -[\log_{10}(1-\lambda/100)] / x$$

- La distancia de visibilidad,  $D$ , puede estimarse usando el coeficiente de extinción de la mezcla aire-humo como:

$$D = A / K$$

Donde:

- $A$  es una constante dependiente de qué tipo de objeto es el que hay que ver; 2 si se trata de un objeto reflectante o 6 para un letrero luminoso.

Fujimura, 1988, indica que  $K = 0'4 \text{ m}^{-1}$  es un valor crítico de coeficiente de extinción para el humo en un túnel de carretera.

La figura 2 muestra la relación entre la visibilidad de señales luminosas y el coeficiente de extinción para humo irritante o no irritante. En dicha figura se indican los resultados experimentales con puntos, y con líneas las ecuaciones empíricas.

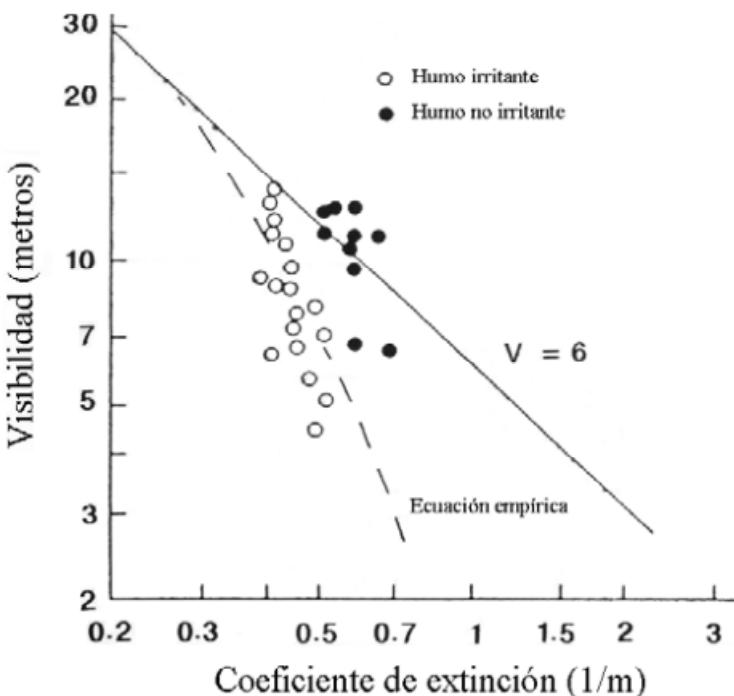


Figura 2. Visibilidad de señales luminosas

Para humo no irritante se cumple la ecuación  $[D=A/K]$ , con  $A = 6$  al tratarse de un objeto luminoso. En el caso de humo irritante, esa ecuación se modifica introduciendo un término independiente. En la figura 1.9, para señales luminosas,  $A$  valdría  $6'5$  y el nuevo término independiente  $-6'3$ .

Es decir, para un mismo coeficiente de extinción o su equivalente de densidad óptica, si el humo existente tiene un carácter irritante, se disminuye la visibilidad frente a un gas que no tuviese ese carácter. De esta forma se tiene en cuenta que la visibilidad tiene también un carácter dependiente de la situación del sujeto que la percibe.

Rasbash (1975) sugiere que para escapar de un incendio es necesaria una visibilidad,  $D$ , de  $10\text{ m}$ , lo cual es equivalente a una densidad óptica,  $\delta$ , de  $0'08\text{ m}^{-1}$  y a un coeficiente de extinción,  $K$ , de  $0'18\text{ m}$  cuando se trata de ver objetos reflectantes,  $A = 2$ .

Jin (1981) sugiere que el límite admisible para la densidad óptica es  $0'2\text{ m}^{-1}$  cuando el individuo está familiarizado con la ruta de escape, mientras que Babrauskas (1979) es aún más optimista y sugiere un valor límite de  $0'5\text{ m}^{-1}$ . La figura AIV.1 muestra como en el incendio de una silla dentro de una habitación de  $29\text{ m}^3$  la densidad óptica de los humos crece rápidamente y alcanza un límite de densidad óptica de  $0'5\text{ m}^{-1}$  en poco menos de 2 minutos. La densidad óptica crece a  $3\text{ m}^{-1}$  en 4 minutos, lo cual corresponde a una visibilidad de  $0'3\text{ m}$  para objetos reflectantes,  $A = 2$ .

