

Apéndice



Anatomía del ojo

A.1. Introducción

El ojo es uno de los órganos más importantes y mas valorados por el ser humano, ya que gracias a este órgano nos permite obtener la visión. Aunque el ojo es denominado, comúnmente, el órgano de la visión, en realidad es el cerebro quien efectúa esta función. El ojo cumple la función de traducir todas las sensaciones luminosas que le llegan a impulsos nerviosos y transmitirlos al cerebro a través del nervio óptico.

Sabiendo la importancia de este órgano en el ser humano y que el proyecto desarrollado se basa en este órgano, en este anexo, se va a realizar una breve exposición de las partes que componen el ojo humano. Estudiaremos los órganos que lo conforman, sus diferentes capas y sus principales funciones. Mención especial merece, por su elevado interés para este proyecto, la cornea y las diferentes capas que la forman.

A.2. Globo ocular

El globo ocular es el órgano de la visión cuya estructura esférica es de aproximadamente 2,5 cm de diámetro con un marcado abombamiento sobre su superficie anterior A.1. El globo ocular se divide en tres zonas según su situación: capa externa, capa media y capa interna.

A.3. Capa externa

La capa más externa o esclerótica tiene una función protectora, cubre unos cinco sextos de la superficie ocular y se prolonga en la parte anterior con la córnea transparente. Las principales características de la capa externa o fibrosa vienen dadas por las propiedades de los tejidos que la componen. Se trata de una estructura resistente, opaca en el segmento posterior y transparente en el anterior. En ella podemos encontrar la esclera, la cornea y el limbo.

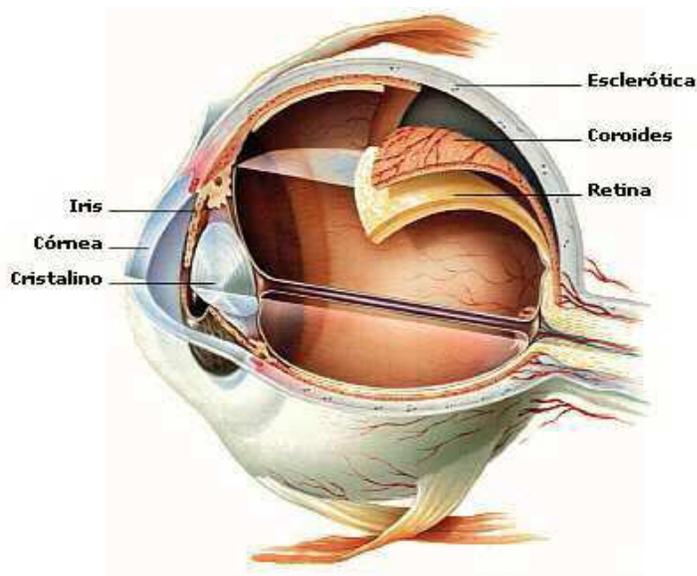


Figura A.1: Representación del globo ocular

A.3.1. La esclera

La esclera, o membrana esclerótica, constituye las tres cuartas partes de la superficie del globo ocular. Es una cubierta de una forma esférica con un diámetro promedio de 22 mm. Su espesor varía dependiendo de la zona donde se tome referencias; en el limbo 0,8 mm, en el ecuador 0,4 a 0,5 mm, cerca al nervio óptico, inmediatamente posterior a la inserción de los tendones musculares 0,3 mm mientras que en la inserción es de 0,6 mm. La esclera es de color blanquecino y está formada por haces conjuntivos con fibras elásticas de colágeno muy resistentes, dándole al globo ocular su consistencia y haciendo de esta membrana una especie de cápsula protectora y siendo el verdadero esqueleto del ojo.

En la proximidad de la córnea, la esclera se halla en relación con las inserciones de los músculos del globo ocular y en su periferia se recubren por la cápsula de Tenon o vaginal del bulbo ocular. A su vez, la esclera está formada por tres capas de tejido bien diferenciadas, entre las que se encuentran:

- La episclera** es una delgada capa fibrovascular con haces sueltos de colágeno situada en la parte más superficial de la membrana esclerótica. Su cometido principal es el de proporcionar el suministro nutritivo al resto del globo ocular.

- El estroma escleral** es la más gruesa de las tres y realiza principalmente una función de protección. Está compuesta por haces de colágeno de tamaño variable.

- La lámina fusca** está formada por una capa fibrosa de color marrón compuesta de pequeñas fibras de colágeno. Se encuentra situada en la parte posterior y es atravesada por un gran número de perforaciones que permiten el paso del nervio óptico y los vasos centrales de la retina, de naturaleza fibrosa pero transparente.

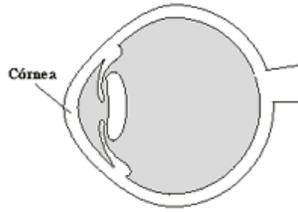


Figura A.2: Representación de la córnea en el ojo

A.3.2. La cornea

La córnea es la parte más exterior del globo ocular y es la superficie refractante principal del ojo (Figura A.2). Actúa como una lente convergente debido a su membrana transparente y a su curvatura regular. Su forma consiste básicamente en una lente cóncavo-convexa con una cara anterior, en contacto íntimo con la película lagrimal precorneal, y otra cara posterior, bañada por el humor acuoso. Estas relaciones permiten a la córnea carecer de vascularización, pues estos líquidos son los máximos responsables de mantener sus requerimientos fisiológicos. Además de función óptica, la cornea protege la superficie anterior del ojo frente a traumatismos.

En la periferia de la córnea existen vasos sanguíneos y linfáticos y un plexo nervioso, cuyas ramificaciones se extienden por toda la córnea. Posee un diámetro de entre 11 y 12 milímetros y su espesor varía en función de la distancia al limbo, desde 650 micras reduciéndose a las 550 en el centro de la misma. Su forma no es exactamente circular sino elíptica, siendo ligeramente más alargado en eje nasal-temporal que el superior-inferior. La córnea, a su vez, está formada por cinco capas (Figura A.3):

- **El epitelio corneal:** Es la capa que sirve a la córnea de protección externa. Se trata de una capa de epitelio pavimentoso poliestratificado que contiene entre 5 y 7 capas celulares de epitelio escamoso estratificado, con un grosor total de 50-56 μm . En la zona periférica el número de capas aumenta a 8-10. Aunque tiene mucho en común con el epitelio conjuntival, se puede decir que son los 123 μm^2 más especializados de la superficie corporal, manteniendo la transparencia y las características refractivas sobre un tejido conectivo avascular. Además de estas propiedades, mantiene una actividad metabólica y de barrera a los agentes externos, presentando una fuerte resistencia a la abrasión y una rápida capacidad de cicatrización. Dentro del epitelio, se distinguen tres tipos celulares escamosas, en la superficie, intermedias y basales. Entre todas ellas existen unas uniones intercelulares muy desarrolladas con membranas celulares interdigitadas, que le confieren una gran estabilidad al epitelio. Las células escamosas o apicales son de forma poligonal y toman dos posibles aspectos al ser estudiadas por microscopía electrónica de barrido: las células claras son células más jóvenes, mientras que las células oscuras se admite que son hiper maduras, próximas a la descamación. El epitelio corneal está fijado firmemente a la capa inmediatamente inferior, conocida como la membrana de Bowman, por medio de una membrana basal continua.
- **Lámina elástica anterior o membrana de Bowman:** Esta membrana de 8-12 μm de grosor está constituida por fibrillas de colágeno (tipos I, III, V y

VI) muy delicadas. Se sitúa entre el epitelio y el estroma y su terminación en la periferia corneal marca el borde anterior del limbo esclerocorneal. Su unión con las del estroma se hace de forma imperceptible, pero existe una evidente delineación con la membrana basal. Aunque se ha otorgado gran importancia a la membrana de Bowman en el mantenimiento de la transparencia corneal, lo cierto es que tras su ablación con láser la claridad corneal se mantiene, así como la adherencia epitelial.

