

4. RELACIÓN CONVERGENCIA-ACOMODACIÓN

- 4.1. Distancia interpupilar y línea base
- 4.2. Notaciones de la convergencia y de la línea de demanda
- 4.3. Relación ACA y relación CPA
- 4.4. Zona de visión binocular simple y nítida

4.1 DISTANCIA INTERPUPILAR Y LÍNEA DE BASE

El término convergencia tiene dos significados diferentes. Uno que describe la posición relativa de los ejes visuales cuando intersecan en un punto próximo (convergencia propiamente dicha) y el otro que indica el movimiento relativo de los ejes visuales cuando la fijación cambia de un punto A a un punto B más cercano o más lejano que A (variación de convergencia).

Por otra parte, un estado de divergencia no puede darse cuando se esté produciendo una fijación binocular de un objeto, ya que, en el caso más extremo de fijación binocular de un objeto en el infinito, los ejes visuales estarán paralelos.

Para poder realizar cálculos de convergencia es imprescindible aclarar una serie de definiciones:

- **Distancia interpupilar:** es la separación existente entre las pupilas de entrada de los ojos (PD y PI). Su medida es fácil de hacer con multitud de aparatos diseñados para ello, como reglas, pupilómetros, nasopupilómetros, etc. Pensemos que el valor de la distancia interpupilar varía con la distancia al punto de fijación.
- **Ángulo β :** ángulo que forman las líneas visuales principales.
- **Línea de base:** es el segmento que une los centros de rotación de los ojos (Q_D y Q_I).
- **Ángulo de convergencia (C):** ángulo que forman los ejes de fijación. Siempre $\beta > C$ (figura 4.1.2).

Para conocer el ángulo de convergencia es necesario conocer la longitud de la línea de base. Para ello utilizaremos el siguiente método indirecto (ver figura 4.1.1):

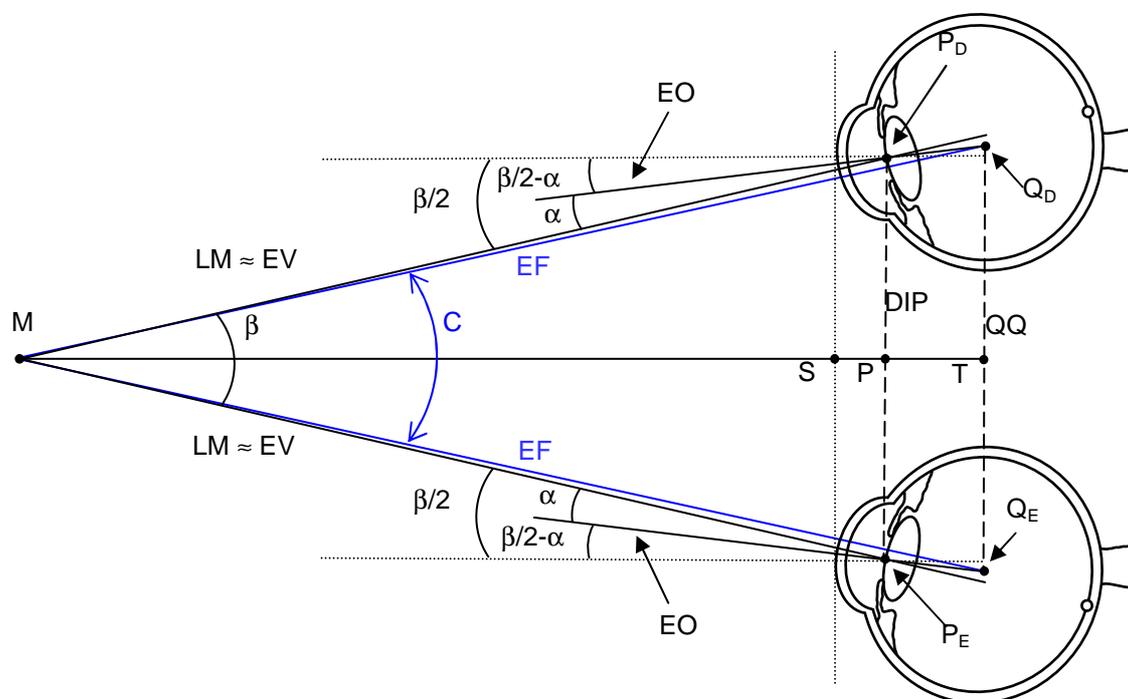


Figura 4.1.1: Esquema para la obtención de la longitud de la línea de base.

