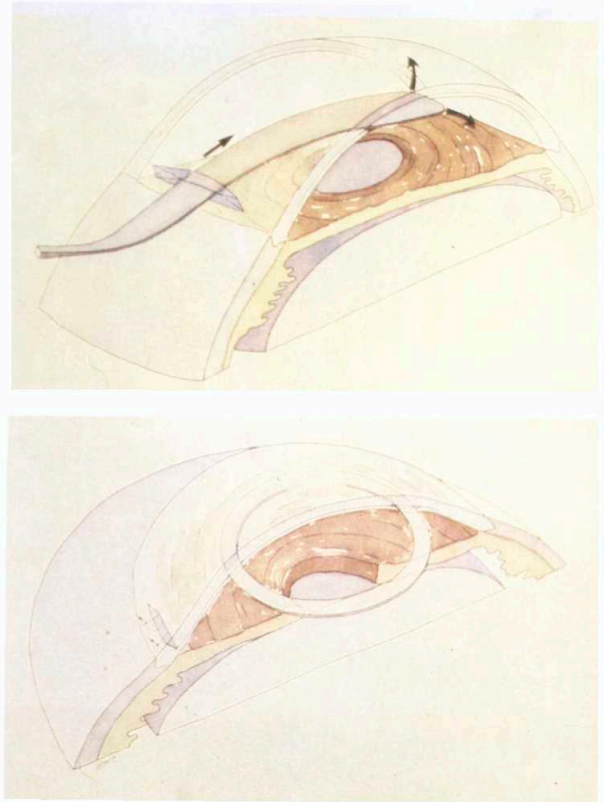


# Mi interpretación de la ley de los espesores

Dr. Gabriel Simón

La primera vez que tuve la oportunidad de mantener una conversación con José Ignacio Barraquer, fue en 1987, en Barcelona. Me encontraba en el curso de mi tercer año como Residente de Oftalmología en la Clínica Barraquer de esa ciudad, e interesado ya desde hacía algún tiempo en los fenómenos y efectos inducidos por la cirugía refractiva. Recuerdo que en nuestra conversación discutimos los resultados experimentales que había obtenido tras implantar anillos interlamelares de silicona en córnea de conejo<sup>1</sup>. Esta técnica se desarrolla partiendo de una pequeña incisión limbar (0.6 mm), de profundidad dos tercios; y a su través, con el uso de una espátula roma, se practica un bolsillo interlamelar en el plano seleccionado de la córnea (Fig. 1). Este estudio demostró que interponiendo anillos de diferentes grosores (entre 50 y 200  $\mu\text{m}$ ), diferentes diámetros internos (entre 4 y 7 mm), y diferentes secciones, es posible variar la curvatura de la córnea entre un límite amplio de aplanamiento central. Quizás, la cuestión que más me atrajo de ese estudio él fue su mecanismo de acción, y al discutirla con él, me comentó que los anillos funcionaban según "La ley de Espesores". Esta ley dice: La cara anterior de la córnea se incurvará al adicionar tejido en su centro óptico o substraerlo de su periferia, y se aplanará al substraerlo del centro o adicionarlo a la periferia del vértice óptico.

Todavía hoy es ampliamente aceptado que la membrana de Bowman tiene un protagonismo especial en definir la curvatura final de la córnea. Su localización superficial, su acelularidad y estructura compacta dan pie a aceptarla como tal. De hecho, si situamos discos positivos de un diámetro superior a los 3 mm entre las lamelas del estroma de la córnea en cualquier plano de la misma (anterior o posterior) siguiendo la técnica del "bolsillo" descrita anteriormente, es difícil observar cambios refractivos anteriores, apareciendo una amplia indentación posterior. Esto pudiera interpretarse como si en la Ley de Espesores entraran en con-



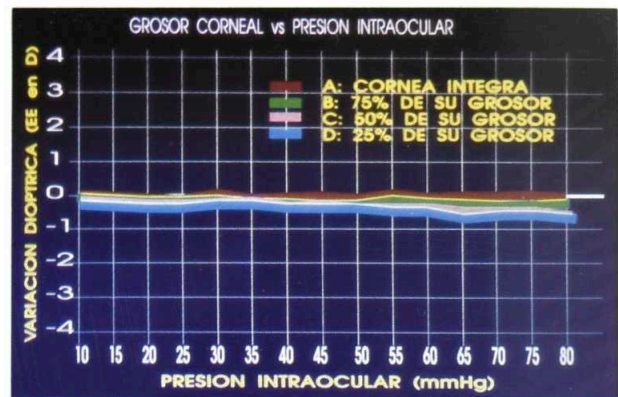
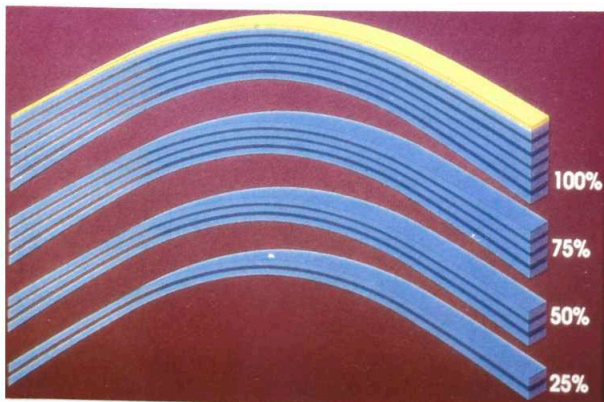
**Figura 1:** A/ Disección lamelar de la córnea con espátula dirigida a través de una pequeña incisión periférica. B/ Inclusión de un anillo.

flicto la adición de tejido periférico y centralmente al mismo tiempo, ya que se trata de discos de dimensiones superiores al área óptica, de tal forma que el incurvamiento conseguido por la adición central de tejido quedará anulada por el aplanamiento conseguido al adicionar tejido periférico, aunque este fenómeno no se observa cuando la queratofaquia se practica con práctico método clásico<sup>2</sup>. De cualquier modo, a fines prácticos, la membrana de Bowman se considera como una estructura simultáneamente flexible e inelástica, y aún la mayoría de los cirujanos que practican la

queratotomía radial, entienden su mecanismo relajante al romper la barrera que representa la membrana de Bowman a la presión intraocular. Un argumento contradictorio al menos conflictivo se plantea cuando no se observan cambios refractivos significativos o incluso miopizantes<sup>4</sup>, si se practican queratotomías circulares relajantes<sup>3</sup>.