- **El estroma:** El estroma constituye la estructura principal de la córnea representando el 90% del espesor de la misma. Su grosor central es de 0,5-0,54 mm, siendo mayor en la periferia en donde alcanza hasta 0,7 mm. Es dura y transparente y se encuentra situada entre las láminas anterior y posterior. Está formada por un material de relleno blando en el que se encuentran una gran cantidad de fibrillas paralelas de colágeno que le confieren a la córnea la mayor parte de su rigidez.
- **Membrana de Descemet:** También conocida como lámina elástica posterior y es una membrana homogénea y fina (8-12 μ m) que se mantiene tenuemente unida al estroma. Es rica en glicoproteínas, laminina y colágeno IV, que le confieren una gran elasticidad y resistencia, mayor que el estroma ante agresiones traumáticas o inflamatorias. Está situada entre el endotelio y el estroma.
- **Endotelio corneal:** Se trata de una monocapa de epitelio pavimentoso no estratificado de células cuboideas que forman un mosaico hexagonal recubriendo la totalidad de la cara posterior de la córnea. La principal función que desempeña esta membrana es la impermeabilización hacia el interior, evitando de este modo las entradas al interior del globo ocular.

A.3.3. El limbo

El limbo es una membrana fibrosa que está situada por delante de la esclera, formando un resalte, haciendo la zona de transición entre la córnea y la esclera. Esta compuesta por fibras de colágeno que le dan rigidez siendo ésta superior a la cornea.

A.4. La capa media

La capa media o úvea tiene a su vez tres partes diferenciadas:

- La coroides (muy vascularizada) reviste las tres quintas partes posteriores del globo ocular.
- El cuerpo ciliar esta formado por los procesos ciliares.
- El iris se extiende por la parte frontal del ojo.

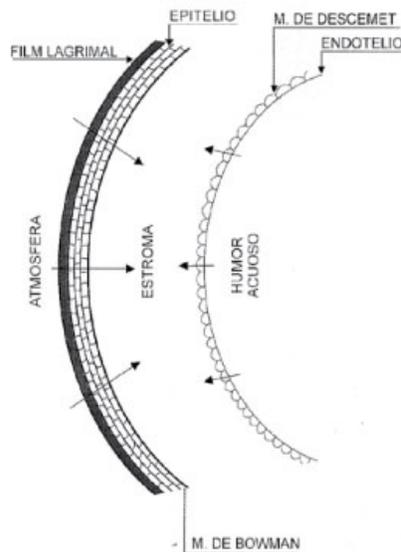


Figura A.3: Representación de la sección de la cornea

A.4.1. La uvea posterior o coroides

La úvea posterior o coroides está situada entre la retina y la esclera, y llega por delante hasta el cuerpo ciliar, ocupando en total las tres quintas partes posteriores del globo ocular. Es una membrana conjuntiva muy rica en vasos, fuente de nutrición y de reservas del ojo, que reviste el globo ocular por dentro, cuya cara externa es negra y brillante, debido a las células pigmentadas que contiene (actúan como pantalla ante la luz). Su función principal es el aporte sanguíneo a las capas más externas de la retina.

A.4.2. Cuerpo ciliar

El cuerpo ciliar es una estructura muscular y fibrosa, situada alrededor del cristalino en forma de anillo, que limita por detrás con la coroides y por delante con el iris. Sus funciones principales son contraer y dilatar sus fibras musculares, controlando el espesor del cristalino (músculo ciliar). También segrega el humor acuoso, y contribuye a su drenaje.

Está formado por:

- Músculo ciliar, es un reborde formado por fibras lisas dispuestas longitudinal y anularmente, que se insertan en el borde anterior de la esclerótica. Su contracción produce relajación del ligamento suspensorio del cristalino, con lo que éste adopta una forma abombada, proceso fundamental en la acomodación del ojo.
- Porción epitelial :
 - Capa epitelial pigmentaria externa, se continúa por detrás con el epitelio pigmentario retiniano.

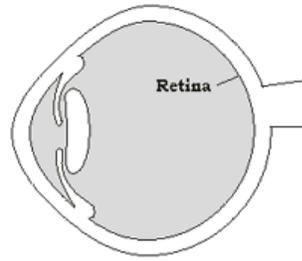


Figura A.4: Representación de la retina en el ojo

- Capa epitelial interna, no pigmentada. Son 70 u 80 pliegues delgados que emergen de la cara interna del cuerpo ciliar y se disponen radialmente alrededor del cristalino. Su misión es segregar el humor acuoso en la cámara posterior.

A.4.3. El iris

El iris es un diafragma circular ubicado en un plano frontal (segmento anterior de la membrana vascular) que controla la introducción de luz en el globo ocular. Tiene un espesor de 0.3 milímetros y un diámetro de 12. Su forma es ligeramente cóncava y presenta relieves radiales y puede tener colores diversos, azul, pardo, verde, negro, etc. Se encuentra atravesado por un orificio central llamada pupila.

Su circunferencia se continúa con el cuerpo ciliar a nivel del limbo. Si la luz es intensa y durante la visión cercana la pupila se achica, lo que se conoce como miosis. Por contra si la luz es débil y durante la visión lejana la pupila se agranda (migrasis).

Presenta dos caras bien diferenciadas. La anterior es brillante y se encuentra limitada en la periferia por un anillo coloreado externo y en el centro por el anillo pupilar. En la unión de su tercio interno con los dos tercios externos se advierte una línea quebrada, el collar, que corresponde al límite de reabsorción de la membrana pupilar. El aspecto del iris es fibrilar. En ciertos casos el iris está desprovisto de pigmentos y su estructura radial es bien visible, resultante de color azul claro, mientras que en otros está cargado de pigmento y la estructura no es visible, entonces aparece liso y de color oscuro. Por otro lado, la cara posterior es de color negro y está aplicada contra la cara anterior del cristalino.

A.5. Capa interna

Es la capa más profunda, y en la que realmente se realiza el proceso de la visión, ya que es donde se encuentra el tejido neuroepitelial, que forma parte del sistema nervioso central, y que ésta, a su vez, está conectada con el cerebro por el nervio óptico. El órgano principal que compone esta capa es la retina (Figura A.4).

La retina es una fina cutícula transparente, con un alto consumo de oxígeno. Está compuesta de dos unidades funcionales:

- Epitelio pigmentario retiniano externo, es una capa simple de células hexagonales que se continúa con el epitelio pigmentario del cuerpo ciliar en la Ora

Serrat.

- Retina sensorial interna, es una hoja delicada de tejido transparente que varía de espesor entre 0,4 mm cerca del nervio óptico y unos 0,15 mm por delante de la Ora Serrata. La Ora Serrata es la porción más anterior y periférica de la retina, en la cual ésta entra en contacto con otra estructura del ojo que se llama cuerpo ciliar.

Dentro de estas unidades funcionales se distinguen diez capas:

1. Epitelio pigmentario, formado por células cúbicas que contienen un pigmento ferroso llamado fuscina.
2. Células fotorreceptoras, entre las que se encuentra los conos y los bastones.
3. Membrana límite externa, formada por las células de Müller.
4. Nuclear externa, que contiene los cuerpos celulares de los conos y bastones en cargados de transformar al energía luminosa en impulsos nerviosos.
5. Plexiforme externa, que comprende las articulaciones de las células visuales con las bipolares.
6. Nuclear interna, que contiene las células bipolares junto con células amacrinas, células de unión horizontal.
7. Plexiforme interna, que contiene las articulaciones de las células bipolares y multipolares y prolongaciones de las amacrinas.
8. Células ganglionares, formada por los cuerpos de las células multipolares.
9. De fibras nerviosas, formada por neuritas de las células multipolares que van a formar el nervio óptico y algunas fibras centrífugas procedentes del cerebro.
10. Limitante interna, formada por la unión de los pies de las fibras de Müller.

