

# Efectos Oculares de la Energía Radiante

... y su control radiométrico para evitar lesiones oculares

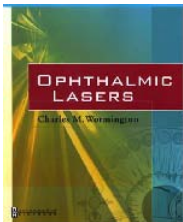


# Sumario

- **Preámbulo**
- **Principios de lesión por absorción de radiación óptica**
  - Concepto de umbral de exposición
- **Límites de exposición ocular y en la piel frente a:**
  - UV, VIS e IR
  - Principios de protección ocular a radiaciones
- **Límites de exposición y protección ocular frente a láseres**
- **Principios de fotosensibilización:**
  - Fototoxia y fotoalergia

## Bibliografía básica

- **PITTS, D.G. & KLEINSTEIN, R.N.:** *Environmental Vision*. Boston: Butterworth-Heinemann, 1993.
- **McKINLAY, A.F., HARLEN, F. WHILLOCK, M.J.:** *Hazards of Optical Radiation*. Bristol: Adam Hilger, 1988.
- **WORMINGTON, C.M:** *Ophthalmic Lasers*. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- **Unión Europea:** *Directiva 25/2006/CE sobre protección del trabajador ante radiaciones ópticas*. <http://vlex.com/vid/295893>



## Bibliografía complementaria (I)

- Publication CIE x016-1998: *Measurements of optical radiation hazards*. Oberschleissheim: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP, 1998.



- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP. <http://www.icnirp.de/>

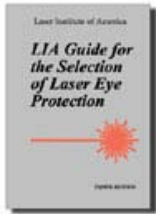


- CIE DIVISION 6: Photobiology and Photochemistry. <http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/CIE/CIE6/index.html>



- HENDERSON, R. & SCHULMEISTER, K: *Laser Safety*. Boston: IoP Publishing, 2003.

## Bibliografía complementaria (II)



- Laser Institute of America: *Guide for the Selection of Laser Eye Protection*. Orlando: LIA Press, 2007.



- Ophthalmic Surgery, Lasers and Imaging: <http://www.osli.com/>



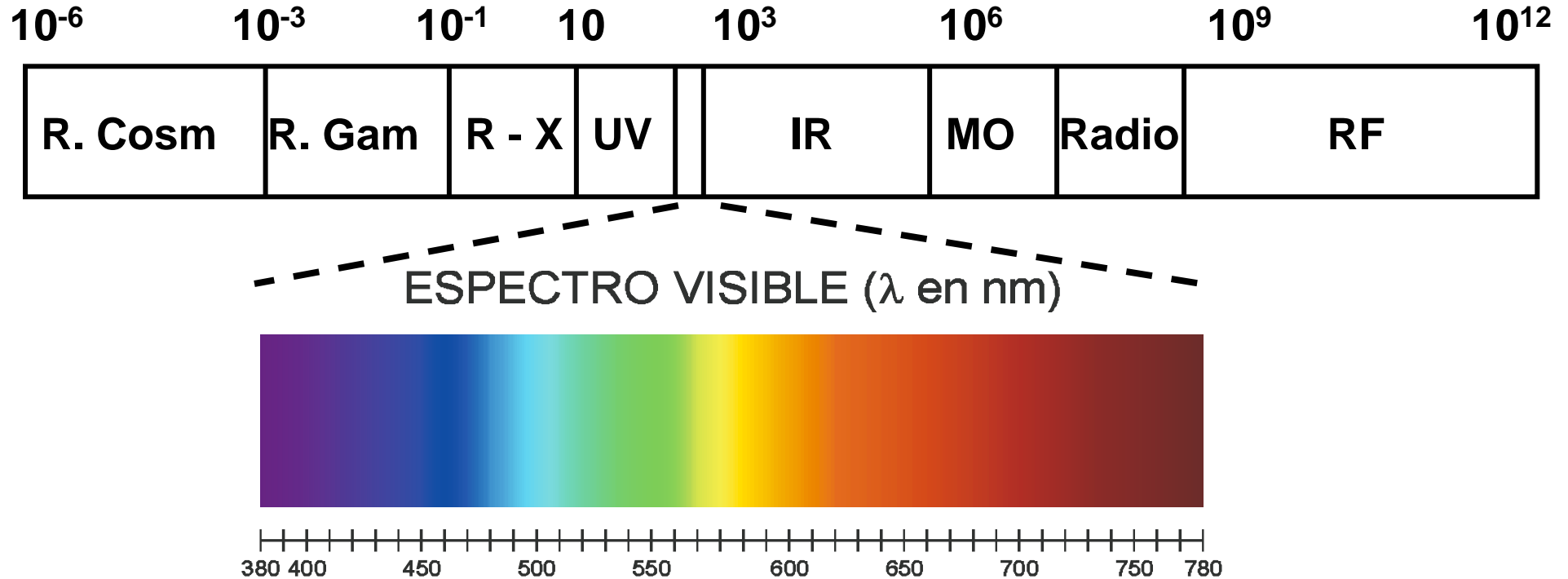
- Health Physics, the Radiation Safety Journal: <http://www.health-physics.com/>
- Journal of the Optical Society of America A: <http://josaa.osa.org>
- Applied Optics: <http://ao.osa.org>
- The Virtual Journal of Biomedical Optics: <http://vjbo.osa.org/>