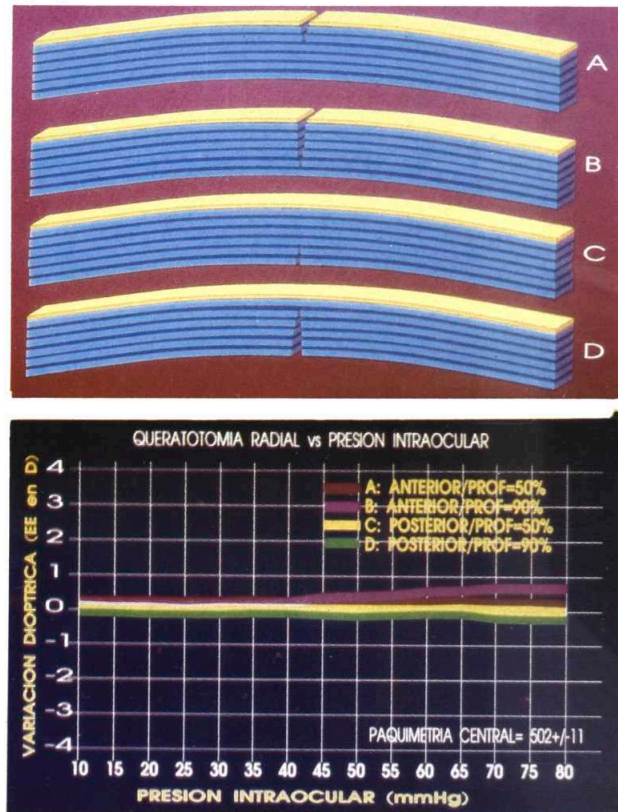
La queratofaquia practicada con el microqueratomo (no con la técnica de bolsillo lamelar ya descrita), obedece en todo momento la Ley de los Espesores y favorece al concepto de la Bowman como una estructura limitante, es decir, si colocamos tejido central a modo de sandwich entre las lamelas de la córnea o periférico en forma de anillo, se observan incurvamientos o aplanamientos muy predictibles cuando la membrana de Bowman ha sido seccionada<sup>2</sup>; pero si efectivamente esta estructura decide la curvatura final de la córnea, ¿Por qué no se observan deformaciones cuando esta se elimina con una ablación superficial con láser Excimer por ejemplo?

Estudios experimentales han demostrado que la córnea se comporta como una estructura difícil de distender<sup>5</sup>, no solamente cuando se le someten fuerzas globalmente, sino también individualmente a sus lamelas. De hecho, hemos comprobado que si sometemos la córnea a una gran presión intraocular, ésta se deforma mínimamente manteniendo su equivalente esférico<sup>6</sup>, tanto cuando la córnea está íntegra como cuando se ha excindido el 75% de las capas anteriores con un microqueratomo (Fig. 2) o se ha practicado una queratotomía radial del 50 y 90% de su espesor en su lado epitelial o endotelial con el fin de desviar la localiza-



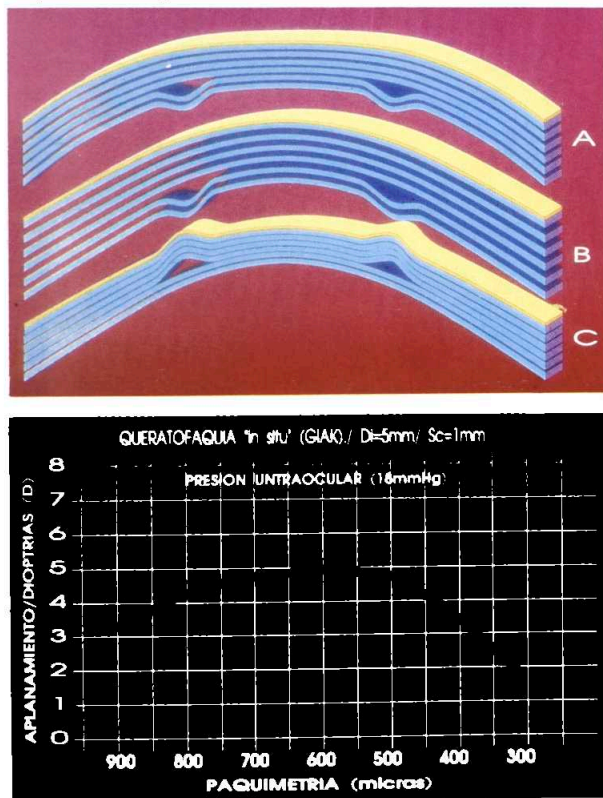
**Figura 2:** A/ Diferentes grosores corneales conseguidos con un microquerátomo. B/ La presión intraocular no modifica la curvatura dentro de los límites expuestos.

ción del stress a un plano posterior o anterior respectivamente (Fig. 3).



**Figura 3:** A/ (a y b) queratotomías anteriores de diferente profundidad (c y d) queratotomías posteriores. B/ La presión intraocular no modifica la curvatura de la córnea ante las condiciones expuestas.

La Ley de los Espesores se cumple tanto si la Bowman está íntegra como si no, de modo que debe cumplir un mecanismo independiente de ella. Si al practicar un bolsillo interlamelar situamos en su interior y en el centro de la córnea una pequeña lente positiva con un diámetro de 2 mm y un grosor de  $300\ \mu\text{m}$ , se observa un cambio refractivo anterior en córneas normohidratadas de cadáver, y un aplanamiento periférico, que se hace menos evidente cuando la córnea se hidrata, y más localizado cuando se deshidrata. Este mismo fenómeno se observa cuando se incluyen anillos o geles inyectados de  $300\ \mu\text{m}$  de grosor con un diámetro interno de 5 mm y externo de 7 mm (Fig. 4). Efectivamente, esta observación sugiere que la Ley de los Espesores también está sujeta a los cam-



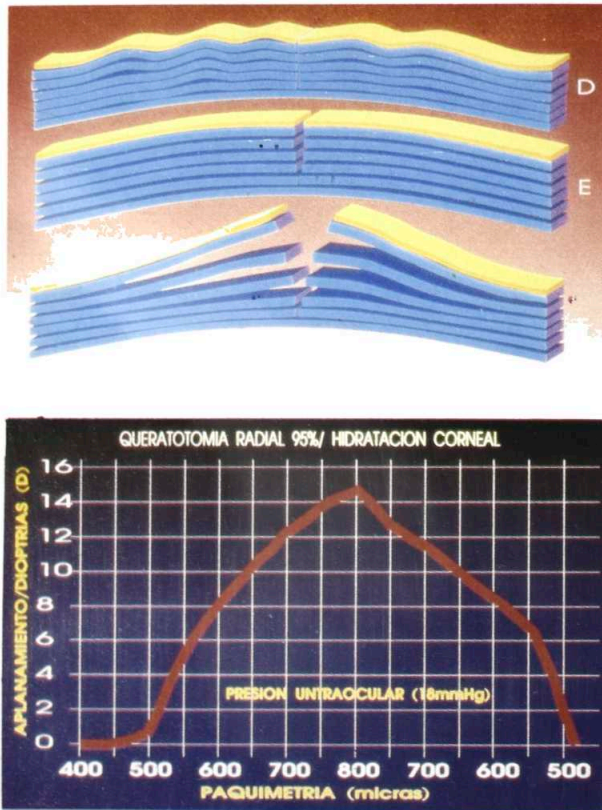
**Figura 4:** A/ Diferente efecto de una inclusión interlamelar en relación al grado de hidratación corneal, (a) muestra aplanamiento central cuando la córnea presenta un grosor central entre  $480 \pm 10\ \mu$  sin epitelio, (b) no observa cambio alguno ya que la córnea al hidratarse desplaza su stress a las capas superficiales, y la inclusión identa posteriormente en las capas flácidas, (c) muestra el efecto opuesto a (b) en una córnea deshidratada. B/ gráfica del efecto queratométrico.