Los fotorreceptores que contiene la capa nuclear externa, conos y bastones, son capaces de captar y transformar la energía luminosa del espectro visible en impulsos nerviosos. Los conos son poco sensibles a la luz y requieren gran intensidad luminosa para su funcionamiento por lo que son las células óptimas para la visión diurna, permitiendo la discriminación de las formas y del color según sus pigmentos, sensibles al rojo, al amarillo o al azul. Los bastones, mucho más abundantes, tienen un bajo umbral de excitación y de ellos depende la visibilidad y la detección de movimiento en la oscuridad, pero sólo perciben en blanco y negro. Las células bipolares de la capa nuclear interna son las primeras neuronas intercaladas entre los fotorreceptores y las neuronas ganglionares.

En la siguiente capa las células ganglionares o multipolares representan las segundas neuronas de la vía óptica. Sus axones convergen hacia un punto de la retina, la papila, y juntos atraviesan todas las capas de la retina que están por encima, a la coroides y a la esclera en el área cribosa posterior, formando el nervio óptico. La

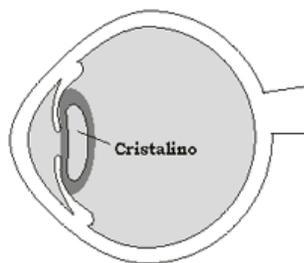


Figura A.5: Representación del cristalino en el ojo

estratificación de la retina está presente en casi toda su superficie, pero desaparece en la zona anterior, donde sólo se conserva el estrato pigmentario fundido con la coroides, con el cuerpo ciliar y con el iris. Esta retina residual, carente de fotorreceptores y neuronas, recibe el nombre de retina ciega. La zona de transición entre la retina sensorial y la ciega es la Ora Serrata, línea de aspecto festoneado situada por detrás de los procesos ciliares.

A.6. Medios refrigerantes

En el ojo existen diferentes medios refrigerantes entre los que se encuentra la córnea que pertenece a la capa externa del ojo y a la que corresponde la mayor parte de la capacidad refrigerante (aproximadamente el 75 %). También existen en el globo ocular otros órganos que colaboran en el proceso enfoque de la luz incidente. Los órganos refringentes son el cristalino, la córnea, el humor acuoso y el cuerpo vítreo. A continuación se explica brevemente el papel que juegan cada uno de ellos.

A.6.1. El cristalino

Es un órgano de acomodación con forma de lente biconvexa situada entre el iris y el cuerpo vítreo que mide 10 milímetros de diámetro por 5 de espesor (Figura A.5). Su peso está entre los 0.2 y los 0.25 gramos. Es la segunda superficie refractiva en importancia, después de la córnea. Incoloro y transparente al principio, va tomando poco a poco una coloración ambarina. Su índice de refracción aumenta con la edad.

Está mantenido en su posición por un sistema de fibrillas, zónula ciliaris o zónula de Zinn, que sirve para transmitir al cristalino la acción del músculo ciliar, y envuelto por una cápsula cuticular homogénea llamada cristaloides.

El cristalino está formado por una cápsula más gruesa por delante que por detrás, una corteza y un núcleo. En la cara anterior de la corteza existe un epitelio cristalino que forma nuevas células alargadas o fibras durante toda la vida, que se van empaquetando concéntricamente hacia el núcleo. Su cara posterior es más convexa que la anterior pero su curvatura puede variar gracias a su elasticidad según se emplee el ojo para la visión cercana o lejana, proceso conocido como acomodación. El cristalino se mantiene en su posición gracias al ligamento suspensor llamada zónula ciliar.

La Zónula es una membrana anular que se inserta en el ecuador del cristalino y

en estado normal lo aplana. Cuando el músculo ciliar se contrae, relaja la zónula con lo cual aumenta la convexidad de sus caras y así se logra enfocar los objetos.

Esta zónula está constituida por fibras transparentes que se extienden desde la retina cilioiridiana y del cuerpo ciliar hasta el ecuador del cristalino. En reposo la zónula está tensa y el cristalino regulado para la visión lejana. Para la visión cercana el músculo ciliar se contrae, con lo que la zónula se relaja permitiendo el aumento de la convexidad del cristalino con lo que crece su graduación óptica. La forma biconvexa del cristalino hace que la luz que lo atraviesa se invierta incidiendo así sobre la retina: la luz procedente del campo visual superior incide sobre los cuadrantes inferiores de la retina y al revés, la luz que llega al ojo desde campos inferiores estimula los cuadrantes superiores de la retina.

Referido a los campos laterales, la luz de la mitad externa del campo visual impresiona la mitad interna o nasal de la retina, mientras que la luz que llega de la mitad medial de campo visual es recogida en la mitad externa o temporal de la retina. Con los dos ojos abiertos, la mitad derecha del campo visual impresiona la mitad externa o temporal de la retina izquierda y la mitad interna o nasal de la retina derecha, mientras que la mitad izquierda del campo visual se proyecta sobre la retina temporal del ojo derecho y la retina nasal de ojo izquierdo.

A.6.2. El humor acuoso

Es un líquido alcalino transparente y fluido que ocupa las cámaras anterior y posterior del ojo. Limitado por delante por la córnea y por detrás por el iris, y la cámara posterior, comprendida entre el iris y el cristalino, se comunican por la pupila.

La cámara anterior separa el iris de la córnea y posee la forma de una pequeña lente muy convexa hacia adelante y casi plana hacia atrás y su profundidad es de 2 milímetros. Por otra parte, la cámara posterior es de dimensiones muy reducidas y separa el iris del cristalino. El humor acuoso es la principal fuente de oxígeno y nutrientes para el cristalino y secundaria, después de la lágrima, para la córnea. El humor acuoso es segregado por los procesos ciliares y circula continuamente desde la cámara posterior a la anterior, de ésta al espacio de Fontana, del que pasa al conducto de Schlemm, que lo evacua hacia las venas escleróticas. Del equilibrio entre la formación y drenaje del humor acuoso depende el mantenimiento de una presión intraocular adecuada para mantener la estructura y función del ojo.

A.6.3. El cuerpo vítreo

El cuerpo vítreo es una sustancia gelatinosa e incolora que llena la parte posterior del globo ocular, entre la retina y la cara posterior del cristalino. Representa el 80 % del volumen del globo ocular. Funcionalmente, el cuerpo vítreo colabora en el mantenimiento de la forma esférica del ojo, contribuye a la fijación de la retina sobre la coroides, evitando posibles desprendimientos de la retina por su función protectora y de amortiguación. Además, aporta al ojo cierto poder dióptrico gracias a su transparencia. Externamente tiene una mayor consistencia formando la membrana hialoidea. En la parte anterior el gel está excavado para permitir el apoyo del cristalino sobre lo que se conoce como fosa lenticular. Desde la papila hasta el cristalino, el

cuerpo vítreo está atravesado por el conducto hialoideo de Cloquet, resto embrionario de la arteria hialoidea que nutría el cristalino.

A.7. Los órganos anexos

A.7.1. La membrana conjuntiva

La capa conjuntiva es una membrana mucosa, delgada y transparente que reviste los párpados por detrás y la superficie anterior del globo ocular. La región circular, donde la conjuntiva del párpado se refleja para aplicarse sobre el globo ocular, constituye el fondo de saco conjuntival. En la región del ángulo interno del ojo, la conjuntiva se continúa con la carúncula lagrimal y el repliegue semilunar. La carúncula lagrimal es un mamelón mucoso, que contiene tejido conjuntivo laxo, con glándulas sebáceas y sudoríparas, y folículos pilosos. El repliegue semilunar de la conjuntiva está situado por fuera de la carúncula y oculto en gran parte por los párpados. Éste, es un vestigio del tercer párpado o membrana nictitante de los vertebrados inferiores. Tiene la función de barrera contra infecciones oculares y gracias a la mucina, que la segregan sus glándulas, contribuye a constituir la capa mucosa de la lágrima. La parte de la conjuntiva que recubre la esclera recibe el nombre de conjuntiva bulbar, mientras que la conjuntiva tarsal o palpebral es la que recubre el interior de los párpados.