## Preámbulo (I)

- **Ojo: sistema biológico sensible la luz**
- **¿Qué pasa si incide en el Ojo radiación no visible?**
- **¿Podemos dañar también el Ojo con radiación visible?**
- **Ejemplos de profesiones con factores de riesgo a exposiciones radiantes**

# Preámbulo (II)

- La radiación electromagnética a la que somos sensibles



## Preámbulo (III)

- **Ultravioleta (UV)**
  - UV-C: [100, 280] nm
  - UV-B: [280, 315] nm
  - UV-A: [315, 380] nm
- **Visible: [380, 780] nm**
- **Infrarrojo (IR)**
  - IR-A: [780, 1400] nm
  - IR-B: [1400, 3000] nm
  - IR-C: [3000,  $10^5$ ] nm



# Principios de lesión ocular por absorción de radiación óptica

- **Factores clave:**

- Irradiancia ( $E_e$ ), tiempo ( $t$ ), respuesta espectral ( $\tau$ )
- Riego sanguíneo del Ojo

- **Exposición = Irradiancia \* Tiempo**  $H(\lambda) = E_e(\lambda) \cdot t$   $\left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right]$

- **Irradiancia en la retina**  $E_e(\lambda) = 0.27 \phi_P^2 L_e(\lambda) \tau_{oc}(\lambda)$   
 $\phi_P$  en cm

# Transmitancia Ocular

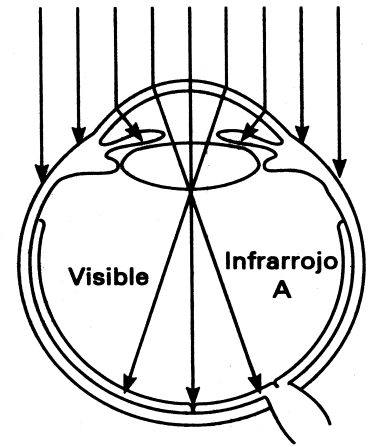
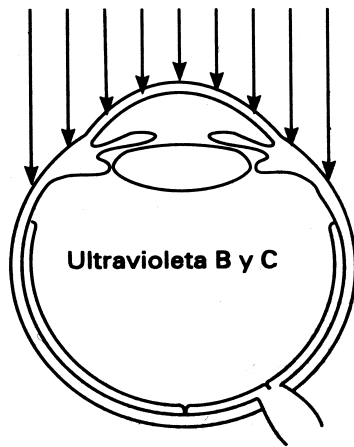
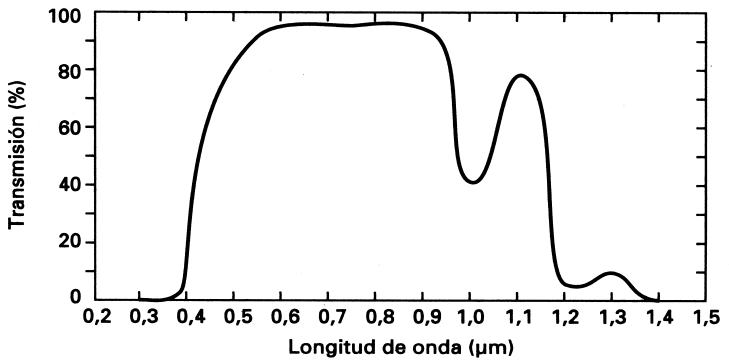