bios hídricos corneales. De hecho la hidratación de la córnea ha demostrado tener un protagonismo excepcional al observar el efecto esperado tras practicar la queratotomía radial en ojos de cadáver<sup>7</sup> o en las variaciones diurnas de nuestros pacientes<sup>8</sup>.

Recuerdo que tras mi llegada al Bascom Palmer Eye Institute, inicié un estudio comparativo del efecto de las queratotomías arcuatas efectuadas con un cuchillete de diamante o con láser HF en ojos frescos de cadáver siguiendo el protocolo descrito por Swinger y Kornmehl<sup>9</sup>. Los ojos se introducen en una solución al 15% de dextrano para normalizar la hidratación de la córnea durante un tiempo predeterminado, se les restaura su presión intraocular y se les somete al tratamiento quirúrgico.

Los resultados iniciales fueron dispares y confusos ya que se observaron tanto pequeños incurvamientos en el eje de las queratotomías como aplanamientos. Gracias a que las medidas eran tomadas automáticamente con un queratómetro electrónico (SK-1, Canon, Inc., New York, NY), fue posible efectuar disparos por unidad de tiempo y observar las variaciones queratométricas mientras se irrigaba la superficie corneal con BSS. La córnea presentaba un astigmatismo tanto más evidente cuanto mayor era el tiempo durante el que se la observaba. Si no hubiéramos efectuado el estudio comparativo hubiéramos pensado que el láser HF pudiera tener un efecto térmico que contrajera el colágeno temporalmente para relajarse después; lo cierto es que al observarse el mismo fenómeno en las queratotomías efectuadas con el cuchillete de diamante, fue más lógico pensar que la irrigación con BSS era la responsable de la inestabilidad observada. Posteriormente se utilizaron otras soluciones de Dextrano al 7% (teóricamente isosmótico) y aceite mineral y no se observó ni tan siquiera la aparición del efecto en córneas con un grosor central de  $475 \pm 13\ \mu\text{m}$ <sup>10</sup>. Con todos estos datos, fue fácil determinar que es necesario cierto grado de hidratación corneal para que una queratotomía desarrolle su efecto. Lógicamente, continuamos el estudio de este efecto en la queratotomía radial y los resultados fueron idénticos (Fig. 5).

La córnea se ha entendido y aceptado como una



**Figura 5:** A/ (d) Una incisión relajante en una córnea deshidratada no libera stress en las lamelas afectadas ya que aparecen flácidas. Solamente se consigue efecto refractivo cuando la córnea supera cierto grado de contenido en agua (f). B/ Cuando se compara el efecto queratométrico con el contenido hídrico corneal, apenas si se observan cambios en espesores "normales", aunque tras cierto límite, pequeños incrementos hídricos implican grandes cambios queratométricos.

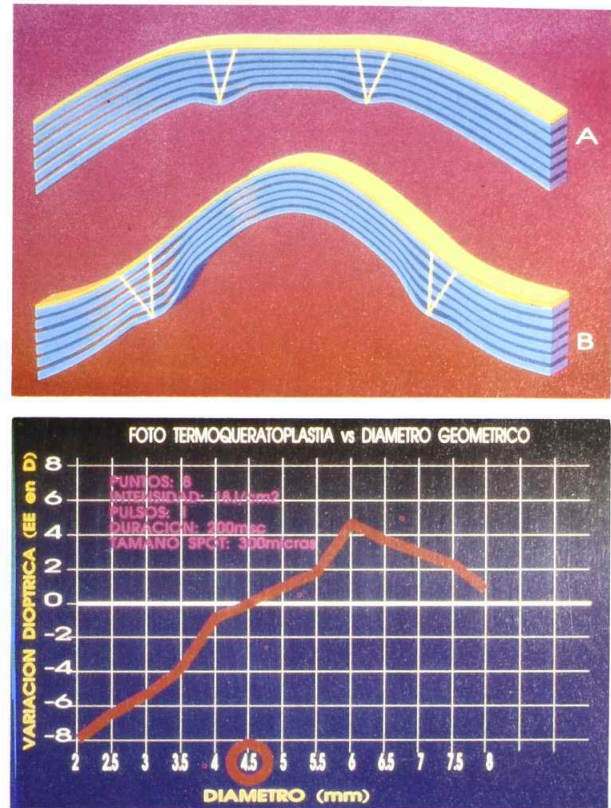
estructura isotrópica (con características idénticas en todos sus puntos) en los normogramas y algoritmos del programa que pretenden predecir su comportamiento ante determinada agresión quirúrgica<sup>11</sup>. Si la córnea está sometida uniformemente a un determinado grado de stress en todos sus puntos, al practicar una incisión de cierta longitud y profundidad, será posible liberarla del mismo y calcular la relajación esperada proporcional a las características de la queratotomía. La realidad no ha sido así, y las variaciones observadas por una misma técnica quirúrgica, practicada por el mismo cirujano en una córnea de idénticas características condujeron a G. Waring III a organizar el

estudio prospectivo de la queratotomía radial (PERK). Curiosamente este estudio dedujo que el factor que inicialmente tenía más expectativas de influir en el resultado final (presión intraocular), en realidad no lo hizo<sup>12</sup>, y que globalmente se observaba un paradójico aplanamiento progresivo después de cuatro años del momento quirúrgico<sup>13</sup>.