A.7.2. La cápsula de Tenon

La cápsula de Tenon es fibrosa y abraza toda la porción esclerótica del ojo, desde el nervio óptico a la córnea. Es de consistencia flexible y elástica y atravesada por el nervio óptico, los vasos y nervios ciliares y los músculos del ojo. Facilita vainas aponeuróticas a los músculos del ojo, de las que parten expansiones aponeuróticas muy resistentes que se insertan en las paredes de la cavidad orbitaria, fijando el ojo.

A.8. Los músculos

EL globo ocular posee un grupo de músculos estriados y voluntarios situados externamente que le permiten movimientos de orientación y exploración visual en todas las direcciones del espacio: verticales, horizontales, oblicuos y de convergencia, aislados o asociados a los movimientos de la cabeza y el cuello. Los movimientos oculares se caracterizan por ser conjugados, es decir, simultáneos y en la misma dirección en ambos ojos, para permitir una visión binocular que dé lugar, a la vez en ambos ojos, a una imagen de igual forma, tamaño y color que pueda percibirse como única.

Estos músculos se clasifican en (FiguraA.6):

- **Músculos rectos:** Nacen en el fondo de la cavidad orbitaria alrededor del nervio óptico y se dirigen en forma divergente al contorno del globo ocular, donde se fijan a la esclera.

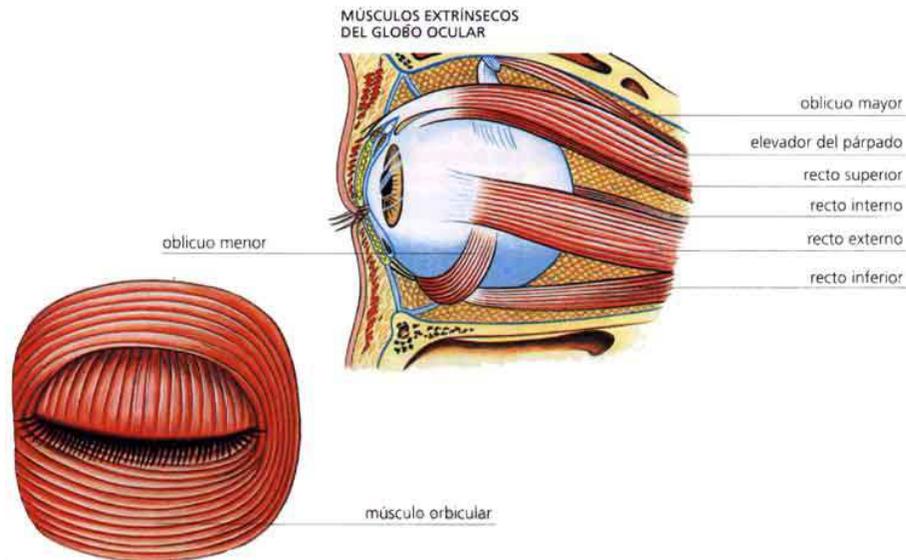


Figura A.6: Representación de los músculos que actúan en el ojo

- Medio o interno: Adductor.
- Lateral o externo: Abductor.
- Superior: Elevador.
- Inferior: Depresor.

■ **Músculos oblicuos Superiores:**

- Adductor y depresor: Se inserta por detrás del nervio óptico, entre los rectos superior e interno, y se dirige adelante hasta la parte superior del globo del ojo.
- Inferior: Abductor y elevador. Nace de la parte inferior de la órbita, se dirige hacia afuera y se inserta sobre la parte externa de la esclera. Según su acción se agrupan en tres pares:

- Par recto interno - recto externo: giran el ojo alrededor de un eje vertical.
- Par recto superior - recto inferior: lo hacen alrededor de un diámetro algo oblicuo respecto a la horizontal.
- Par oblicuo superior - oblicuo inferior: de los cuales el superior lleva la córnea abajo y afuera, y el inferior, arriba y afuera.

De la acción combinada de los seis músculos del ojo resulta la rotación en todos los sentidos. Sin embargo, el desplazamiento está impedido por acción del cuerpo adiposo que rellena la órbita y al conjunto de fascias, interconexionadas entre sí, que retienen firmemente el globo en el interior de la órbita.

A este propósito, los músculos extrínsecos tienen una vaina fibrosa común llamada la fascia muscular. Estos músculos y fascia forman una especie de embudo que alberga el globo ocular, nervios y vasos. Esta envoltura se continúa con la cápsula de Tenon, que rodea el ojo desde el nervio óptico hasta el limbo esclerocorneal y le aísla del

resto del contenido orbitario proporcionándole la cavidad o espacio episcleral en la que se mueve. Por detrás, la fascia es muy fina y está perforada por los elementos que entran o salen del globo ocular. Otras expansiones o fascias se dirigen a la conjuntiva, a los párpados y al reborde orbitario; la fascia palpebral a desde los párpados hasta el reborde orbitario fijando, a modo de ligamento de contención, el globo ocular a la órbita.

Apéndice

B

Cirugía de la queratoplastia

B.1. Introducción

La córnea es una estructura transparente y curva localizada en la parte anterior del ojo, que actúa como lente para enfocar las imágenes en la retina. Al estar localizada en el exterior, sufre frecuentemente lesiones provocadas por agentes externos, tales como traumatismos, infecciones, etc., que dañan su transparencia y afectan a la visión. La cirugía refractiva es aquella que corrige la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo por medio de técnicas quirúrgicas

En los inicios, las operaciones de cirugía refractiva para la corrección de defectos de visión estaban basadas en la experiencia acumulada durante años por los cirujanos, fundamentalmente en el conocimiento adquirido para determinar qué tipo de operación y qué parámetros es necesario ajustar para conseguir un resultado óptimo. La aparición de las mediciones topográficas y la aplicación de la tecnología láser a la corrección de los defectos de visión, supusieron un gran avance. Esto hace posible, en algunas de las operaciones, la eliminación del factor humano a la hora de determinar la geometría del corte y de realizar las incisiones sobre la superficie corneal, permitiendo de este modo aumentar la precisión y minimizar los errores. De esta forma con el corte diseñado, se consigue que sea lo más parecido posible al que se desea realizar para corregir el defecto de visión que presentaba el paciente. Sin embargo, hay todavía algunos tipos de intervenciones en las que la determinación del tipo de corte y la realización del mismo sigue subordinada a la experiencia del cirujano, al uso de nomogramas o bien, a la aplicación de modelos matemáticos teóricos que en ocasiones, no son capaces de reproducir las condiciones exactas de la córnea de cada paciente.

Uno de estas mejoras en la cirugía fue la utilización del Láser. El Láser Intralase Femtosegundo (FSL) supone el último avance tecnológico dentro del campo de la Cirugía Refractiva y de la Cirugía Corneal. En el aspecto refractivo toma el relevo del láser excimer y en el aspecto terapéutico ha cambiado por completo el enfoque. El láser de femtosegundo (FSL) es un láser ultrarrápido ($1 \text{ fs} = 1 \times 10^{-15} \text{ s}$) que permite realizar cada cirugía con una precisión inigualable. Como trabaja a 60.000 ciclos por

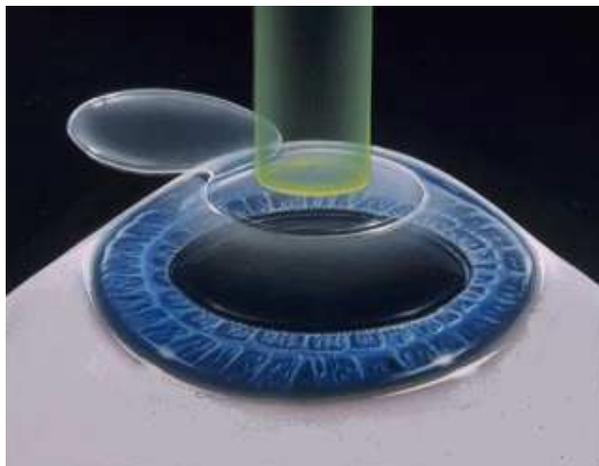


Figura B.1: Representación de la actuación de láser LASIK en córnea

segundo, permite mantener la velocidad del microquerátomo. El láser de femtosegundo opera con pulsos programados de gran magnitud, alternados con pulsos de menor energía para producir la separación y el corte controlado del tejido a tratar. A pesar de esta liberación de energía no se producen quemaduras en los tejidos vecinos. El láser de femtosegundo permite realizar la cirugía refractiva de LASIK sin cortes de cuchilla, actuando en combinación posterior con el excimer láser (Figura). Los cortes realizados con cuchillas pueden generar complicaciones, como cortes incompletos, dejar restos metálicos de las cuchillas, hacer cortes irregulares con espesores variables, etc. Con el láser de femtosegundo éstas se reducen drásticamente.