## 2.1 Tiempo de escape

- *Tiempo antes del comienzo de la evacuación*

Aquí se engloban junto con el tiempo necesario para detectar y alertar del comienzo del incendio, el tiempo que los usuarios del túnel emplean en reaccionar y abandonar los vehículos.

El tiempo que se tarda en saber de la existencia del incendio y comunicar a los usuarios el suceso, es muy dependiente del sistema de control del túnel. Cuando este sistema existe, puede variar entre 2 y 5 minutos, mientras que es mucho mayor para los casos de túneles sin control.

Más difícil aún es estimar el tiempo que se tarda en evacuar los vehículos, función sobre todo del medio de transporte de que se trate. En coches ese tiempo se reduce apreciablemente comparándolo con autobuses.

- *Velocidad de huida*

Hay mucha información acerca de la velocidad de escape en diferentes escenarios: edificios, estaciones de metro subterráneas,... Estos datos muestran que esta velocidad en condiciones libre de humo varía entre 1 y 2 m/s.

En la figura 3 la velocidad de huida se muestra para ambientes con humo irritante y no irritante. Se puede observar cómo el aumento de coeficiente de extinción, o equivalentemente la visibilidad, afecta en gran medida a la capacidad de movimiento de las personas atrapadas en un incendio. Este efecto se acentúa en gran medida cuando el humo es irritante.

Con humo no irritante y coeficientes de extinción superiores a  $1'2 \text{ m}^{-1}$ , visibilidad de  $1'5 \text{ m}$  para objetos reflectantes, la velocidad de escape es inferior a  $0'3 \text{ m/s}$ , la cual corresponde a una persona con los ojos vendados.

Sin embargo con humo irritante esto ocurre para coeficientes de extinción de  $0'5 \text{ m}^{-1}$ , visibilidad de  $4 \text{ m}$  también para objetos reflectantes. Es decir, se llega a una situación de ceguera virtual para una cantidad mucho menor de humos irritantes.

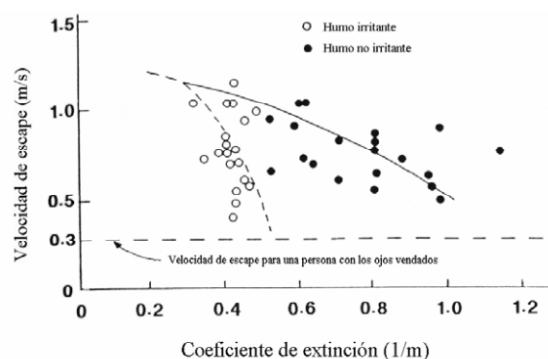


Figura 3. Velocidad de escape

No existen datos para velocidad de huida en túneles de carretera, pero una buena suposición es que se encuentra entre 0'5 y 1'5 m/s dependiendo, entre otras cosas, de la visibilidad, iluminación y diseño de las señales de salida.

Por tanto, el tiempo total transcurrido desde que se produce el incendio hasta que aquellos que se encuentran en sus inmediaciones consiguen llegar a un sitio seguro puede variar entre 30 segundos y 5 minutos.

## 2.2 Recomendación para la visibilidad

Es posible dar estimaciones de cuáles son las condiciones que se deben mantener para la evacuación y las operaciones de lucha contra el fuego. El tiempo de evacuación puede ser de varios minutos dependiendo de la distancia a las salidas y la velocidad de escape. Esta última puede ser del orden de 1'5 m/s pero puede verse reducida a 1 m/s, o incluso menos, por la presencia del humo

Una distancia de al menos 7 m es necesaria para escapar fácilmente en un ambiente con humo. La distancia debe aumentar a 15 m para leer las señales. Por consiguiente una distancia de visibilidad mínima de entre 7 y 15 m debe existir durante la evacuación y las operaciones de extinción.

## 3 Descripción del fenómeno

El modelo propuesto divide el túnel a estudio en dos partes; la zona del penacho, que contiene a la llama y los gases de combustión hasta que impactan con el techo, y el resto del túnel aguas abajo del incendio, junto con una zona de transición (ver figura 4).