En él, analizamos solamente el caso en que el punto de fijación M se encuentra en el plano medio de la cabeza y el observador presenta las distancias nasopupilares simétricas. Además, como que desde el punto de vista práctico las únicas referencias oculares concretas son las relativas a las pupilas de entrada de los ojos (cuya ubicación es conocida de manera exacta), los ejes que utilizamos para trabajar son las líneas visuales principales (que asimilamos a los ejes visuales para facilitar el desarrollo del método) en lugar de los ejes de fijación. De esta forma:

$$\overline{Q_D Q_E} = \overline{P_D P_E} + 2x$$

$$\text{sen}\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right) = \frac{x}{\overline{P_D Q_D}} \Rightarrow x = \overline{P_D Q_D} \text{sen}\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right)$$

Así pues:

$$\overline{Q_D Q_I} = \overline{P_D P_I} + 2 \overline{P_D Q_D} \operatorname{sen} \left(\frac{\beta}{2} - \alpha \right)$$

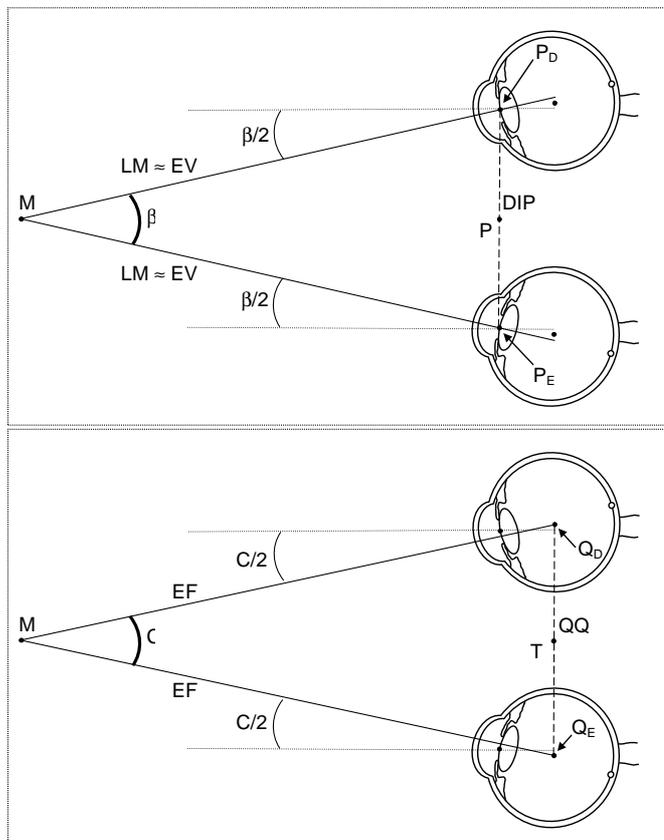
donde $\overline{P_D Q_D}$ es la separación entre la pupila y el centro de rotación que, en el ojo teórico de Le Grand y pasando por el vértice de la córnea, S, es:

$$\overline{P_D Q_D} = \overline{P_D S_D} + \overline{S_D Q_D} = -3.05 + 13.5 = 10.45 \text{ mm}$$

El cálculo del ángulo β lo realizaremos a partir de su tangente:

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) = \frac{\overline{P_D P_I}}{2 \overline{M P}} = \frac{\overline{P_D P_I}}{2 (\overline{M S} + \overline{S P})} = \frac{\overline{P_D P_I}}{2 (\overline{M S} + 3.05)}$$

donde $\overline{M S}$ es la distancia en milímetros a la que se encuentra el objeto de fijación respecto al vértice corneal con el signo cambiado. La distancia interpupilar $\overline{P_D P_I}$ debe ir también en milímetros.



β : Ángulo formado por las líneas de mirada (LM).
LM: línea des de el punto de fijación (M) hasta el centro de la pupila de entrada (P_D o P_E)

$C < \beta$
Para Lejos : $C \approx \beta$

Convergencia (C): Ángulo formado por los ejes de fijación (EF).
EF: línea des de el punto de fijación (M) hasta el centro de rotación (Q_D o Q_E)

Figura 4.1.2: Comparación entre el ángulo β y el ángulo de convergencia.

Finalmente, la tangente del ángulo de convergencia C es, suponiendo los datos del ojo de Le Grand y colocando todas las distancias en milímetros:

$$\operatorname{tg} C = \frac{\overline{Q_D Q_I}}{MQ} = \frac{\overline{Q_D Q_I}}{MS + SQ} = \frac{\overline{Q_D Q_I}}{MS + 13.5}$$

donde \overline{SQ} es la posición del centro de rotación respecto al vértice corneal.