El láser de Femtosegundo mejora los pasos quirúrgico debido a su mayor calidad óptica y que produce un corte corneal de espesor uniforme, que se adapta perfectamente a la curvatura de la córnea humana. También proporciona una mayor seguridad ya que éste, no tiene que soportar un aumento brusco de presión, y por lo tanto, el número de complicaciones disminuye. También, tiene una mayor precisión debido a su alta tecnología que nos permite obtener cortes en la córnea de espesor predeterminado con una precisión mucho mayor. Otra característica del láser de femtosegundo es que tiene una mayor comodidad al no precisar contacto directo con el ojo para realizar el corte en la parte anterior de la córnea. Además, actúa de fuera a dentro de la córnea, por lo que el paciente no pierde la visibilidad del punto de fijación.

Las posibilidades de actuación del FSL sobre al córnea se puede resumir en las siguientes:

- Queratomía lamelar en el procedimiento LASIK.
- Queratomías arqueadas.
- Tunelización de la córnea para implante de segmentos intracorneales.
- Cirugía refractiva invasiva y no invasiva.
- Queratoplastias lamerales y penetrantes.



Figura B.2: Representación del de la queratoplastia en cornea: 1º/Se retira la cornea dañada (falta de transparencia), 2º/Se coloca la nueva córnea sana, 3º/Se realizan las suturas

La gran beneficiada de esta tecnología de femtosegundo es la cirugía del trasplante de cornea en la que se han descrito múltiples diseños de corte para trepanación de las córneas receptoras y donantes. Con estos nuevos diseños, se intenta mejorar la unión de los tejidos y facilitar una rápida recuperación visual del paciente. Las queratoplastias lamelares o penetrantes pueden convertirse en técnicas personalizadas en función de las características de la patología en cuestión, y los resultados prometen ser los mejores que con las técnicas de trepanación clásicas.

Los problemas típicos de los métodos clásicos de trepanación se pueden resumir en cuatro apartados. La necesidad de una estanqueidad de la incisión a base de una mayor tensión de sutura, el largo proceso de cicatrización, la lenta recuperación visual y el alto astigmatismo postoperatorio, con frecuencia irregular. El FSL es capaz de crear cortes personalizados con el fin de obtener una mejor unión entre el donante y el receptor. De esta forma se mejora la resistencia de la cicatriz, se consigue una rehabilitación más rápida y probablemente un menor astigmatismo residual. Combinando entre sí, las posibilidades de corte del FSL, se pueden obtener múltiples diseños de queratoplastia, tantas como cirujanos imagine. Con esto se quiere conseguir:

- Mejorar la estructura del botón donante.
- Disminuir la tensión de las suturas para inducir menos astigmatismo.
- Retirar las suturas en el menor tiempo posible.
- Recuperar la agudeza visual también en el menor tiempo posible.

Además, la técnica que maneja el láser permite realizar un programa de corte que produce incisiones más selladas y herméticas. Estas características minimizan el uso de suturas y produce una cicatrización más fuerte. Al ser menor la cantidad de puntos, también disminuye el astigmatismo posquirúrgico.

B.2. Queratoplastia

La queratoplastia o también conocida como trasplante de córnea es una técnica quirúrgica mediante la cual se sustituye tejido corneal dañado de un paciente por tejido sano procedente de una donación (Figura B.2). La LTK (abreviatura en inglés

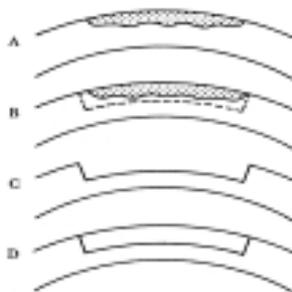


Figura B.3: Representación de la queratoplastia Lamelar: (a)/Cornea con tejido dañado. (b)/Corte de la córnea dañada. (c)/Córnea tras la extracción del tejido dañado. (d)/Cornea con el trasplante de tejido sano.

de Laser Thermal Keratoplasty) es una técnica de remodelación del tejido corneal para mejorar la visión sin gafas o lentes correctivas.

El grado de éxito de esta cirugía, además de su aumento en la calidad de visión del paciente depende de la gravedad del trastorno y de la aceptación que presente el paciente por el injerto. La queratoplastia puede ser total o parcial dependiendo de la enfermedad visual y de las capas de la cornea que se encuentren dañadas.

Existen diferentes tipos de queratoplastias, en general, se pueden clasificar según la profundidad en Lamelar (trasplante parcial) y Penetrantes (trasplante total).

B.3. Queratoplastia lamelar

La Queratoplastia lamelar es un trasplante parcial de las capas anteriores o en algunos casos medias de la cornea afectada (Figura B.3). Esta cirugía representa uno de los procedimientos más seguros, ya que no elimina las capas más profundas de la cornea y en la mayoría de los casos las enfermedades visuales se producen en las capas externas, por lo que la hacen la opción más recomendable en enfermedades menos severas o con menor avance. Según la profundidad de las capas dañadas y en consecuencia, el grosor del botón a transplantar, la queratoplastias se denominan:

B.3.1. Queratoplastia Endotelial

Consiste en reemplazar el endotelio, preservando las capas más externas de la cornea, está indicada para pacientes con trastornos con mayor avance y que produzcan un deterioro de este tejido.

B.3.2. Queratoplastia Lamelar Anterior Superficial

En estos casos se pretende sustituir una lamela superficial de la cornea cuando únicamente el 1/3 anterior córnea está comprometida, es decir, aproximadamente 150-200-250 micras. Lógicamente, la principal indicación es la opacidad de la córnea en sus capas anteriores, especialmente si la paquimetría es uniforme, es decir que no

haya zonas de pérdida de sustancia. Habitualmente suelen ser opacidades relacionadas con antiguas infecciones o con ligeros traumatismos. Otras posibles causas son:

- Opacidades no inflamatorias e inflamatorias en general
- Traumatismos
- Cicatrices antiguas de origen infeccioso
- Distrofias hereditarias anteriores (granular, cristalina lattice, Salzmann..)
- Algunos casos de queratocono y de generación marginal pelúcida
- Herpes superficial inactivo y avascular
- Post-cirugía refractiva en general
- Haze después de PRK
- Complicaciones del Flap después de LASIK
- Astigmatismos irregulares

El FSL se programa para actuar a la profundidad y diámetros deseados. Se empieza creando un corte horizontal por debajo de la opacidad corneal y posteriormente la trepanación hacia la superficie. Este corte vertical se realiza en dirección postero-anterior partiendo de la interfase inicial y llegando al epitelio.

Las suturas pueden retirarse tan pronto como se haya establecido una buena reepitelización (8-10 días) aunque hay cirujanos que están poniendo en práctica un método sin realizar suturas en el injerto con una muy buena supervivencia.

B.3.3. Queratoplastia Lamelar Anterior Profunda

Se realiza cuando el endotelio no está comprometido en la patología corneal y requiere quitar la mayor parte de la córnea superior. En esta zona, se coloca un injerto al cual se le ha retirado el Endotelio. El estroma receptor que se obtiene es de buena calidad. Los resultados son buenos y las suturas pueden retirarse entre los 3 y los 6 meses tras el postoperatorio.