Figura 4-6. Transmitancia espectral global a través de la córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo.

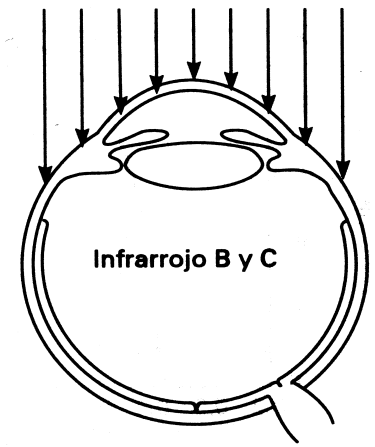
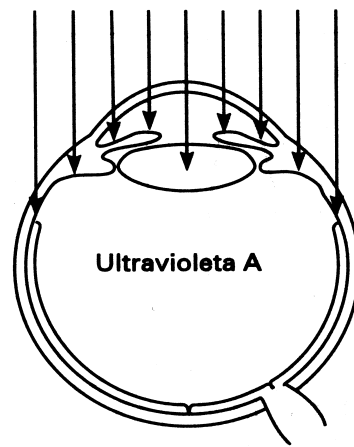
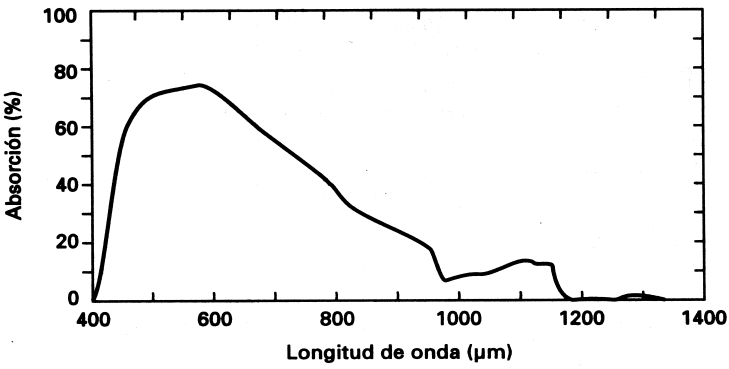


Figura 4-7. Absorción espectral de la retina y la coroides.

## Tipos de lesiones por absorción de radiación óptica

- **Optomecánica:**
  - $E_e \uparrow\uparrow\uparrow$ ,  $t \downarrow\downarrow$  (1 ps – 1 ns),  $\Delta T = 0$ , indep.  $\lambda$ , epitelio pigmentario de retina y coroide
- **Termomecánica:**
  - $E_e \uparrow\uparrow$ ,  $t \downarrow$  (1 ns – 0.1 ms),  $\Delta T > 10$  °C, indep.  $\lambda$ , epitelio pigmentario de retina
- **Térmica:**
  - $E_e \uparrow$ ,  $t \downarrow$  (0.1 ms – 5 s),  $\Delta T > 10$  °C, dep.  $\lambda_{VIS}$ , todos los tejidos de retina
- **Fotoquímica:**
  - $E_e \downarrow$ ,  $t \uparrow$  (10 s – horas),  $\Delta T < 10$  °C, dep.  $\lambda$ , lesiones a nivel molecular (ADN, enzima, ...)