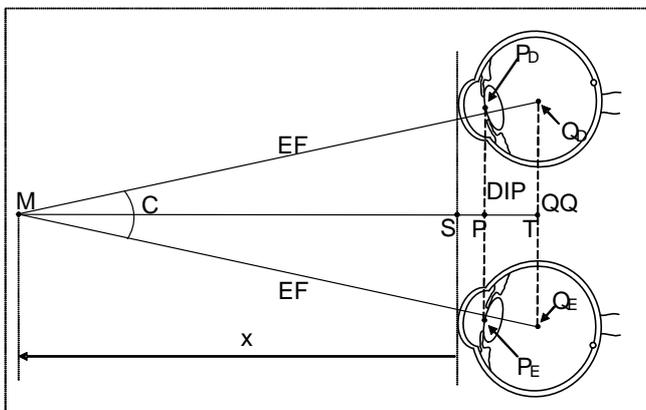
4.2 NOTACIONES DE LA CONVERGENCIA Y LÍNEA DE DEMANDA

Para expresar la convergencia se suelen utilizar básicamente tres unidades:

- a) **Grados (°):** se debe expresar el valor angular C en grados sexagesimales.

$$\tan \frac{C}{2} = \frac{QQ}{2 \cdot MT} \rightarrow \text{aproximación} \rightarrow \tan C = \frac{QQ}{MT}$$

$$C(^{\circ}) = \arctan\left(\frac{QQ}{MT}\right) = \arctan\left(\frac{QQ}{MS + ST}\right) = \arctan\left(\frac{QQ}{-x + ST}\right)$$



$$ST \approx 13,5 \text{ mm}$$

$$C(^{\circ}) = \arctan\left(\frac{QQ \text{ (m)}}{-x \text{ (m)} + 0,0135}\right)$$

- b) **Ángulos métricos:** corresponde al inverso de la distancia entre el objeto y la línea de base.

$$C(\text{am}) = -\frac{1}{QM}$$

$$C(\text{am}) = \frac{1}{MQ} = \frac{1}{-x + 0.0135} \rightarrow \text{aproximación} \rightarrow C(\text{am}) = \frac{1}{MS} = \frac{1}{-x}$$

$$A = R - X \rightarrow \text{Si } R = 0 \rightarrow A = -X = \frac{1}{-x} \quad C(\text{am}) = A(D)$$

c) **Dioptrías prismáticas**, definida según la siguiente fórmula:

$$C(\nabla) = 100 * \text{tg} C(^{\circ})$$

$$C(\nabla) = 100 \cdot \tan C(^{\circ}) = 100 \frac{QQ(\text{m})}{-x(\text{m}) + 0,0135}$$

$$C(\nabla) = \frac{QQ(\text{cm})}{-x(\text{m}) + 0,0135}$$

$$C(\nabla) = \frac{QQ(\text{cm})}{\frac{1}{C(\text{am})} + 0,0135} = \frac{QQ(\text{cm}) \cdot C(\text{am})}{1 + 0,0135 \cdot C(\text{am})}$$

$$0,0135 \cdot C(\text{am}) \ll 1 \rightarrow 1 + 0,0135 \cdot C(\text{am}) \approx 1$$

La relación existente entre estas dos últimas unidades es, asimilando la tangente al ángulo en radianes:

$$C(\nabla) \approx QQ(\text{cm}) \cdot C(\text{am})$$

Cabe remarcar el hecho de que en todo momento estamos trabajando con un punto de fijación sobre el plano medio de la cabeza, y así es como se mantiene a lo largo de todo el tema.

En el espacio acomodación-convergencia, la línea de demanda (LD) es la que une los puntos correspondientes a la demanda de convergencia y estímulo de acomodación al colocar un objeto de fijación binocular a diferentes distancias en el plano medio de la cabeza.

$$A = R - \frac{1}{x}$$

$$C(\nabla) = \frac{100 \overline{Q_D Q_I}}{-SM + 0.0135}$$

donde $\overline{SM} = x$.

Por lo tanto, la línea de demanda vendrá dada por la ecuación:

$$A = R + \frac{C(\nabla)}{Q_D Q_I (\text{cm}) - 0.0135 C(\nabla)}$$

No es la ecuación de una recta.

En el caso de un emétrope ($R = 0$), si despreciamos los 13.5 mm que separan el vértice corneal y el centro de rotación, la expresión anterior se reduce a:

$$A = \frac{C(\nabla)}{Q_D Q_I (\text{cm})}$$

que sí es una recta, y cuyo pendiente es la inversa de la longitud de la línea de base ($Q_D Q_I$) expresada en centímetros. La misma ecuación, utilizando la convergencia en ángulos métricos, es una recta de pendiente unidad:

$$A = C(am)$$

Por su extrema sencillez, estas dos últimas expresiones son las que se suelen utilizar habitualmente en la práctica clínica siempre que se necesita la línea de demanda. Tal i como se puede apreciar en la figura 4.2.1, esta aproximación es suficientemente buena para objetos de fijación alejados, pero no lo es tanto para objetos próximos.