Tras mi llegada al "Bascom", otro de los proyectos que acaparó mi atención fue la aplicación térmica del láser Ho:Yag en la superficie de la córnea y con el reciente "fichaje" de un extraordinario físico especializado en láseres, Qiushi Ren, fue posible estudiar en profundidad este tema. De hecho esta es una versión actualizada de la antigua termoqueratoplastia practicada con cauterio<sup>14</sup>. Theo Seiler, en Alemania, ya había empezado a estudiar los efectos de este método con tecnología láser, pero utilizando una fibra óptica que se aplica con contacto directo sobre la superficie de la córnea y por lo tanto efectuando las cauterizaciones individualmente siguiendo un patrón radiado<sup>15</sup>. Personalmente no me pareció una gran ventaja utilizar tecnología avanzada (Ho:Yag) con el concepto manual antiguo de la "fibra óptica - cauterio" como instrumento. Nosotros<sup>16</sup> desarrollamos un sistema óptico sin contacto, utilizando la combinación de un sistema de ocho prismas para dividir el haz láser, que combinado con otro sistema de lentes, se enfoca a la distancia de trabajo de la lámpara de hendidura (sin contacto) sobre la superficie de la córnea. Este sistema ya había sido utilizado por JM. Parel, Shimada y E. Barraquer para tatuar la superficie de la córnea y así facilitar la labor del cirujano en la sutura de las queratoplastias. Recuerdo que en 1990, en París, durante el curso de unas conferencias en Hotel Dieux, G. Waring me preguntó qué cuál era en mi opinión la gran ventaja de este sistema con el de Seiler. Yo haciendo una broma le contesté que ese método estaba a mitad de camino entre la edad de piedra (cauterio) y la era moderna (sistema sin contacto). Este sistema nos permitió estudiar y entender mejor la córnea, y de cómo se comporta y cumple la Ley de los Espesores. Para ello déjenme explicarles brevemente un concepto simple y más tarde como creo que esta técnica actúa. Fundamentalmente se ha comprobado que cuando una determinada cantidad de calor alcanza el colágeno

de la córnea éste reduce su volumen encogiéndose<sup>27</sup>. Bien, si entendemos esta situación como si en cada punto de aplicación excindiéramos cierta cantidad de tejido (si el tejido se encoje es como si cierta cantidad del mismo desapareciera), pudiéramos pensar que estamos en la posesión de un método que sustrae tejido. Si efectivamente la Ley de los Espesores se cumple, esta técnica debería arrojar resultados inversos a los postulados por la adición, es decir, se deberán observar aplanamientos centrales cuando se aplica calor centralmente e incurvaciones cuando lo hacemos periféricamente. Theo Seiler publica que no es posible aplanar la córnea con esta técnica<sup>15</sup>. José Barraquer, en su libro<sup>2</sup>, hace un comentario opuesto (pág. 141). En nuestro laboratorio pudimos comprobar que para cierta cantidad de energía y tamaño de spot (300  $\mu\text{m}$ ) es posible aplanar la córnea cuando actuamos dentro de un área central de 3.5 mm y que se incurva cuando actuamos por fuera de los 4.5 milímetros (Fig. 6). Estos resultados me parecieron la evidencia más clara del comportamiento esperado por la córnea según la Ley de los Espesores.

El epitelio corneal ha sido definido desde los años 40 como una estructura uniforme en grosor<sup>17</sup>. Su distribución tapizando la superficie de la córnea queda definida por un grosor característico dependiendo de factores individuales (edad, raza, geografía...), y que al ser una cubierta de caras paralelas, no representaría un componente refractivo significativo. Tuve la oportunidad de efectuar una encuesta de opinión entre los residentes y facultativos de nuestro servicio de córnea acerca de las diferencias ópticas que el epitelio pudiera inducir en el sistema óptico ocular. Es decir, si medimos el poder dióptrico de la córnea sobre el epitelio, y luego, tras retirarlo con una espátula roma, volvemos a medirlo sobre la membrana de Bowman, ¿van a registrarse diferencias dióptricas significativas?. Las respuestas fueron unánimes, y la opinión de los encuestados consideró que la presencia del epitelio no iba a efectuar cambios refractivos sustantivos sobre la membrana de Bowman. Afortunadamente pudimos comprobar y medir en el laboratorio el cambio refractivo corneal inducido en ojos frescos de cadáver cuando se les desnuda el epitelio. La córnea gana hasta 2 dioptrías de incurvamiento cuando se mide sin epitelio<sup>18</sup>. Observándose los mapas computariza-



**Figura 6:** A/ Proyección de láser Ho:Yag en la superficie de la córnea con un patrón geométrico de diámetro inferior a 4 mm (a) y superior a 5 mm (b). B/ Características queratómétricas de diferentes diámetros geométricos en la Termokeratoplastia Láser con Ho:Yag.

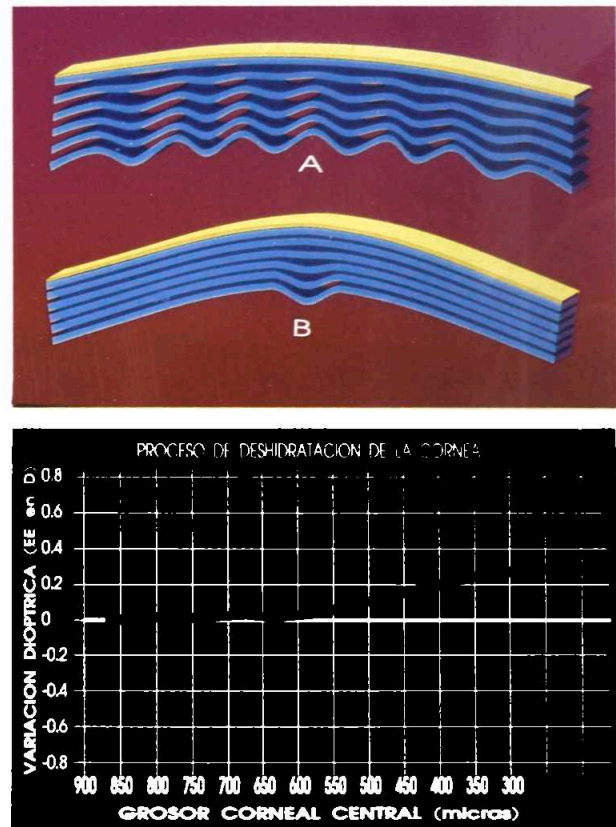
dos de un videoqueratoscopio, pudimos comprobar que la córnea describe una forma cónica, y que el epitelio siendo más delgado en el centro que en la periferia, tiende a mitigar esta configuración. Este hallazgo hizo pensar en que quizás el epitelio pudiera desarrollar una función óptica extraordinaria, intentando ofrecer al aire la superficie óptica más esférica posible. Para comprobarlo, efectuamos un amplio estudio comparativo de las superficies corneales con y sin epitelio<sup>18</sup>, y pudimos observar un mayor grado de astigmatismo en la superficie de la membrana de Bowman. El epitelio nos demostró tener una actividad óptica mucho más dinámica que el resto de la córnea. Si se observan inestabilidades tras practicar ciertos procedimientos refractivos, al menos uno de los factores implicados en ello debe de ser el epitelio. Nor-

malmente, tras cualquier procedimiento refractivo se observa cierto grado de regresión<sup>19</sup> o progresión del efecto<sup>20</sup>, considerándose como parte del cálculo quirúrgico refractivo, y es útil entender el esfuerzo epitelial en conseguir una superficie más regular. Este suele ser uno de los temas más candentes cuando se discute la inestabilidad y regresión de ciertos pacientes sometidos a la queratotomía foto refractiva con láser Excimer y de la aparición de úlceras tróficas epiteliales. Juan Sanyans la explicaba como resultado de una "fatiga epitelial": El epitelio quiere corregir fuertes cambios de curvatura, y se fatiga. La ayuda que le podemos brindar al epitelio para reducir su esfuerzo será reduciendo al mínimo los cambios bruscos de curvatura corneal aumentando al máximo el área óptica tratada.