# Tipos de lesiones por absorción de radiación óptica

- Actuación directa

	Ultravioleta			Visible	Infrarrojo		
Tipo de onda	UV-C	UV-B	UV-A				
Longitud de Onda	200	290	320	400	760	1400	$10^6$
Lesión Ocular	Queratitis				Catarata		
		Catarata			Quemadura Corneal		
			Lesiones de Retina				

- Actuación indirecta : fotosensibilización

# Concepto de umbral de exposición

- $H = n^{\circ}$  fotones acumulado en x tiempo
  - $H(\lambda) = E_e(\lambda) * t \rightarrow$  reciprocidad (ley Bunsen-Roscoe)
  - Irradiancia efectiva  $\rightarrow$  concepto de “area”

$$E_{eff} = \sum_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} E_e(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda \quad ; \quad S(\lambda) \text{ espectro - acción}$$

- Tiempo seguro de exposición:  $t = \frac{H_{umbral}}{E_{eff} \text{ fuente}}$

- Factor de protección:  $FP = \frac{E_{eff} \text{ lesión}}{E_{eff} \text{ fuente}}$

# Límites de exposición ocular frente a radiación UV (I)

- **Fuentes naturales de emisión**
  - Sol (UV-C absorbido por el ozono, UV-B y UV-A pasan la atmósfera)
- **Fuentes artificiales de emisión**
  - UV-A: tubos fluorescentes, láseres
  - UV-B: tubos fluorescentes, soldadura, láseres
  - UV-C: lámparas de descarga (Hg, etc)
- **¿ Profesiones con riesgo a radiación UV ?**

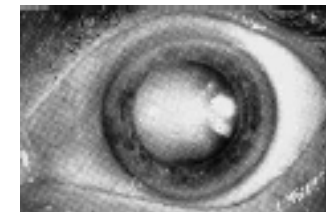
# Límites de exposición ocular frente a radiación UV (II)

- **Mecanismos de lesión:**
  - Fotoquímico (UV-ABC) y Térmico (UV-A)

- **Modo de actuación:**

- Directo:

- **Córnea: fotoqueratitis por UV - BC**
- **Cristalino: cataratas por UV - AB**



- **Indirecto (fotosensibilización)**

# Límites de exposición ocular frente a radiación UV (III)

- **Condiciones en el Ojo y en la piel:**

- **UV - ABC:  $t \geq 8$  horas** 
$$\left[ \sum_{180\text{nm}}^{400\text{nm}} E_e(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda \right] \cdot t < 30 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

- **UV - A:  $t < 8$  horas** 
$$\left[ \sum_{315\text{nm}}^{400\text{nm}} E_e(\lambda) \Delta\lambda \right] \cdot t < 10^4 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

- **UV - BC:  $t < 8$  horas** 
$$\left[ E_e(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda \right] \cdot t < H_{\text{umbral}}$$



# Principios de Protección UV (I)

- **Lesión por fotoqueratitis en córnea: cálculo del tiempo seguro de exposición**
  - Umbral de exposición  $H_{\text{umbral}}(270) = 0.003 \text{ J/cm}^2$
  - Irradiancia de la fuente luminosa  $E_e(\lambda)$
  - Transmitancia espectral  $\tau_{\text{FILTRO}}(\lambda)$
  - Eficiencia espectral relativa  $S(\lambda)$

$$\left[ \sum_{210\text{nm}}^{320\text{nm}} E_e(\lambda) \tau_{\text{FILTRO}}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda \right] \cdot t < H_{\text{umbral}}(270)$$

- ¿Valor de la transmitancia de un filtro “plano” durante 4 horas?