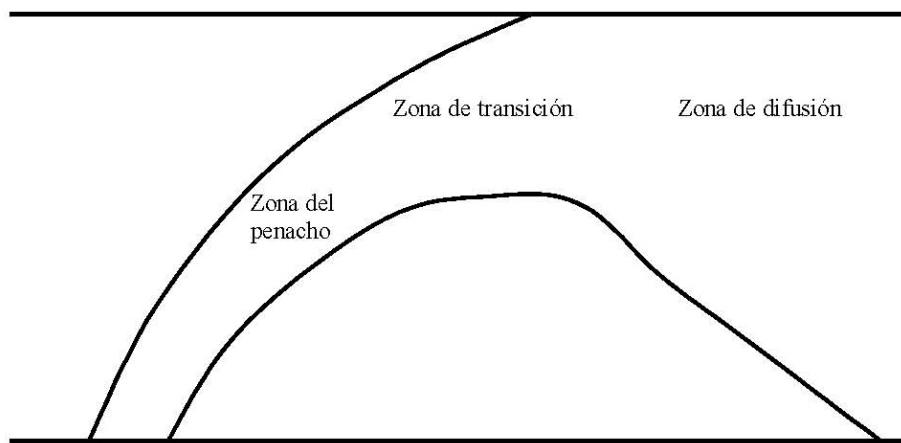


Figura 3.1: Zonas en que se divide la corriente de humos

Figura 4. Zonas en que se divide la corriente de humos

En la primera zona, el penacho se considera que adquiere un movimiento libre, sin que le afecten las paredes del túnel.

El flujo de la segunda zona (ver figura 4), consiste esencialmente en la difusión de gases calientes.

En función de esas zonas, y como resultados de la simulación, se pueden establecer criterios de peligrosidad en función de la temperatura, visibilidad y concentración de las especies (ver figura 5).

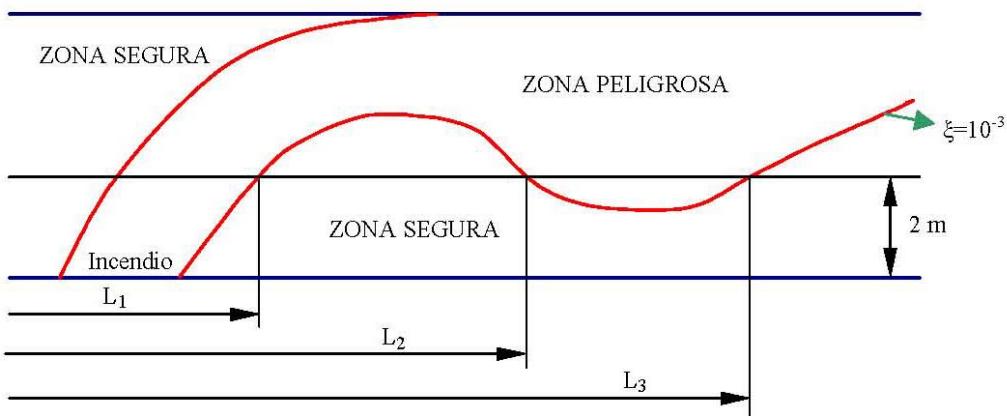


Figura 7.1: Esquema de zonas segura y peligrosa

Figura 5. Esquema de zonas segura y peligrosa

#### 4 Resultados obtenidos en una simulación

La ampliación del aeropuerto Madrid-Barajas con una tercera pista en el año 1998, hizo necesario la desviación de la carretera autonómica M-111 en el tramo que une el distrito urbano de Barajas con la localidad de Paracuellos del Jarama. Para sortear las nuevas instalaciones aeroportuarias, se construyó un túnel de 836 metros de longitud.

Nuevas ampliaciones del citado aeropuerto con una cuarta pista y nuevos edificios para terminales y servicio, han obligado a desdobljar y prolongar en 1770 metros el anterior túnel. De esta forma, en la actualidad existen 4 tubos de 2606 metros de longitud (ver figura 6 y figura 7).