Membrana de Bowman, Ley de los Espesores, grado de hidratación corneal, incisiones relajantes, epitelio, fototermoqueratoplastia... Todas estas palabras lógicamente están relacionadas e indican que puede existir una clave para entender mejor la biomecánica de la córnea.

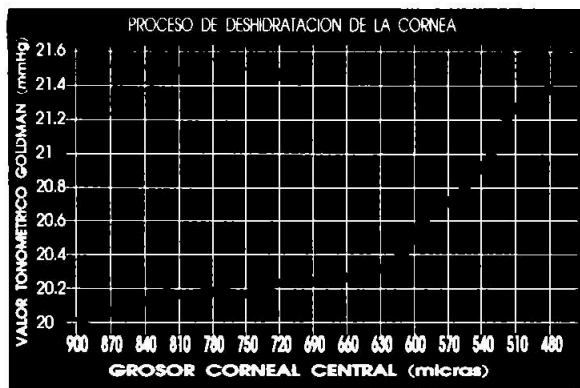
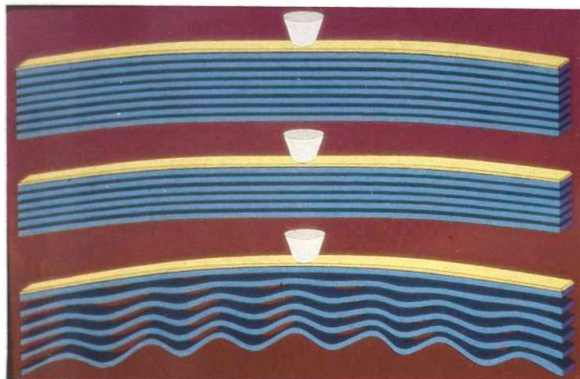
La córnea, en el modo en que yo la veo, puede observarse con un modelo simplificado de una estructura lamelar (capas de cebolla) flexible, inelástica y relativamente estática (que le confiere cierto grado de rigidez), con apreciables diferencias individuales cuando se compara su mayor rigidez anterior (más compacta y deshidratada) con la posterior y similar resistencia a la distensión entre la córnea anterior (incluyendo la Bowman) y la posterior (excluyendo la Descemet), pero extraordinariamente sensible al componente hidrico interlamelar (grado de hidratación); y cubierta por una estructura altamente elástica y dinámica capaz de modificar su estructura para ofrecer una superficie "aceptable" al aire (epitelio).

La córnea posee un grosor central y periférico diferente, y más o menos constante confiriéndole cierto grado de rigidez. Si la córnea es inelástica, cuando aumente su grado de hidratación interponiéndose agua uniformemente entre sus lamelas, ésta no modificará significativamente su curvatura anterior<sup>6</sup>, lo cual está aceptado por la Ley de los Espesores, ya que para variarla, deberíamos modificar localizadamente la hidratación en el centro o en la periferia (Fig. 7). Pero lo que si va a tener



**Figura 7:** A/ (a) Una córnea uniformemente hidratada no modifica su configuración superficial; si inyectamos agua en un punto localizado (b), la superficie se incurva sobre ese punto. B/ Relación entre hidratación y poder dióptrico corneal. La córnea intacta es muy estable refractivamente ante cambios hídricos. Únicamente en estados de deshidratación puede observarse un discreto incurvamiento.

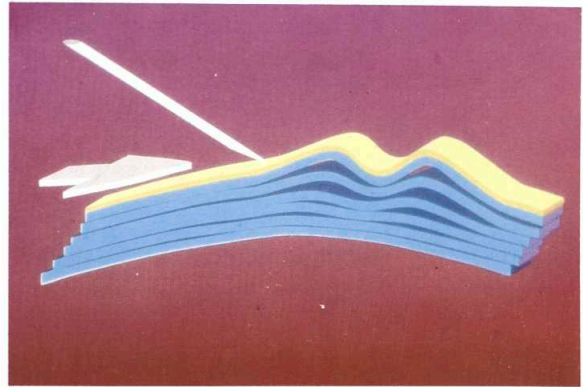
que modificarse es la distribución de stress en sus lamelas, siendo las anteriores las que van a resistir el influjo de la presión intraocular. La presencia de agua interlamelar impide que los diferentes niveles estromales cooperen en su resistencia a la fuerza intraocular observándose un desplazamiento anterior de su stress; por lo tanto, las lamelas anteriores aparecerán tensas y progresivamente perderán esta imagen cuanto más posteriores sean. De hecho la superficie posterior presentará múltiples pliegues (Pliegues de la Descemet). Este fenómeno, observable con lámpara de hendidura, puede incluso medirse por simple tonometría (aplanación)<sup>6</sup> (Fig. 8). Tres factores van a modificar los valores arrojados por el tonómetro, la curvatura corneal, la presión intraocular, y su rigidez. En ge-



**Figura 8:** A/ Tonometría en tres situaciones diferentes. Superior: Córnea engrosada; Medio: Córnea Adelgazada; Inferior: Córnea Hidratada. B/ Comportamiento de la córnea ante el tonómetro en diferentes situaciones de hidratación. Cuando la córnea se hidrata por encima de cierto punto, el tonómetro "la ve" como adelgazada.

neral, una córnea delgada (no deshidratada) observa menor rigidez (queratomileusis por ejemplo) que una córnea gruesa (no hiperhidratada) por poseer "extralamelas" de una forma congénita o artificial (epiqueratoplastia, queratofaquia, ...). Hemos comprobado en el laboratorio que al medir la presión intraocular inductivamente mediante el método de aplanación, aparece una incongruencia tanto más aparente cuanto mayor es el grado de hidratación de la córnea<sup>6</sup>. Cuando la córnea se hidrata, las lamelas posteriores aparecen plegadas "fuera de jugo", y la córnea pierde con ello parte de su rigidez ante el tonómetro que la ve como una córnea adelgazada. Cuando la córnea se deshidrata, las lamelas anteriores aparecen "flácidas", y a través del biomicroscopio es posible despla-