Línea de Demanda (LD)

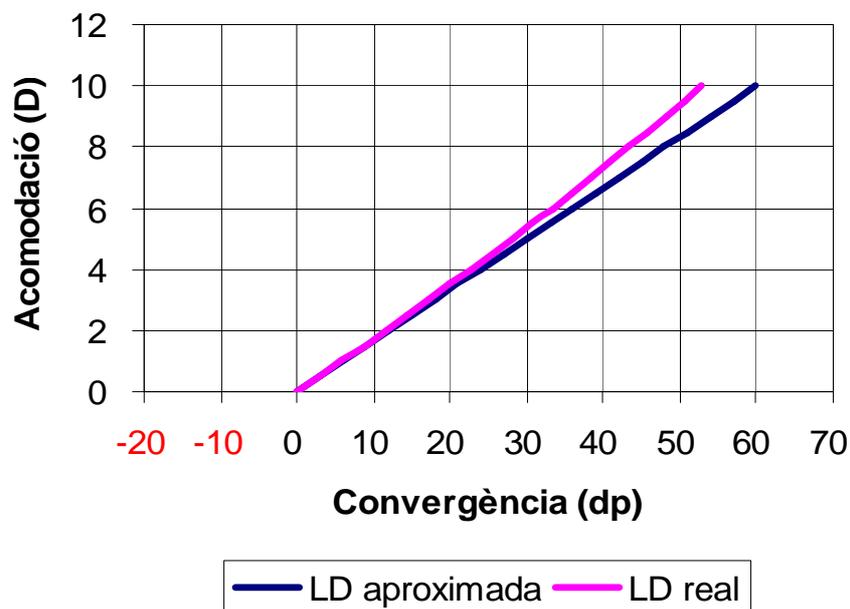


Figura 4.2.1: Línea de demanda y su aproximación a una recta.

Además de la línea de demanda, en los gráficos de relación acomodación-convergencia se representa la línea de forias, La *recta de las forias* (RF) es la recta de regresión que se obtiene a partir de los puntos que representan la relación convergencia-acomodación cuando se está en posición pasiva, en el espacio acomodación-convergencia. Por lo tanto, es *una línea que une los puntos correspondientes al estímulo de acomodación y los valores de convergencia obtenidos en visión disociada, cuando se coloca un objeto de fijación a diferentes distancias en el plano medio de la cabeza.*

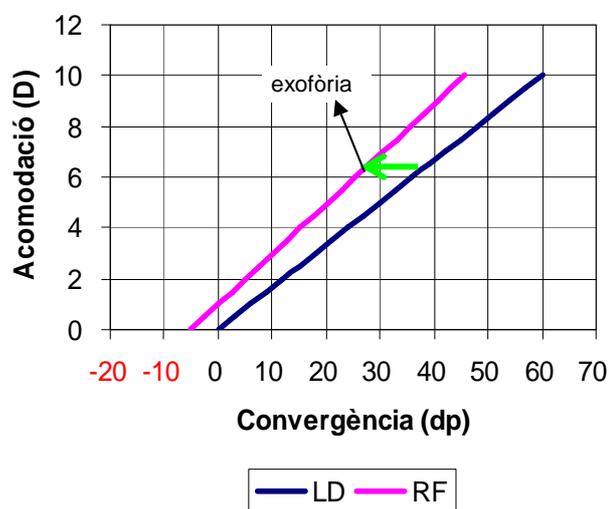


Figura 4.2.2 Ejemplo de línea de forias (LF) en el caso de una exoforia.

Se consideran desplazamientos de signo negativo en el caso de la exoforia y de signo positivo en el caso de la endoforia.