En principio son fáciles de realizar. En la mayoría de las ocasiones el láser de femtosegundo llega con facilidad a profundidades entre 300-400 micras. Sin embargo se piensa que la calidad visual cuando persiste un estroma residual es inferior a la que se consigue cuando se elimina por completo, y por este motivo, este tipo de queratoplastia están siempre cuestionadas.

El tejido que se obtiene en lamelares anterior profundas con IntraLase es a una profundidad de 400 micras. La curvatura anterior de la córnea sufre una aplanación que se transmite a las capas profundas originando las típicas ondulaciones del estroma. Sin embargo tratamientos realizados con Femtec o VisualMax, por tener el cono de aplanación curvo, demuestran una buena calidad de la interfase como se puede apreciar en estudios realizados con OCT-Visante.

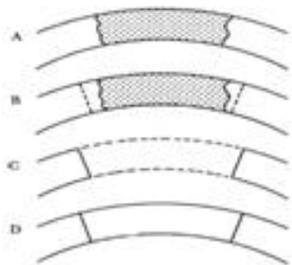


Figura B.4: Representación de la queratoplastia Penetrante: (a) Cornea con tejido dañado. (b) Corte de la córnea dañada. (c) Córnea tras la extracción del tejido dañado. (d) Cornea con el transplante de tejido sano.

B.3.4. Queratoplastia Lamelar Anterior Profunda Predescemáticas

Las queratoplastias lamelar anterior profunda predescemáticas (DALK) es muy difícil llegar con fiabilidad a un plano pre-descemético y eliminar la totalidad del estroma. Sería necesario tener, y en ello están trabajando alguna de las tecnologías de FSL, una referencia intraoperatoria endotelial, para ajustar al máximo la profundidad del corte, en vez de tener como referencia el plano epitelial. Esta técnica quirúrgica es laboriosa, requiere la disección por capas hasta alcanzar la membrana de Descemet, lo que puede producir algún problema y los resultados serían parecidos si se realizara una queratoplastia penetrante.

B.4. Queratoplastia de Espesor Total o Penetrante

Este tipo de queratoplastia se realiza cuando todas las capas de la córnea están afectadas y requiere sustituir todo el grosor de la córnea (Figura B.4). El diámetro de los injertos oscila entre 7.0 y 9.0 mm según el área de compromiso corneal (PALOMINO [2008]). Se sutura con puntos separados borde a borde o con sutura continua de poliamidas (Nylon). La cicatrización es lenta y los puntos se retiran entre los 6 y los 12 meses de post-operatorio.

Los problemas típicos de los métodos clásicos de trepanación se pueden resumir en cuatro apartados. La necesidad de una estanqueidad de la incisión a base de una mayor tensión de la sutura, el largo proceso de cicatrización, la lenta recuperación visual y el alto astigmatismo postoperatorio, con frecuencia irregular.

El FSL es capaz de crear cortes personalizados con el fin de obtener una mejor unión entre el donante y el receptor. De esta forma se mejora la resistencia de la cicatriz, se consigue una rehabilitación más rápida y probablemente un menor astigmatismo residual. Combinando entre sí las posibilidades de corte FSL, se puede obtener múltiples diseños de queratoplastias. Para mejorar la cirugía se debe intentar estudiar:

- Mejorar la estructura del botón donante.
- Disminuir la tensión de las suturas para inducir menos astigmatismo.

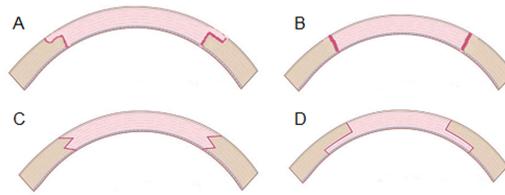


Figura B.5: Representación de los diferentes tipos de corte en la queratoplastia penetrante: A/ Corte Mushroom B/ Corte circular recto C/ Corte Zig-Zag D /Corte Top Hat

- Retirar las suturas en el menos tiempo posible.

Obtención del botón donante: córnea de espesor completo

La trepanación para obtener el botón donante se realiza en dirección del endotelio-epitelio y habitualmente del mismo diámetro que se hará la trepanación del receptor. En este sentido, se cree que es mejor realizar el diámetro ligeramente mayor (0,2 mm) para compensar las retracciones que se producen en el botón donante, el tiempo que pueda transcurrir desde el tallado hasta el implante en el ojo receptor. El ángulo de corte aconsejable es de 90° con respecto a la superficie de la córnea.

Existen diferentes tipos de corte para la obtención del botón donante. De esta forma se pretende conseguir mayor superficie de contacto entre ambas córneas y mejorar la seguridad frente a un trauma, la rapidez de cicatrización y la consistencia de la cicatrización. Se han desarrollado varios diseños en profundidad del corte circular. Se presenta una extensa serie de queratoplastias con los diseños más habituales que se comentan a continuación(Figura B.5).

B.4.1. Queratoplastia Penetrante con corte circular recto

Este tipo de queratoplastia es la más simple e inicialmente la más común, pero está perdiendo terreno frente a otro tipo de cortes por su mayor poder de cicatrización. En comparación con la técnica del FSL que no aporta demasiadas ventajas, el corte con láser respeta mejor la biomecánica corneal al poder realizarlo con una angulación de 90° con respecto a la superficie corneal. De esta manera, la cornea donante encaja con más precisión en la cornea receptora, mejorando la curvatura corneal post-operatoria y disminuyendo la necesidad de apretar la sutura, con lo que es de esperar que el astigmatismo residual sea inferior.

B.4.2. Queratoplastia Penetrante con corte Top Hat

El corte 'top hat' (Figura B.6) está indicado especialmente en córneas edematosas de espesor uniforme, típicamente las secundarias a descomposición endotelial, primaria o secundaria. La superficie de contacto es amplia y la estabilidad de la incisión es buena. Con esta cirugía se puede comprobar que la incisión era más estable y estanca, de tal modo, que incluso la queratoplastia se puede dejar con únicamente 8

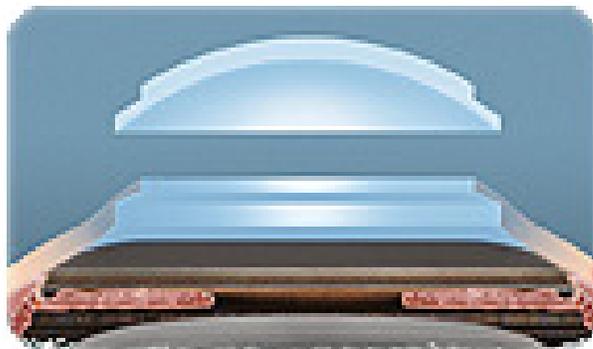


Figura B.6: Representación del corte Top Hat en queratoplastia penetrante

puntos de sutura. Probablemente la mayor dificultad venga a la hora de acoplar el botón donante y el receptor por la diferencia de espesores. La experiencia adquirida en este tipo de cirugía, ha demostrado que el diseño en 'top hat' se podría emplear en queratoconos que no estén muy evolucionados, pero precisamente es en estos casos donde los segmentos intracorneales tienen su principal indicación.

B.4.3. Queratoplastia Penetrante con corte Mushroom

El corte 'mushroom' (Figura B.7) en principio está diseñado para el queratocono y la degeneración marginal pelúcida, con la intención de dejar más endotelio del receptor y a la vez realizar una queratoplastia de mayor diámetro en superficie. El problema con el FSL se presenta cuando el queratocono está muy avanzado y entra en contacto con el cono de aplanación. En este caso, la córnea se deforma en sentido elíptico y el tallado se obtiene con idéntica morfología. Los conos de aplanación curvos (Femtec y Visualmax) deforman menos la córnea que los conos planos (IntraLase y LDV), pero aun así, podemos obtener un tallado defectuoso. Se obtendrían mejores resultados en queratoconos poco avanzados, pero hoy día los segmentos intracorneales han demostrado ser más eficaces en estos casos que una queratoplastia.