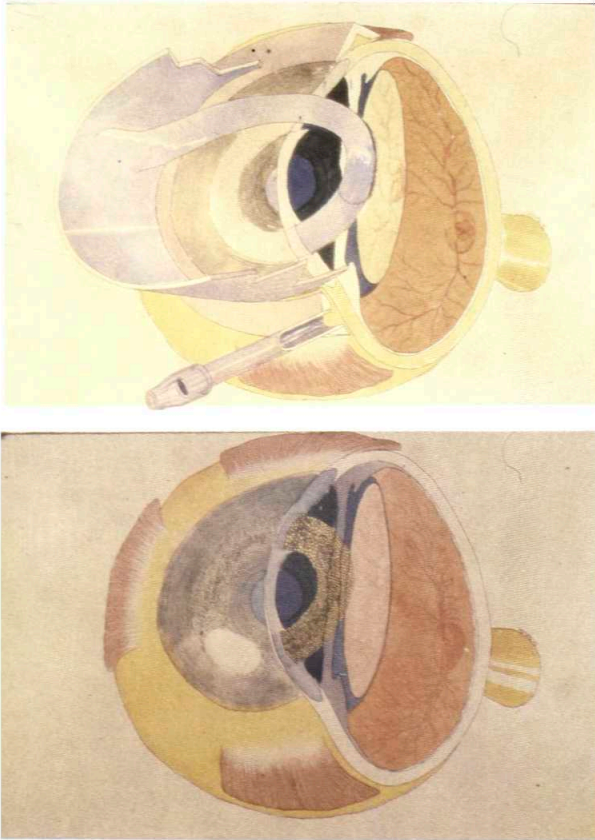
zarlas lateralmente con la punta de una aguja de un modo semejante al que lo hace la piel del envés de la mano cuando la rozamos con un dedo (Fig. 9).



**Figura 9:** Cuando la córnea se deshidrata, las lamelas superficiales se vuelven flácidas y pueden desplazarse lateralmente con facilidad.

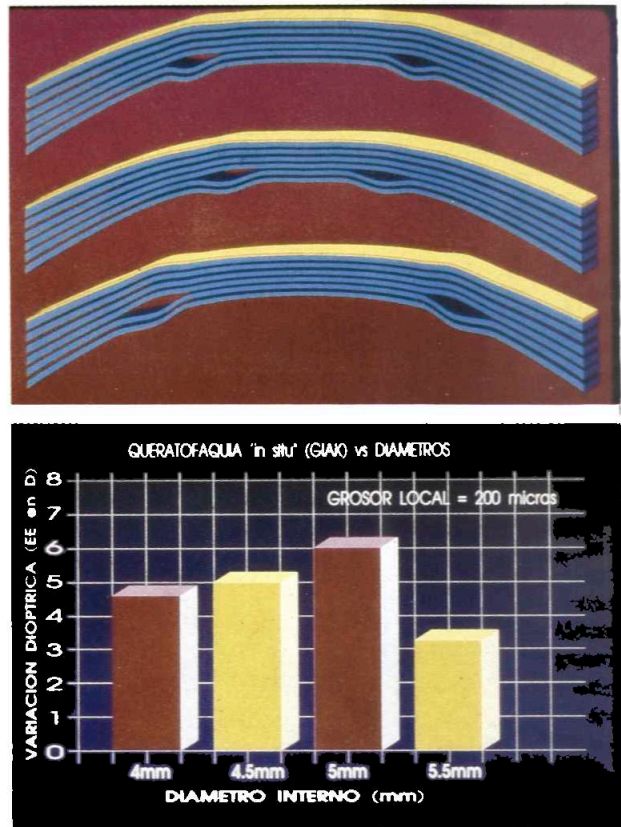
¿Pero que tiene que ver el grado de hidratación corneal con la Ley de los Espesores?. Bien, la hidratación es una forma de "adicionar tejido" difusamente, tanto en el centro como en la periferia y aunque no modifique su curvatura en córneas intactas, claramente tiene un papel decisivo en la biomecánica de la córnea. La adición de tejido localizadamente tiene un comportamiento similar, pero la influencia refractiva de los resultados biomecánicos globales son dramáticamente distintos. En este sentido, voy a describir una técnica que estrictamente sigue el concepto de la Ley de los Espesores. En inglés la denominamos GIAK, según las iniciales de "Gel Injection Adjustable Keratoplasty" ya que inyectamos más o menos gel para dar cierta curvatura a la córnea. En español podría llamarse "Queratofaquia in situ", ya que formamos una lente negativa aprovechando un espacio interlamelar específico. Esta técnica representa una evolución natural de los anillos de silicona descritos al inicio de este escrito. Para ello se efectúa una pequeña incisión de 0.6 mm a 3 mm del centro óptico seleccionado<sup>21</sup> con un cuchillito de diamante calibrando su profundidad al 80% de su espesor en ese punto (paquimetría). Con la ayuda de una espátula helicoidal roma, se diseca a su través un espacio anular del ancho de la espátula (1 mm) y se inyecta en su interior un gel de óxido

de polietileno (hidrogel) al 0.4% en solución salina balanceada (Fig. 10). La cantidad de gel, den-



**Figura 10:** A Instrumentos y técnica quirúrgica de la queratofagia miópica "in situ". B Inclusión de gel o "tejido" en la periferia del vértice óptico haciendo de esta técnica el ejemplo más claro del sentido de la Ley de los Espesores.

tro de unos límites, define cierto grado de aplanamiento central. A medida que incrementamos las dimensiones de este anillo haciéndolo más periférico, para una misma cantidad de gel, su efecto es menor. Fue curioso observar que al reducir el anillo diseccionado por debajo de 5 mm de diámetro interno, al inyectar el polímero no se observa un incremento proporcional a la cantidad de gel inyectada (Fig. 11). Esta situación es sorprendentemente semejante a la observada por mi experiencia con el uso del Ho:Yag en la fototermokeratoplastia, aunque en un sentido opuesto (comparar gráficos GIAK y LPTK). Ambas técnicas responden característicamente ante el modelo biomecánico expuesto cuando se les somete a variaciones



de presión intraocular o de hidratación estromal. Ante incrementos hídricos las variaciones de la curvatura corneal con LPTK se hacen más efectivos, con GIAK menos.