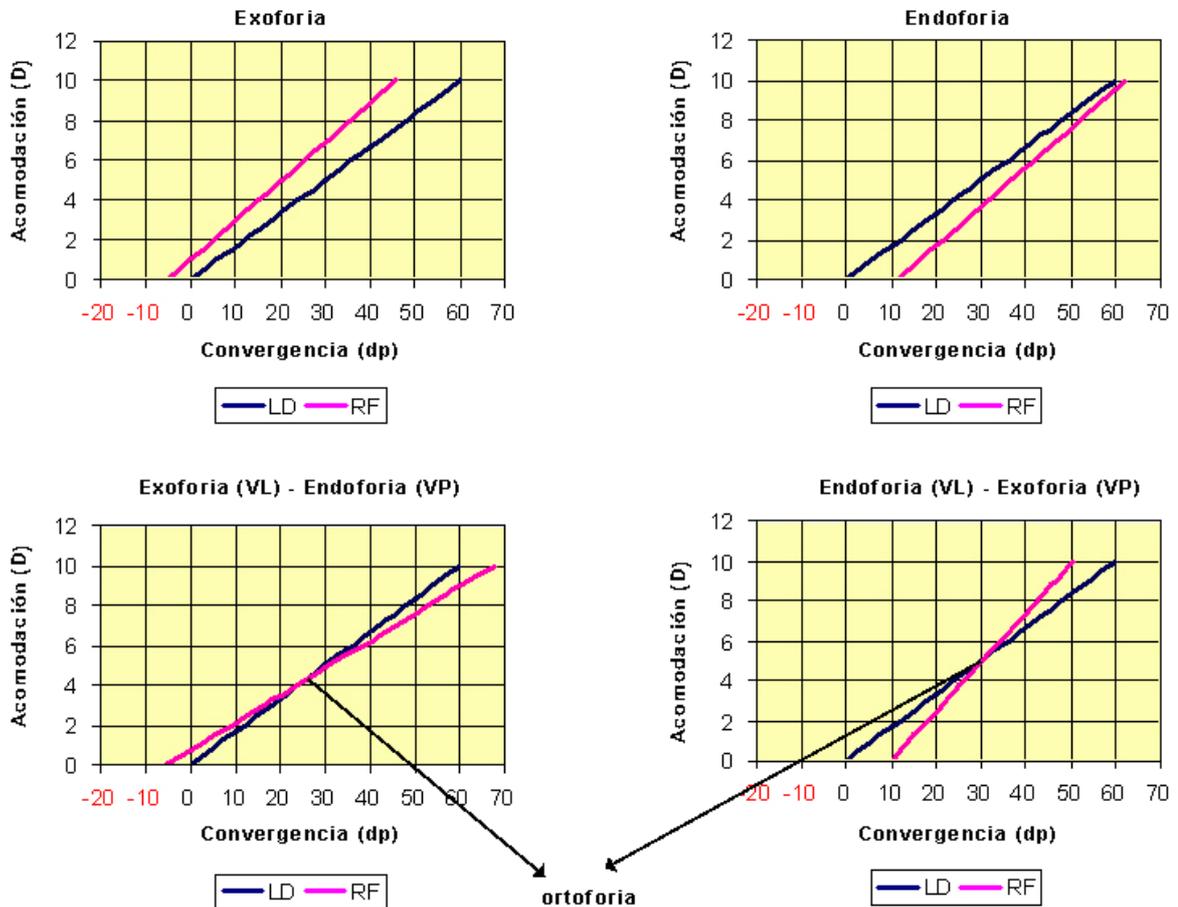


Figura 4.2.3: Recta de las forias de un exofórico para todas las distancias (a), de un endofórico para todas las distancias (b), de un exofórico de lejos y endofórico de cerca (c) y de un endofórico de lejos y un exofórico de cerca (d).

En la figura 4.2.3 tenemos representadas las posibles localizaciones de la recta de las forias respecto la línea de demanda. El ortofórico para todas las distancias presentaría una recta de las forias coincidente con la línea de demanda. En el punto en el que se cruzan la línea de demanda y la línea de forias, indicará que el paciente es ortofórico en ese punto o distancia.

4.3 RELACIÓN ACA

Como ya se ha podido intuir en el apartado anterior, cambios en la acomodación inducen cambios en la convergencia y, simétricamente, cambios en la convergencia comportan cambios en la respuesta acomodativa. Según la ley de Hering o de igual inervación, en un observador normal, la respuesta pupilar y la respuesta acomodativa de los dos ojos son siempre prácticamente iguales aunque el estímulo pueda estar restringido a un ojo o ser desigual para ambos ojos (Estrictamente hablando, esta ley se aplica a los movimientos binoculares, pero puede extenderse o incluir la acomodación y la miosis pupilar.). No vamos a tratar de probar la validez de esta ley ni citar las referencias que la apoyan, ya que no es el objetivo del apartado. Un cambio de convergencia producido por prismas, sin variar la acomodación, puede causar una pequeña modificación pupilar, aunque más pequeña que la que tiene lugar cuando variamos la acomodación sin variar la convergencia.

Lo cierto es que existe una sinergia entre la convergencia y la acomodación, y que va acompañada de una miosis pupilar. La interrelación entre estas tres variables (acomodación, convergencia acomodativa y miosis pupilar) recibe el nombre de *tríada proximal*. El estudio de esta sinergia se hace a partir de dos métodos distintos: el método de la recta de las forias y el método del gradiente y se restringe solamente al caso de las heteroforias horizontales.

$$ACA = \frac{\Delta(\text{Convergència Acomodativa})}{\Delta(\text{Acomodació})}$$

Se consideran relaciones ACA bajas aquellas que son inferiores a 4 y relaciones fuertes a aquellas relaciones ACA superiores a 6.