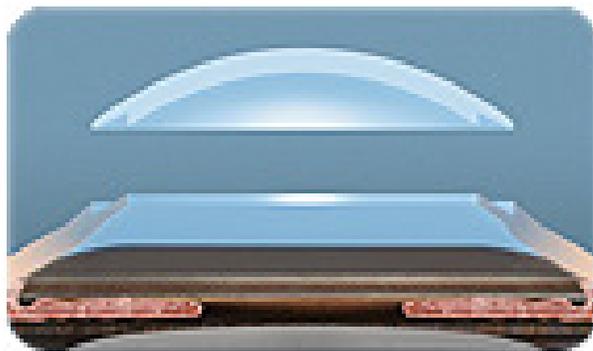


Figura B.7: Representación del corte Mushroom en queratoplastia penetrante

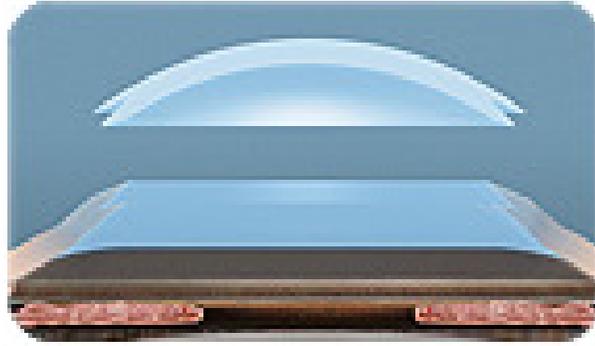


Figura B.8: Representación del corte Zig-Zag en queratoplastia penetrante

B.4.4. Queratoplastia Penetrante con corte Zig-Zag

El corte 'zig-zag' (FiguraB.8) es el diseño de corte más popularizado en la actualidad, posiblemente porque se puede hacer en la mayoría de los casos. Es más universal que los dos anteriores, más dirigidos a una patología más concreta. Parece ser que el diseño en 'zig-zag' origina menos astigmatismo que la técnica tradicional. También existe variaciones del diseño en 'zig-zag' como el como el denominado 'zig square'.

B.4.5. Queratoplastia Penetrante con corte Christmas Tree

El corte 'christmas tree' es una manera más de diseñar la trepanación. Es muy similar al corte 'zig-zag', pero en este caso el sentido de la trepanación es hacia la cornea del paciente y no aporta demasiadas ventajas respecto al diseño en 'zig-zag'.

B.4.6. Queratoplastia Penetrante con corte Diagonal: En Decágono

Otra posibilidad de cambio en el diseño del corte es realizarlo en forma poligonal en vez de circular. Con este diseño se consigue una buena aposición de los bordes de la córnea, evitando las rotaciones del donante, facilitando la sutura y disminuyendo el astigmatismo residual. Con este diseño está más indicado realizar una sutura mixta, con 10 puntos sueltos y una sutura continua.

Diferentes autores defiende actualmente el injerto penetrante con diseño decagonal frente al clásico circular. Dicen, que el corte presenta una gran estabilidad y se evita la rotación del botón donante. En el postoperatorio, la rehabilitación visual es más rápida y el astigmatismo es menor.

B.5. Suturas

La sutura es posiblemente el factor que más puede influir en la prevención o inducción del astigmatismo en la Queratoplastia. Es importante colocar correctamente todos y cada uno de los puntos, pues uno solo de ellos mal colocado puede inducir un

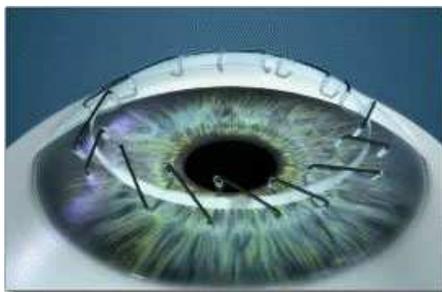


Figura B.9: Representación de la sutura continua



Figura B.10: Representación de la sutura suelta

astigmatismo que quizás no se descubre hasta que se retiran las suturas y que puede ser difícil de corregir con un procedimiento secundario.

El material de sutura ideal debería mantener la aposición tisular con una tensión correcta y constante e inducir la mínima reacción tisular durante todo el periodo de cicatrización. Para la fijación inicial del injerto utilizamos 4 puntos de seda de 9-0, por su facilidad de manejo, retirándola al final de la intervención o a los pocos días. El monofilamento de nilón 10-0 es todavía el material de referencia para la sutura definitiva del botón, aunque en realidad es biodegradable y suele romperse en un período de uno a tres años. El polipropileno de 10-0 parece un material realmente inalterable, pero se ha observado que pierde eventualmente su fuerza de tensión y se cuartea por acción de los rayos UV. El poliéster es un material realmente no-reabsorbible, y su grosor de 11-0 presenta una resistencia similar a la de nilón 10-0. Resulta un poco menos elástico y requiere por ello un ajuste más preciso con ayuda del queratoscopio. Su comportamiento hidrofóbico evita además la tendencia del nilón a adherirse al viscoelástico y a provocar láminas entre las asas (BARRAQUER ET AL. [2002]Orozco2001).

En la configuración de la sutura se distinguen dos modelos principales: sutura continua y puntos radiales simétricos independientes. La primera (véase figura B.9), habitualmente de 16 a 20 o más vueltas alrededor de la circunferencia del injerto, se tendría que colocar de tal manera que cada asa adopte la forma de un triángulo isósceles (sutura antitorsión) o dos suturas continuas de dirección opuesta (doble sutura torsión-antitorsión). La sutura continua presenta como ventajas una mayor rapidez de colocación y su simplicidad (un solo nudo), así como una tendencia natural

a distribuir la tensión, además de poder ajustarse tras el post-operatorio (habitualmente entre 2 y 4 meses). La sutura con puntos independientes (B.10) resulta más laboriosa (16 nudos o más), los cuales pueden además inducir una mayor reacción tisular por lo que es preferible enterrarlos en el lado del botón donante (cuanto más hacia el limbo, mayor fibrosis y dificultad para su extracción). Presenta las ventajas de mantener mejor la tensión con la que se han dejado al finalizar la operación, sin presentar apenas redistribución. La pérdida o posición inadecuada de un punto tendrá por lo tanto menos impacto en el conjunto de la sutura, será preferible en tejidos que presenten mayor reactividad como córneas inflamadas, vascularizadas o casos pediátricos. Permite además un control del astigmatismo postoperatorio más preciso mediante su retirada selectiva.

Las suturas combinadas independientes y continuas pretenden aunar las ventajas de ambas técnicas, aunque también lo hacen con las desventajas, sobre todo existe menos margen para manipular el astigmatismo. La profundidad a la que se pasa la aguja en el tejido corneal al colocar el punto es posiblemente el factor más importante y más difícil de controlar en cuanto a los parámetros posicionales de la sutura. Clásicamente se recomendaba su paso por entre el tercio medio y profundo, para evitar fístulas y la invasión epitelial. Se recomienda situar las suturas lo más profundo posible, pre-Desceméticas, para asegurar la aposición y hermeticidad de los tejidos, evitando tanto el riesgo de separación posterior de la cicatriz que provocan las suturas demasiado superficiales, como el riesgo de infección que puede suponer una sutura penetrante. La dirección de cada punto debe ser radial y rectilínea, con una longitud de aproximadamente 1,0 a 1,5 mm en el lado del receptor y 0,5 a 1,0 mm en el lado donante. Los puntos más largos tienden a almacenar más tensión y los puntos demasiado cortos proporcionan menos margen de control del grado de tensión y pueden aflojarse más fácilmente al ceder el edema inicial o si el tejido es cortado por la sutura. La tensión aplicada a cada punto ha de ser la suficiente para garantizar la correcta aposición de los tejidos durante todo el periodo de cicatrización y la precisa para minimizar el astigmatismo. Este ajuste intraoperatorio resulta más sencillo si se hace mediante nudos corredizos (PLAZAS ET AL. [2004]; ?).