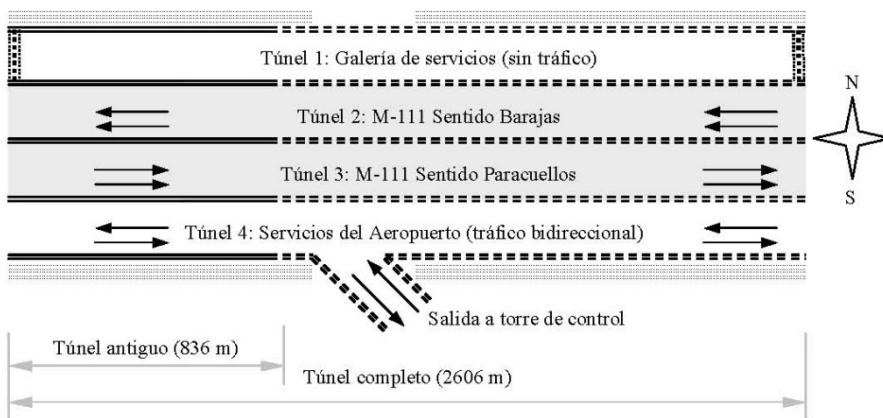


Figura 5.1: Esquema del túnel a estudio

Figura 6. Esquema del túnel a estudio

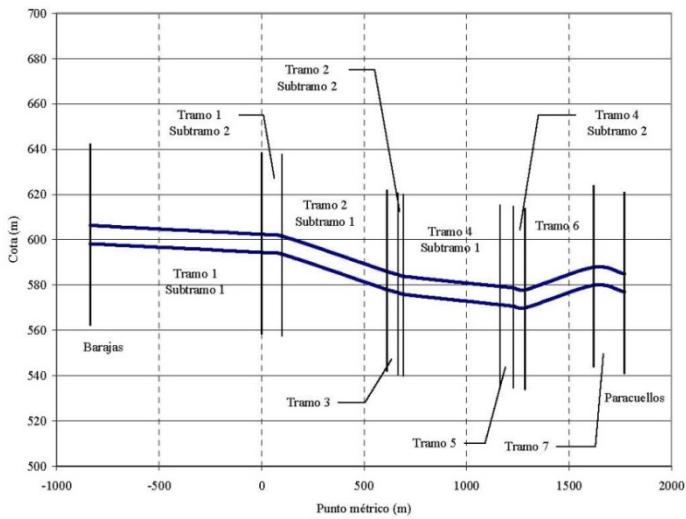


Figura 5.3: Corte vertical del túnel.

Figura 7. Corte vertical del túnel

En las figuras que van de la 8 a la 10, se representan los resultados obtenidos para la visibilidad.

Esta variable en muchos casos es fundamental para predecir si existen condiciones que permitan la evacuación segura del túnel. Se muestra para cada una de ellas, sus valores respectivos en las secciones situadas a 10, 50 y 100 metros aguas abajo del foco.

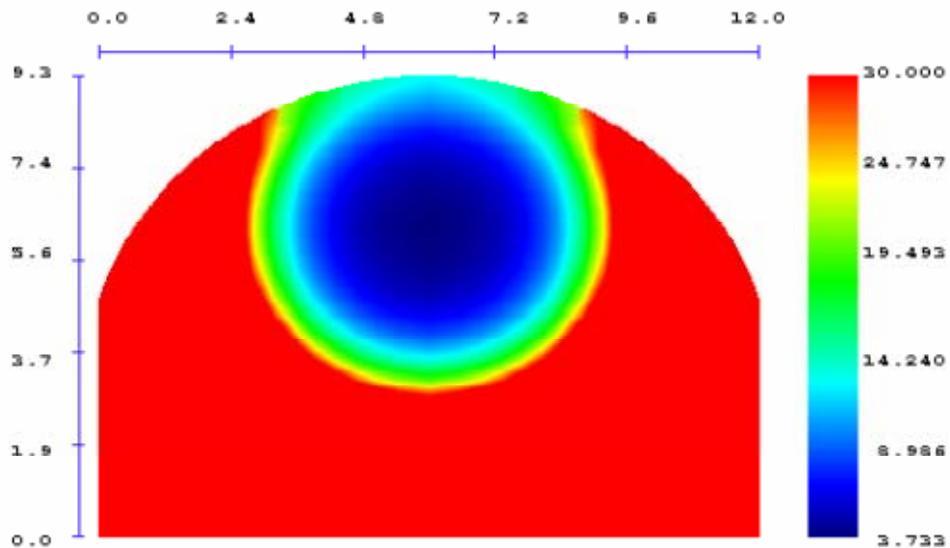


Figura 8. Visibilidad.  
Sección a 10 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW.  
Velocidad de aire 2'5m/s.