$\lambda$ (nm)	$E_e$ ( $10^{-6}$ ) [W/cm <sup>2</sup> ·nm]	$\tau_{\text{FILTRO}}$	S	$E_{\text{eff}}$ ( $10^{-6}$ ) [W/cm <sup>2</sup> ·nm]	$H_{\text{umbral}}$ [J/cm <sup>2</sup> ]
210	0.30	0.01	0.075		0.0400
220	0.44	0.02	0.120		0.0250
230	0.59	0.02	0.190		0.0160
240	0.59	0.03	0.300		0.0200
250	0.68	0.04	0.430		0.0070
260	1.32	0.05	0.650		0.0046
270	2.56	0.05	1.000		0.0030
280	2.10	0.07	0.880		0.0034
290	5.38	0.07	0.640		0.0047
300	6.10	0.10	0.300		0.0010
310	7.60	0.12	0.015		0.2000
320	8.50	0.13	0.001		2.9000

# Límites de exposición ocular frente a radiaciones VIS e IR (I)

- Fuentes naturales de emisión: Sol
- Fuentes artificiales de emisión
  - VIS: lámparas incandescentes, descarga fluorescentes, láseres
  - IR-A: lámparas incandescentes, descarga, láseres, hornos, estufas
  - UR-B: hornos, láseres
- ¿Profesiones con riesgo a radiaciones VIS - IR?

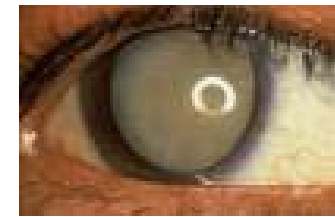
# Límites de exposición ocular frente a radiaciones VIS e IR (II)

- **Mecanismos de lesión:**
  - Fotoquímico (azul - VIS) → recíproco
  - Térmico (VIS - IR) → no-recíproco
    - Depende también del tamaño de la imagen

- **Modo de actuación:**

- Directo:

- Córnea: opacidad corneal por IR - BC
- Cristalino: cataratas por IR - AB
- Retina: fotorretinitis por azul - VIS, quemaduras por IR - A



# Límites de exposición ocular frente a radiaciones VIS e IR (III)

- **Lesión térmica en córnea y cristalino:**

$$\sum_{780\text{nm}}^{3\mu\text{m}} E_e(\lambda) \Delta\lambda \leq 1.8 t^{-3/4} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}, \quad \text{si } t \leq 10^3 \text{ s}$$

$$\sum_{780\text{nm}}^{3\mu\text{m}} E_e(\lambda) \Delta\lambda \leq 10 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}, \quad \text{si } t > 10^3 \text{ s}$$

- **Lesión térmica en retina:  $\alpha_{\text{LAMP}} \in [1.7, 100] \text{ mrad}$**

$$\sum_{380\text{nm}}^{1400\text{nm}} L_e(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda < \frac{5}{\alpha \cdot t^{0.25}} \frac{\text{W}}{\text{sr} \cdot \text{cm}^2}, \quad \text{si } t \leq 10 \text{ s}$$

$$\sum_{780\text{nm}}^{1400\text{nm}} L_e(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda \leq \frac{0.6}{\alpha} \frac{\text{W}}{\text{sr} \cdot \text{cm}^2}, \quad \text{si } t > 10 \text{ s}$$

# Límites de exposición ocular frente a radiaciones VIS e IR (IV)

- **Lesión fotoquímica en retina:**

$$\left[ \sum_{300\text{nm}}^{700\text{nm}} L_e(\lambda) B(\lambda) \Delta\lambda \right] \cdot t \leq 100 \frac{\text{J}}{\text{sr} \cdot \text{cm}^2}, \quad \text{si } t \leq 10^4 \text{ s}$$

$$\left[ \sum_{300\text{nm}}^{700\text{nm}} L_e(\lambda) B(\lambda) \Delta\lambda \right] \leq 10 \frac{\text{mW}}{\text{sr} \cdot \text{cm}^2}, \quad \text{si } t > 10^4 \text{ s}$$