Existen diferentes métodos para calcular esta relación de acomodación-convergencia:

- Método de la recta de las forias
- Método de la recta de las forias aproximado
- Método de gradiente

4.3.1 Método de la recta de las forias

Para determinarlo se siguen los siguientes pasos:

- Se determinan las heteroforias horizontales a diferentes distancias.
- Se representan los puntos en un gráfico acomodación-convergencia.
- Se calcula la recta de regresión de estos puntos:

$$A_{RF}(D) = m \cdot C_{RF}(\nabla) + p$$

El valor de la relación ACA se determina a partir de la inversa de la pendiente de la recta de las forias en ∇/D .

$$ACA = \frac{1}{m}$$

donde m es la pendiente de la recta de las forias.

4.3.2 Método de la recta de las forias aproximado.

De todas formas, en la práctica optométrica se utiliza la forma *aproximada* de este método, ya que supone un ahorro de tiempo para el profesional, y los resultados obtenidos con ella se desvían poco o nada de los obtenidos a partir del proceso anterior puesto que el ajuste por regresión lineal de la recta de las forias es excelente. Consiste en hallar la pendiente de la recta de las forias a partir de dos puntos extremos de la misma: visión de lejos y visión de cerca.

De esta forma, el optometrista sólo debe medir la foria de lejos y la foria de cerca. En la figura 7.3.2.1 está representada la recta de las forias de un endofórico para todas las distancias. Para visión de lejos la acomodación requerida (AR) y convergencia requerida (CR) son cero. En visión de cerca ambas variables son no nulas y, en la figura, están representadas respectivamente por AR y CR. Así pues, la ecuación de la recta de las forias es:

$$A(D) = \frac{AR}{CR+FC-FL} C(\nabla) - \frac{AR*FL}{CR+FC-FL}$$

donde FC es la foria de cerca y FL es la foria de lejos.

Haciendo la inversa de la pendiente de la recta obtenemos el valor aproximado de la recta de las forias:

$$ACA = \frac{CR+FC-FL}{AR}$$

recordemos que AR y CR son la acomodación y convergencia requeridas en visión cercana; las exoforias (medidas con prismas de base nasal) tienen signo negativo, y las endoforias (medidas con prismas de base temporal) positivo.

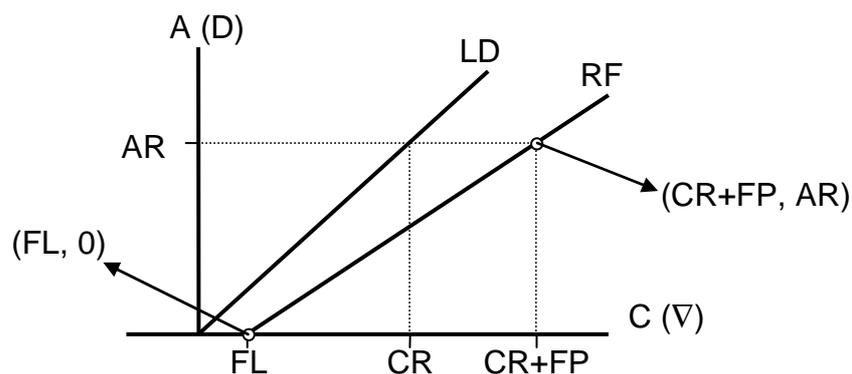


Figura 4.3.2.1: Esquema para el cálculo de la relación ACA por el método aproximado de la recta de las forias.

Como que el ajuste por regresión lineal de la recta de las forias es excelente, los valores de ACA obtenidos por ambos procedimientos difieren en cantidades poco significativas, lo que permite dar absoluta credibilidad a los valores del ACA obtenidos por el procedimiento aproximado.

4.3.3 Método del gradiente

Según el Dictionary of Visual Science de Cline, Hofstetter y Griffin, se define como gradiente ACA el cambio que tiene lugar en la foria, al cambiar en 1 D la potencia de las lentes para una distancia de observación determinada. De esta forma se mide la relación ACA. Cambiar en +1 D la potencia de las lentes que permiten ver el test de forma nítida, implica relajar la acomodación en 1 D. Cambiar en -1 D la potencia de las lentes que permiten ver el test de forma nítida, implica incrementar la acomodación en 1 D. De esta forma, el cálculo de la relación ACA a partir de este método es:

$$\text{Grad ACA} = \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{F_{CL} - F_{SL}}{A_{CL} - A_{SL}}$$

donde ∇F es la diferencia de forias, ∇A es la diferencia de acomodación y los subíndices CL y SL indican respectivamente con lente y sin lente.