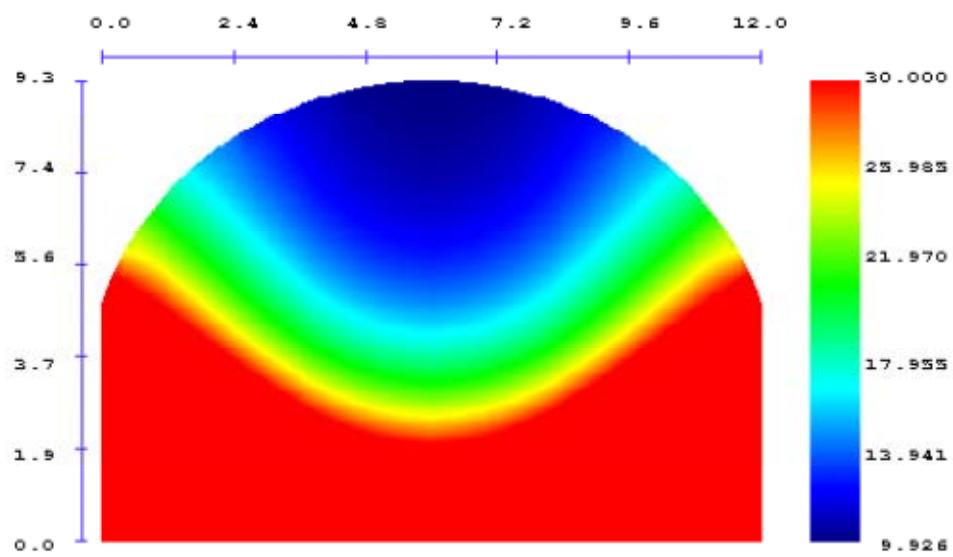


Figura 9. Visibilidad.  
Sección a 50 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW.  
Velocidad de aire 2'5m/s.

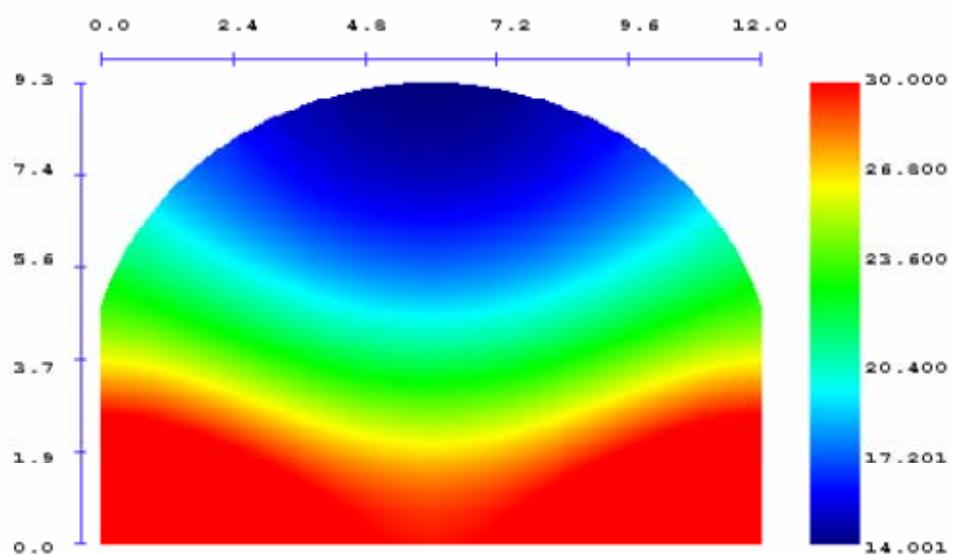


Figura 10. Visibilidad.  
Sección a 100 m aguas abajo del foco. Potencia 10MW.  
Velocidad de aire 2'5m/s.