- **Lesión fotoquímica en retina para afáquicos:**

$$\left[ \sum_{300\text{nm}}^{700\text{nm}} L_e(\lambda) A(\lambda) \Delta\lambda \right] \cdot t \leq 100 \frac{\text{J}}{\text{sr} \cdot \text{cm}^2}, \quad \text{si } t \leq 10^4 \text{ s}$$

$$\left[ \sum_{300\text{nm}}^{700\text{nm}} L_e(\lambda) A(\lambda) \Delta\lambda \right] \leq 10 \frac{\text{mW}}{\text{sr} \cdot \text{cm}^2}, \quad \text{si } t > 10^4 \text{ s}$$

# Fundamentos del Láser

- **Principio óptico y propiedades de un láser**
  - Amplificación de la luz mediante la emisión estimulada de radiación
  - Emisión coherente, monocromática y energética
- **Aplicaciones de la tecnología láser:**
  - Comunicaciones
  - Multimedia
  - Óptica
  - Medicina (Cirugía oftalmológica, estética, etc)

# Tipos de láseres (I)

- **Modo funcionamiento:**
  - Continuo (CW): seg → min
  - Pulso largo (P): 100  $\mu$ s → 2 ms
  - Conmutado (Q): < 100 ns
  - Cerrado (M): 20 → 40 ps
- **Caracterización radiométrica:**
  - Potencia (W) para láseres continuos (CW)
  - Energía (J) para láseres pulsantes (P, Q, M)



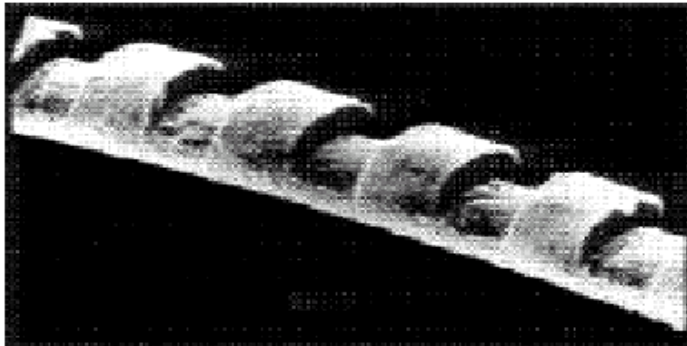
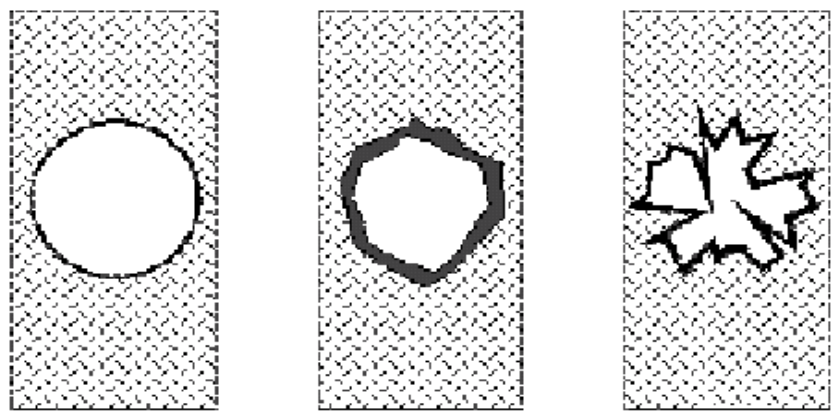
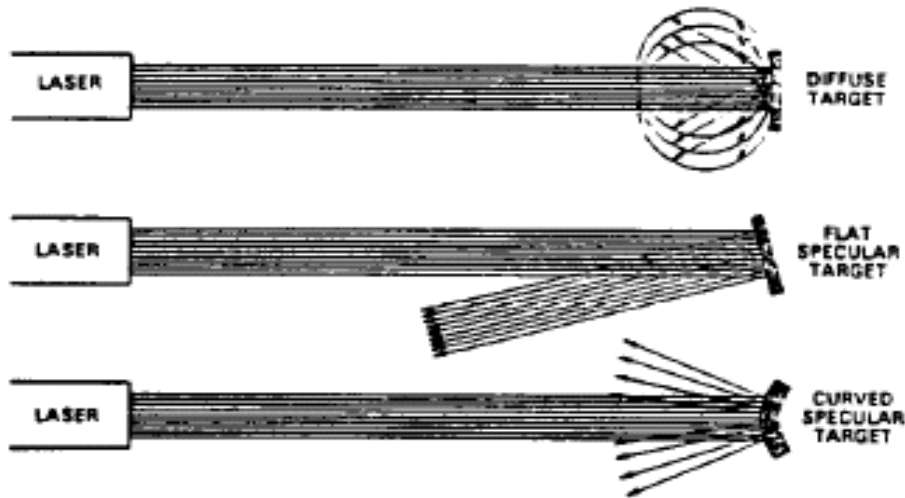
## Tipos de láseres (II)