Entendiendo la córnea de este modo, se puede deducir que la queratotomía radial también funciona según la Ley de los Espesores. Para ponernos de acuerdo en esta afirmación, primero debemos discutir como se distribuye el stress en la córnea habitualmente antes de efectuar la QR. Ya hemos anticipado que en una córnea deshidratada con dextrano al 15% (con un grosor central menor de  $400\mu\text{m}$ ) el stress "migra" a las capas posteriores de la córnea, y lo hemos demostrado al no conseguir efecto significativo tras practicar queratotomías anteriores, posteriores o fototermokeratoplastias. Una córnea hiperhidratada desplaza su stress hacia sus capas anteriores y lo hemos demostrado practicando la QR o la FTQ en estas condiciones (con un grosor central superior a las  $550\mu\text{m}$ ), observándose de inmediato cierto grado de



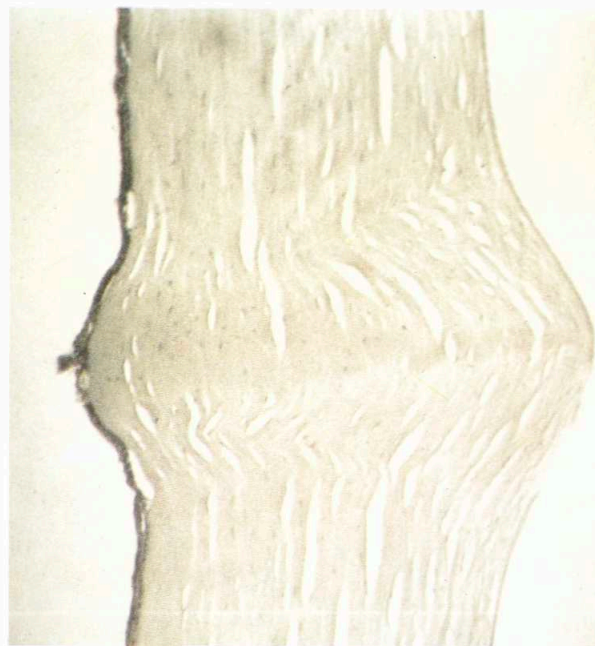
efecto tanto más evidente cuanto mayor es el contenido de agua entre las lamelas de la córnea.

El contenido hídrico de la córnea se ve fundamentalmente controlado por la acción deshidratante del endotelio, y la evaporación superficial de la película lagrimal cuando los párpados están abiertos. Por la mañana, tras permanecer con los párpados cerrados durante la noche, parece lógico pensar que la córnea esté en su apogeo hídrico. Al final del día, tras dieciseis horas de exposición al aire, la córnea deberá estar menos hidratada. Se han comprobado fluctuaciones diurnas de grosor entre el 1.7 al 4.5% en córneas humanas normales<sup>22,23,24</sup> así como una distribución progresivamente mayor en contenido acuoso cuanto más cerca se mide del lado endotelial<sup>25</sup>. La estructura de la córnea deberá estar diseñada para que aunque varíe su contenido hídrico no lo haga su curvatura. Para que esto sea posible tiene que ser lamelar e inelástica, aunque con ello está sometida a un vaivén anteroposterior de relevo de stress. Es muy atractivo imaginar que esta situación a provocado una selección natural de equilibrio entre el grado de hidratación y la localización del stress en el espesor corneal dependiente del momento del día en el que se observa. Así, la córnea posterior deberá estar menos acostumbrada a soportar tensión (stress) ya que para ello la córnea debería deshidratarse. La porción anterior deberá ser más rígida y compacta al tener que responder con más frecuencia que la córnea posterior a las consecuencias de la hidratación (la córnea con la edad pierde su mecanismo deshidratante). De esta forma, la córnea tiene su configuración de acuerdo a un mecanismo adaptativo.

Al efectuar una queratotomía anterior, no solamente seccionamos la parte de la córnea que normalmente resiste a los cambios hídricos, sino que introducimos un factor hidratante con la misma queratotomía. Ante estas condiciones, los cortes en la córnea introducen un pequeño componente hídrico (adición de tejido-like), éste desplaza el stress hacia la superficie que al estar seccionada cede y varía su curvatura. Por supuesto el diseño de la queratotomía y la magnitud de las mismas deberá favorecer al cambio de curvatura.

La fototormoqueratoplastia, de la forma con que

hoy se aplica, induce una lesión corneal que tiene configuración cónica (Fig. 12) de base anterior y

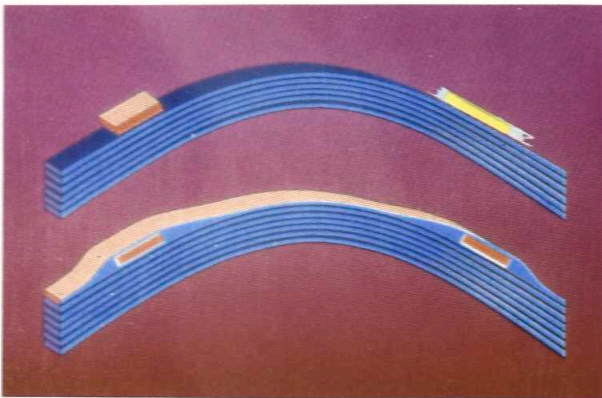


vértice posterior. Superficialmente el tejido se afecta en mayor extensión que en profundidad. Esta situación lógicamente implica que las tensiones en su superficie van a estar más afectadas que en su cara posterior, al menos inicialmente. Para restaurar el equilibrio de resistencias la córnea se aplana en ese punto y por lo tanto se incurva a cierta distancia del mismo. Combinando el tamaño geométrico de diferentes puntos sobre la superficie de la córnea se pueden obtener tanto aplanamientos como incurvamientos. Obviamente, si aplicando esta técnica, afectarámos el tejido corneal de modo inverso, es decir, posteriormente, los resultados serían inversos.

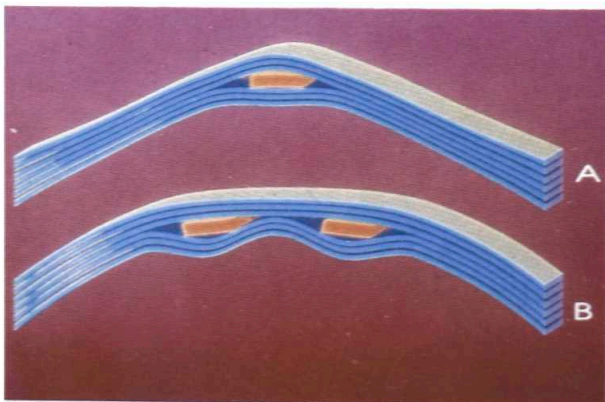
Con la inyección localizada de gel entre las lamelas de la córnea, se induce un pliegue posterior localizado, que desplaza discretamente tejido fuera de su lugar de contribución de stress y al mismo tiempo lo "anula". Esto desplaza el stress a las capas posteriores, que luchan por devolver el tejido plegado a su posición original. De esta manera el tejido interpuesto, empujado por las capas posteriores, empuja a la córnea por encima de él, incurvándola en ese punto hasta un punto de equi-

libro. Por supuesto la córnea se aplanará en un segundo plano. Esta puede ser uno de los mecanismos de acción para la Ley de los Espesores.