El valor de la relación ACA obtenido con el método del gradiente siempre suele ser inferior (del orden de la mitad) al obtenido con el método de la recta de las forias, ya que en el método del gradiente sólo se considera una única distancia, y no se varía, por ejemplo, la convergencia proximal.

Se debe tener en cuenta que puede variar la relación ACA dependiendo del signo de la lente que utilizamos para el cálculo gradiente. Si se utiliza una lente positiva, se relajará la acomodación y en consecuencia se verá relajada la convergencia acomodativa y obtendremos valores mayores de exoforia o menores en endoforias. Por el contrario si se utiliza una lente negativa, se estimulará la acomodación estimulando a su vez la convergencia acomodativa, y en consecuencia se obtendrán valores menores de exoforia o mayores de endoforia. Por este motivo, en la práctica clínica en ocasiones se calcula con ambas lentes (por ejemplo, -1.00 D y +1.00 D) y posteriormente se hace una media.

Habitualmente el método de gradiente proporciona valores menores que el método de cálculo: $ACA_G < ACA_C$ (i $ACA_G < ACA_{RF}$) y esto es debido a dos motivos:

- En VL no está presente la convergencia proximal, mientras que en visión próxima sí. Por lo tanto, la diferencia de convergencias no es exclusivamente acomodativa (variaciones de convergencia acomodativa y también de convergencia proximal)
- Cuando a una determinada distancia se utilizan lentes esféricas (método del gradiente), actúan sobre la acomodación y en consecuencia sobre la convergencia acomodativa, pero no sobre la convergencia proximal (será la misma antes y después de situar las lentes delante de los ojos). Los cambios de convergencia serán exclusivamente de convergencia acomodativa.

Según lo que acabamos de mencionar, también podemos determinar la relación de convergencia proximal frente a la acomodación por la diferencia entre la relación ACA de cálculo y la relación ACA de gradiente.

CP/A (relación convergencia proximal / acomodación): $CP/A = ACA_C - ACA_G$

La forma más adecuada de conocer la sinergia convergencia-acomodación es calcular la relación ACA por ambos métodos y, así, complementar ambas informaciones:

- ✓ El resultado del ACA obtenido por el método de la recta de las forias nos da referencia del equilibrio dinámico de las vergencias a diferentes distancias y de la capacidad del sujeto de pasar fácilmente de una distancia de visión a otra. Es una medida de la latitud funcional.
- ✓ El resultado del ACA obtenido por el método del gradiente, nos indica la influencia de la acomodación sobre la binocularidad, y nos da información de la capacidad de la persona para aceptar una nueva prescripción que difiere de la anterior en una cantidad positiva o negativa de esfera.

4.4 ZONA DE VISIÓN BINOCULAR NÍTIDA Y HAPLÓPICA

En el espacio acomodación-convergencia, la zona de visión binocular nítida y haplópica (ZVBNH) es el área delimitada por 6 rectas, las líneas de borrosidad derecha e izquierda, las líneas de amplitud de acomodación y acomodación cero, y los límites correspondientes a los puntos próximo y remoto de convergencia (figura 4.4.1).

- **Amplitud de acomodación:** delimita la parte superior de la ZVBNH.
- **Punto próximo de convergencia (PPC):** delimita la parte superior derecha de la ZVBNH.
- **Punto remoto de convergencia (PRC):** delimita la parte inferior izquierda de la ZVBNH.
- **Línea de borrosidad derecha:** se obtiene determinando la cantidad de prisma de base temporal (∇ BT) y/o cantidad de potencia positiva (L(+)) que produce borrosidad en la percepción de un test situado a una distancia determinada del paciente. En algunas ocasiones no se detecta esta borrosidad sino que inmediatamente se produce la ruptura de la fusión, dando lugar a la diplopía o a la visión doble. En este caso, también se considerará el resultado como una información referente a la línea de borrosidad derecha.
- **Línea de borrosidad izquierda:** se obtiene determinando la cantidad de prisma de base nasal (∇ BN) y/o cantidad de potencia negativa (L(-)) que produce borrosidad en la percepción de un test situado a una distancia determinada del paciente. En algunas ocasiones no se detecta esta borrosidad sino que inmediatamente se produce la ruptura de la fusión, dando lugar a la diplopía o a la visión doble. En este caso, también se considerará el resultado como una información referente a la línea de borrosidad izquierda.