- **Tecnologías:**
  - **Gas:**
    - He-Cd (441 nm, CW), He - Ne (633 nm, CW)
    - Kr (531, 568, 647 nm, CW), Ar (514 nm, CW)
  - **Colorante (Dye):**
    - Rodamina 6G (570 - 640 nm, CW - P)
  - **Estado Sólido:**
    - Nd:YAG (532 - 1064 nm, CW - P - Q)
    - Rubí (694.3 nm, P - Q - M)
  - **Diodo:**
    - Ga Al As (790 – 850 nm, P)
- ¿Excimer?
- ¿LASIK, PRK en Optometría?

# Láseres y el Ojo (I)

- **Factores de selección del láser**
  - **Potencia ( $F_e$ )**
  - **Absorción del medio ocular**
  - **Longitud de onda del láser**
  - **Aumento de temperatura que provoca el láser**
  - **Tipo de lesión que puede ocasionar**
- **Datos tabulados de la absorción de los medios oculares respecto varios láseres**

# Láseres y el Ojo (II)



## Láseres y el Ojo (III)

- **Efectos sobre los tejidos oculares**
  - **Fotoablación**
    - Vaporización muy localizada ( $0.25 \mu\text{m}$  tejido)
    - Láser ArF excimer (193 nm) en LASIK
  - **Fotocoagulación**
    - Quemadura:  $10 < \Delta T < 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , inflamación del tejido ocular
    - Ar (514 nm) para trabeculoplastia
    - Kr (647 nm) para fotocoagulación pan-retiniana
  - **Fotodisrupción**
    - Explosión del tejido ( $15000 \text{ }^\circ\text{C}$  en fracciones de seg) Nd:YAG (1064 nm) para capsulotomía en la IOL

## Láseres y el Ojo (IV)

- **Clasificación de los láseres según su riesgo para provocar lesión ocular:**
  - **clase I:**
    - $F_e < 0.38$  mW, sin riesgo ocular
  - **clase II:**
    - $F_e < 1$  mW, seguro con reflejo palpebral (0.25 s)
  - **clase IIIa:**
    - $F_e < 5$  mW, quemadura en la mácula en monos (2 s)
  - **clase IIIb:**
    - $F_e < 500$  mW, quemadura en la piel para  $t > 2$  s
    - sin riesgo con reflexiones difusas (no directas)
  - **clase IV: máximo riesgo**

# Límites de exposición ocular frente a láseres (I)

- **Datos de la International Commission on Non - Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**
- **Tabla 4: Límites de exposición a láseres UV, VIS e IR**
  - **Restricciones: tamaño del haz incidente**
    - UV, IR - BC: datos variables
    - VIS e IR - A: 7 mm de diámetro pupilar
- **Tabla 5: Límites de exposición láser en la piel**