El edema inicial, tanto de la córnea receptora como la donante, requiere la aplicación de un cierto grado de tensión adicional para evitar el aflojamiento de las suturas al disminuir la inflamación en el postoperatorio. En el caso de la sutura continua puede distribuirse la tensión adecuada a cada sector levantando secuencialmente las asas alrededor del injerto con el nudo pre-colocado. Esto puede realizarse de forma rápida y sin daño para la sutura con dos dilatadores de punto lagrimal utilizados manualmente. Una vez anudado, se repite la maniobra para enterrarlo y reducir el astigmatismo residual distribuyendo la tensión según el patrón del queratoscopio.

Bibliografía

- J. L. BARRAGLIOLI Y R. D. KAMM [1984]. Measurements of the compressive properties of sclerol tissue. *Invest Ophthalmol Vis Sci* **25**: 59–65.
- R. BARRAQUER, ÁLVAREZ DE J. TOLEDO, ÁLVAREZ M. FISCHER Y G. M. GRAU [2002]. Prevención y tratamiento del astigmatismo en queratoplastia penetrante. *Annals oftalmologia* **10(2)**: 69–80.
- P. BIYUN. Biomechanical study on the edge shapesfor penetrating keratoplasty. [2004].
- M. R. BRYANT Y P. MCDONNELL [1996]. Constituve laws for biomechanical modeling of refractive surgery. *Journal of Biomechanical Engineering* **118**: 473–481.
- M. BUSIN Y R. ARFFA [2005]. Microkeratome-assisted mushroom keratoplasty with minimal endothelial replacement. *American Journal of Ophthalmology* **140**: 138–140.
- D. CABRERA-FERNÁNDEZ, A. NIAZY, R. KURTZ, G. DJOTYAN Y T. JUHASH [2006b]. A Finite Element Model for Ultrafast Laser-Lamellar Keratoplasty. *Annals of Biomedical Engineering* **34**: 169–183.
- D. CABRERA-FERNÁNDEZ, A. NIAZY, R. KURTZ, G. DJOTYAN Y T. JUHASH [2006a]. Biomechanical model of corneal transplation. *Journal of Refractive Surgery* **22**: 293–302.
- J. CASTELLVÍ-MANENT, M. A. PARERA-ARRANZ Y J. LOSCOS-ARENAS [2009]. Consideraciones sobre los principios físicos de la tonometría de aplanación. *Gaceta óptica* **442**: 30–34.
- M. CIMBERLE [2006]. *Femtosecond lasers creating revolutionary changes in corneal transplant surgery*. Ocular Surgery News Europe/Asia-Pacific Edition.
- P. D. DALE, K. M. PHILIP Y J. A. SHERRATT [1994]. Mathematical modelling of corneal epithelial wound healing. *Mathematical Biosciences* **124**: 127–147.
- P. D. DALE, K. M. PHILIP Y J. A. SHERRATT [1995]. Corneal epithelial wound healing. *Journal of Biological Systems* **3,4**: 956–965.
- W. DUPPS Y S. WILSON [2006]. Biomechanics and wound healing in the cornea. *Experimental Eye Research* **83**: 709–720.

- E. A. GAFFNEY, P. K. MAINI, J. A. SHERRATT Y S. TUFT [1999]. The mathematical modelling of cell kinetics in corneal epithelial wound healing. *Journal of Theoretical Biology* **197**: 15–40.
- S. GRASSO, J. HERNÁNDEEZ Y S. CHIFFLET [2007]. Roles of wound geometry, wound size and extracellular matrix in the healing response of bovine corneal endothelial cells in culture. *Am J Physiol Cell Physiol* **293**: 1327–1337.
- HIBBIT, KARLSSON Y S. INC. [2002]. *Abaqus user's Manual, v. 6.3*. HKS inc. Pawtucket, RI USA.
- D. HOELTZEL, P. ALTMAN, K. BUZARD Y K. CHOE [1992]. Strip extensometry comparison of the mechanical response of bovine, rabbit, and human corneas. *Journal of Biomechanical Engineering* **114**: 202–215.
- T. IGNACIO, T. NGUYEN, R. CHUCK, R. KURTZ Y M. SARAYBA [2006]. Microkeratome-assisted mushroom keratoplasty with minimal endothelial replacement. *American Journal of Ophthalmology* **25**: 336–340.
- E. JAVIERRE, P. MOREO, M. DOBLARÉ Y J. M. GARCÍA-AZNAR [2009]. Numerical modeling of a mechano-chemical theory for wound contraction analysis. *International Journal of Solids and Structures* **46**: 3597–3606.
- J. LIU Y C. J. ROBERTS [2005]. Influence of corneal biomechanical properties on intraocular pressure measurement: Quantitative analysis. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* **31**: 146–155.
- M. MARJAN, M. MATTHEW, F. ROGER Y M. STEINERT [2007]. Results of penetrating keratoplasty performed with a femtosecond laser zigzag incision initial report. *Journal of Ophthalmology* **114**: 2208–2212.
- P. MOREO, J. GARCÍA-AZNAR Y M. DOBLARÉ [2008]. Modeling mechanosensing and its effect on the migration and proliferation of adherent cells. *Acta Biomaterialia* **4**: 613–621.
- J. MURRAY [2009]. *Mathematical Biology: II Spatial Models and Biomedical Applications*. Springer.
- T. NEWSON Y A. EL-SHEIKH [2006]. Mathematical modeling of the biomechanics of the lamina cribosa under elevated intraocular pressures. *Journal of biomechanical engineering* **128**, no4: 496–504.
- L. OLSEN, J. SHERRATT Y P. MAINI [1995]. A mechanochemical model for adult dermal wound contraction and the permanence of the contracted tissue displacement profile. *Journal of Theoretical Biology* **177(2)**: 113–128.
- C. PALOMINO [2008]. *Procedimientos combinados en cirugía faco-refractiva*. Universidad de Zaragoza.

- A. PANDOLFI Y E. MANGANIELLO [2006]. A model for the human cornea: constitutive formulation and numerical analysis. *Biomechan Model Mechanobiol* **5(4)**: 237–246.
- A. PLAZAS, C. RUIZ Y J. R. TRIGO [2004]. Queratoplastia lamelar. indicaciones y técnica quirúrgica. *Actualizaciones de transplante* 432–437.
- SHEARDOWN, H. WEDGE, L. CHOU, R. APEL, D. ROOTMAN Y Y. CHENG [1993]. Continuous epidermal growth factor delivery in corneal epithelial wound healing. *Investigative Ophthalmology - Visual Science* **34, No.2**: 3593–3600.
- J. SHERRAT Y J. DALLON [2002]. Theoretical models of wound healing: past successes and future change. *Comptes Rendus Biologies* **325(5)**: 557–564.
- I. SIGAL, J. FLANAGAN, I. TERTINEGG Y C. R. ETHIER [2004]. Finite element modeling of optic nerve head biomechanics. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* **45**: 4378–4387.
- R. F. STEINERT, T. S. IGNACIO Y M. A. SARAYBA [2006]. Results of femtosecond laser-assisted ptk with a zig-zag incision pattern. *American Journal of Ophthalmology* **167**: 11–14.
- R. F. STEINERT, T. S. IGNACIO Y M. A. SARAYBA [2007]. Top hat-shaped penetrating keratoplasty using the femtosecond laser. *American Journal of Ophthalmology* **143**: 689–91.
- STRUCTURAL DYNAMICS RESEARCH CORPORATION [2003]. *I-DEAS Master Series Release 9.0*. Milford, Ohio.
- P. ZELENKA Y P. ARPITHA [2007]. Coordinating cell proliferation and migration in the lens and cornea. *Elsevier* **19**: 113–124.