**5 Referencia:**

**Título:**

- *Modelado zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera.*

**Autor:**

- *Emilio Migoya Valor*

**Fecha de defensa:**

- *2002*

**Modalidad:**

- *Doctorado en Ingeniería Industrial*

[http://fluidos.etsii.upm.es/profesores/Emilio\\_Migoya/publicaciones\\_migoya.htm](http://fluidos.etsii.upm.es/profesores/Emilio_Migoya/publicaciones_migoya.htm)





## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 10/11

### Capítulo 13. Iluminación en túneles INDAL

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

Este apéndice está disponible en el CD.





## Trabajo Fin de Grado

### Apéndice 11/11

### Resultados obtenidos utilizando otros reproductores de tono

RENDERING PERCEPTUAL DE ESCENARIOS. APLICACIÓN A TÚNELES Y SU SEÑALÉTICA EN SITUACIONES DE  
EMERGENCIA

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

# ÍNDICE

---

- 1. Recordatorio**
- 2. Caso 1. Reproductor trivial**
- 3. Caso 2. Reproductor basado en el valor medio**
- 4. Caso 3. Reproductor basado en el promedio logarítmico**

## 1 Recordatorio

El objetivo general de los reproductores de tono consiste en transformar los valores de luminancia reales en valores que puede emitir el monitor, manteniendo cierto criterio u objetivo.

La Idea de cualquier método lineal para calcular la Luminancia de cada pixel ( $x$ ) del monitor a partir del valor de la luminancia calculada del pixel ( $x$ ) correspondiente de la imagen simulada (mundo) es

- $L_d(x) = m * L_w(x)$

*siendo  $m$  = el factor que relaciona las luminancias*

Dicho valor dependerá para cada situación particular del tipo de operador seleccionado.

En lo que sigue se muestran tres tipos de reproductores de tono aparentemente evidentes que muestran la verdadera complejidad del problema.

### Caso1. Reproductor trivial

$$m = 1$$

Por lo tanto

$$L_d(x) = L_w(x)$$

Explicación: El valor de la luminancia de cualquier punto del monitor, es directamente la luminancia del pixel correspondiente de la imagen del mundo.

Ejemplo: Si se tiene un valor de luminancia en un punto del mundo de 2000 cd/m<sup>2</sup>, la fórmula lo que me dice es que el valor de la luminancia en el pixel correspondiente sería de 2000 cd/m<sup>2</sup>. Si en el monitor el valor máximo reproducible es de 200 cd/m<sup>2</sup> el color asociado es el blanco.

Resultado

Evidentemente todas las imágenes aparecen sobreexpuestas dado que los rangos dinámicos son muy diferentes en magnitud (variaciones de 10<sup>14</sup> en la realidad y de 10<sup>2</sup> en el monitor)



Figura 1



Figura 2. Ferwerda

## Caso 2. Reproductor basado en el valor medio

$$m = \frac{L_{d,Avr}}{L_{w,Avr}}$$

Por lo tanto

$$L_d(x) = \frac{L_{d,Avr}}{L_{w,Avr}} * L_w(x)$$

siendo

$$L_{Avr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(x_i) \text{ Media aritmética de la luminancia}$$

Explicación: Para calcular el valor de m, se asocia el valor promedio de la imagen del mundo, al valor promedio del monitor.

### Resultado



Figura 3



Figura 4. Ferwerda

### Caso 3. Reproductor basado en el promedio logarítmico

$$m = \frac{L_{d,Log}}{L_{w,Log}}$$

Por lo tanto

$$L_d(x) = \frac{L_{d,Log}}{L_{w,Log}} * L_w(x)$$

siendo

$$L_{Log} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_{10}(L_w(x_i)) \text{ Media logarítmica decimal de la luminancia}$$

Explicación: La luminancia promedio logarítmico del mundo se transforma en la luminancia promedio en el monitor. Dado que la percepción de brillo es logarítmica con la luminancia, el “brillo” medio de la imagen se mapea en la mitad del rango del monitor.

### Resultado



Figura 3



Figura 4. Ferwerda

**Nota:** En todos los casos, el valor de  $L_{d,\{avg,log\}}$  se estima como la mitad de la luminancia máxima del display.

El valor final de R, G o B para alimentar el monitor debe calcularse como un valor entre 0 y 1, dividiendo la luminancia a mostrar para el pixel entre la máxima del monitor:

$$[r,g,b] = L_d(x) / L_{d,max}$$