# Límites de exposición ocular frente a láseres (II)

- **Factores a tener en cuenta:**
  - **Rango UV:**
    - Rango espectral ( $\lambda$ )
    - Tiempo de exposición ( $t$ )
  - **Rango VIS e IR - A:**
    - Fuente extensa ( $\alpha$ )  $\rightarrow$  factor corrección  $C_E$  (lesión térmica)
    - Campo de visión asociado a un cono ( $\gamma$ )
    - Rango espectral ( $\lambda$ )
    - Tiempo de exposición ( $t$ )
    - Factores espectrales de corrección ( $C_A, C_B, C_C, T_2$ )
  - **Rango IR - BC:**
    - Rango espectral ( $\lambda$ )
    - Tiempo de exposición ( $t$ )

# Protección a Láseres

- **Nivel de exposición al láser:  $H = F_e * t$** 
  - Potencia medida del láser  $F_e$
  - Tiempo exposición  $t$
- **Exposición máxima permitida (EMP = EL)**
  - Rango espectral ( $\lambda$ ), etc → tablas ICNIRP
- **Exposición límite a nivel corneal:**
  - $H_L = EMP * \text{área límite del haz}$  (tablas ICNIRP)
- **Potencia segura:  $F_{segura} = H_L / t$**
- **Filtro neutro de protección: densidad óptica**
  - $D(\lambda) = \log(H / H_L) = \log(F_e / F_{segura})$



# Fotosensibilización (I)

- **Definición general:**
  - Es una reacción cutánea en respuesta a la interacción de la radiación solar con sustancias fotosensibilizantes que se encuentran en la superficie cutánea tras la administración tópica o sistémica.
- **Fototoxía:**
  - Es el aumento de absorción de la luz solar por ingestión o contacto de medicamentos o productos químicos y en ocasiones por alteraciones del metabolismo o en ciertas enfermedades.
- **Fotoalergia:**
  - Es una reacción alérgica producida por una sustancia medicinal (que suele ser inmunológicamente inactiva) al ser irradiada.

## FOTOTOXIA

1. Quemadura solar exagerada, no eccematosa.
2. En cualquier individuo.
3. A cualquier edad y tipo de piel.
4. Más frecuente (95%)
5. La intensidad es dosiddependiente del fármaco y de la luz.
6. Aparece con la 1º exposición al fármaco y en poco tiempo.
7. Periodo de latencia corto (min-h).
8. Desaparece después de 2-7 días de suspender el fármaco.
9. Afecta sólo a zonas expuestas al sol.

## FOTOALERGIA

1. Aparece hiperemia, vasodilatación eccema y/o ampollas.
2. No en todos los individuos.
3. A cualquier edad, pero depende del tipo de piel.
4. Menos frecuente.
5. Es independiente.
6. Aparece con la 1º exposición a la luz de 5-30 minutos después, o años después.
7. Periodo de latencia (medio-largo).
8. Mayoritariamente en mujeres.
9. Afecta a zonas tanto expuestas como no.

CUADRO III. DROGAS CAPACES DE INDUCIR FOTOSENSIBILIDAD SISTÉMICA

Fotoalergia	Fototoxía
Sulfanilamida	Antibióticos
Clorpromazina	Griseofulvina
Piroxicam	Acido nalidixico
	Sulfanilamida
	Tetraciclinas
	Agentes quimioterapéuticos
	Dacarbazina
	5-Fluorouracilo
	Vinblastina
	Clorpromazina
	Amiodarona
	Captopril
	Diuréticos
	Furosemida
	Hidroclorotiazida
	Antiinflamatorios no esteroideos
	Benoxaprofeno
	Piroxicam
	Naproxen
	Ketoprofeno
	Psoralenos
	Hipoglicemiantes orales
	Clorpropamida
	Gliburida
	Tolbutamida



Figura 7. Imagen clínica de quemadura solar por ingesta de piroxicam.



Figura 2. Fototoxía inducida por psoralenos tópicos para el tratamiento del vitiligo.



Figura 3. Hiperpigmentación residual debida a daño fototóxico por cítricos.