La Ley de los Espesores, en su faceta aditiva, se manifiesta del mismo modo según dos situaciones fundamentalmente distintas. Una es puramente morfológica: Si adicionamos tejido superficialmente, ya sea en el centro o en la periferia del vértice óptico utilizando a la córnea como soporte, ésta "remodelará" la nueva superficie intentando ofrecer la superficie más regular posible al aire (Fig. 13a). Otra es puramente biomecánica: Si adicio-



namos tejido intraestromalmente, ya sea en el centro o en la periferia del vértice óptico, la córnea modificará su curvatura propiamente dicha, incurvándose en la superficie adyacente al punto de adición y aplanándose en un segundo plano (Fig. 14b).



La localización de esta adición determinará incurvamientos o aplanamientos centrales.

Hace unos meses leí el libro de Stephen How-

king, "historia breve del tiempo"<sup>26</sup>. Me pareció curioso el consejo que recibió de su editor para aumentar el mercado del libro: "Stephen, le dijo, cada vez que escribas una fórmula matemática perderemos un millón de ventas". Yo le he pedido a J M Parel calcular el modelo matemático de la ley de los espesores cuando se adiciona tejido interlamelar periférico. Los resultados se describen en la figura 14. Estoy seguro de que su rigor biomecánico sólo puede aumentar la claridad de mis observaciones puramente descriptivas.

## Bibliografía

1. Simon G, Barraquer JI: Queratocricioemfitesis, nuevo procedimiento de cirugía refractiva (estudio experimental). Arch Soc Oftal Invest 1: 87 - 94, 1989.
2. Barraquer JI: LXV Ponencia de la Sociedad Española de Oftalmología, 1989. Cirugía Refractiva de la Córnea. Pág. 137 - 138.
3. Arciagas, A. Amaya, L. Velásquez, G. Hernández, L.: Corneal astigmatism induced by the combination of arc and radial keratotomies; Experimental Research in rabbits. Journal of Refractive Surgery. Vol. 2, No. 2, March - April 1986, pp. 67 - 77.
4. Gaester, RN. Yamashita, T. Circunferencial keratotomy to reduce hyperopia in rabbits. ARVO. Invest Ophthalmol Vis Sci (Suppl). Vol. 24 No. 3 pp 149.
5. Maurice DM: Mechanics of the cornea. In Cavanagh HD, Editor: The Cornea: Transactions of the World Congress on the Cornea III, New York, 1988, Raven Press, pp 187 - 194.
6. Simon, G., Small, R.H., Ren, Q.S., Parel, J-M.: The Effect of Corneal Hydration on Goldmann Applanation Tonometry and Corneal Topography. Refract Corneal Surg (in press).
7. Simon G, Small R, Ren Q, Parel J-M: The effect of wound hydration and intraocular pressure on the keratometric change induced by radial keratotomy J Corneal Refrac Surg. (in press).
8. Maloney RK: Effect of Corneal Hydration and Intraocular Pressure on Keratometric Power after Experimental Radial Keratotomy. Ophthalmol July 1990. Vol. 97. Number 7.

9. Swinger CA, EW Kornmehl.: Dehydration of post-mortem eyes for practice and experimental surgery. *Ophthalmol. Surg.* 16: 182-184, 1985.
10. Parel J-M, Simon G, Lowery JA: The effect of wound hydration on central corneal curvature in laser and diamond knife keratotomy. ARVO, Sarasota, Florida, April 29 - May 4, 1990.
11. Hanna KD, Jouve FE, Bercoivie MH and Waring GO: Preliminary computer simulation of the effects of radial keratotomy, *Arch Ophthalmol* 1989; 107: 911 - 918.
12. Neumann AC, Osher RH and Fenzl RE: Radial keratotomy: A comprehensive evaluation, *Doc Ophthalmol* 1984; 56: 275 - 301.
13. Waring GO, Lynn MJ, Fielding B, Asbel P, Balyeat HD, Cohen EA, Culberston W, Doughman DJ, Fecko P, Mc Donald MB, Sith RE, Wilson LB, and the PERK study Group: Results of the Prospective Evaluation of Radial Keratectomy (PERK) study 4 years after surgery for myopia. *JAMA* 263: 1083, 1990.
14. Lans LJ. Experimentelle Untersuchungen über Entstehung von Astigmatismus durch nicht-perforierende Corneawunden. *Graefes Arch Ophthalmol.* 1989; 44: 117 - 152.
15. T. Seiler, M. Matallana, T. Bende.: Laser Thermo-keratoplasty by means of a pulsed Holmium: Yag Laser for hyperopic Correction. *Refractive & Corneal Surgery*, Vol 6 Sep./Oct. 1990.
16. Simon G, Parel J-M, Lowery JA, Cartlidge A: Non-invasive myopic and hyperopic laser refractive surgery. III International Congress on Laser Surgery of the Cornea. Atlanta, Georgia, November 1 - 2, 1990.
17. Adler's physiology of the eye. Capítulo III (pág. 38), línea 14.
18. Simon G, Kervick GN, Parel J-M: The optics of the corneal epithelium and its significance to photorefractive keratoplasty. 8 th Congress of the European Intraocular Implantlens Council, Dublin, Ireland September 10 - 14, 1990.
19. Gartry DS, Kerr Muir MG, Marshall J: Photorefractive Keratectomy with an Argon Fluoride Excimer Laser: A Clinical Study. *Refractive & Corneal Surgery*, Vol 7 Nov./Dec. 1991.
20. G. Simon, Y. Takesue, P. Hostyn, F. Kuhne, J-M Legeais, F. Villain, Q. Ren, G. Margules, J-M. Parel: Long term in vivo topographic studies of gel injection adjustable keratoplasty (GIAK). *ARVO Invest Ophthalmol & Vis Res*, 1993.
21. Simon G, Parel J-M, Lee W, Kervick GN: Gel Injection Adjustable Keratoplasty (GIAK). *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 229: 1991.
22. Kiely PM, Carney LG, Smith G., Diurnal variations of corneal topography and thickness. *Am J Optom Physiol Opt* 1982; 59: 976 - 82.
23. Hara T, Hara T. Postoperative change in the corneal thickness of the pseudophakic eye: amplified diurnal variations and consensual increase. *J Cataract Refract Surg* 1987; 13: 325 - 9.
24. McRae S, Rich L, Phillips D, Bedrossian R. Diurnal variations in vision after keratotomy. *Am J Ophthalmol* 1989; 107: 262 - 7.
25. Wilson G, O'Leary DJ, Vaughn W. Differential swelling in the compartments of the corneal stroma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1984; 25: 1105.
26. Stephen Howking. A brief history of time.
27. Stringer, H. and Parr, J.: Shrinkage temperature of eye collagen. *Nature*, 204: 1404, 1964.