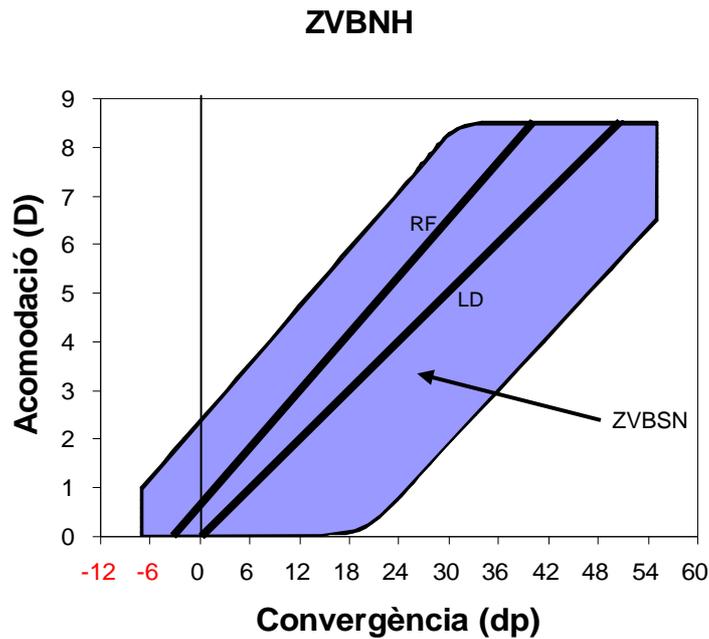


Figura 4.4.1: Aspecto de la ZVBNH incluyendo la Línea de demanda y la recta de las forias.

En la representación práctica de la ZVBNH se considerará que está delimitada por cuatro rectas, dando lugar a una figura parecida a un paralelogramo (a no ser que se incorpore la información referente a los PPC y PRC) (figura 4.4.2 y 4.4.3):

- **Recta limitante superior (RLS):** corresponde al valor de acomodación igual a la amplitud de acomodación del paciente.
- **Recta limitante inferior (RLI):** corresponde al valor de acomodación igual a cero.
- **Recta limitante derecha (RLD):** corresponde a la recta de regresión obtenida a partir de puntos situados a la derecha de la LD. (Puntos obtenidos con ∇ BT y L(+)).
- **Recta limitante izquierda (RLI):** Corresponde a la recta de regresión obtenida a partir de los puntos situados a la izquierda de la LD. (Puntos obtenidos con ∇ BN y L(-)).

Para determinar RLD y RLI, se sitúa el test a diferentes distancias que el paciente sea capaz de percibir simple y nítido. Estas distancias nos indican

cuál es el punto de partida sobre la LD. Se aumentará progresivamente la potencia de prismas hasta que vea doble o la potencia de lentes hasta que vea borroso. Se calcula la recta que mejor se adapte a los puntos obtenidos mediante regresión lineal.

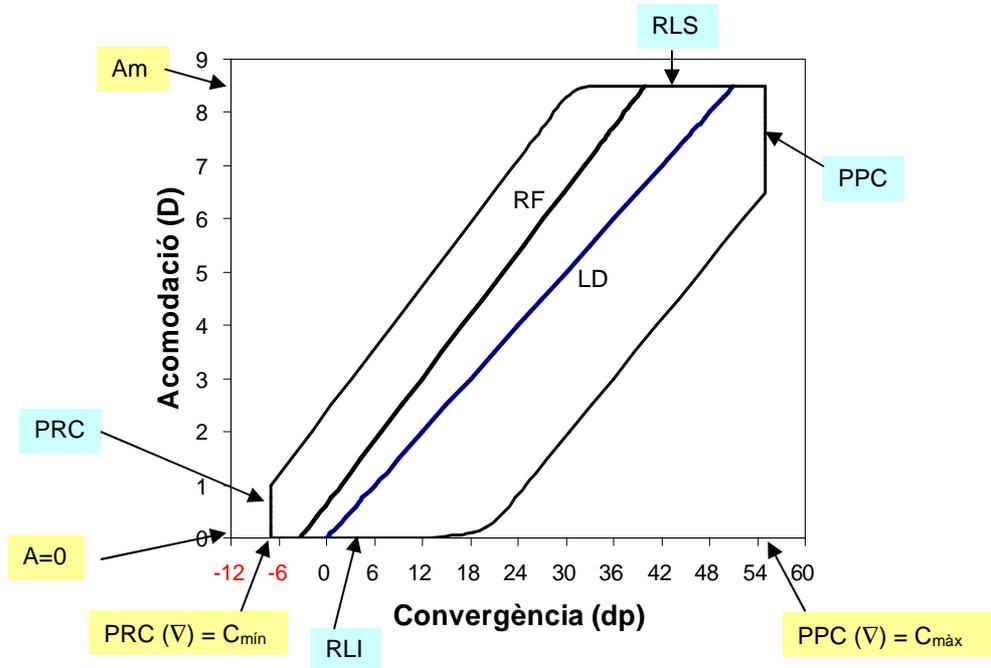


Figura 4.4.2: Límites de la ZVBSN.

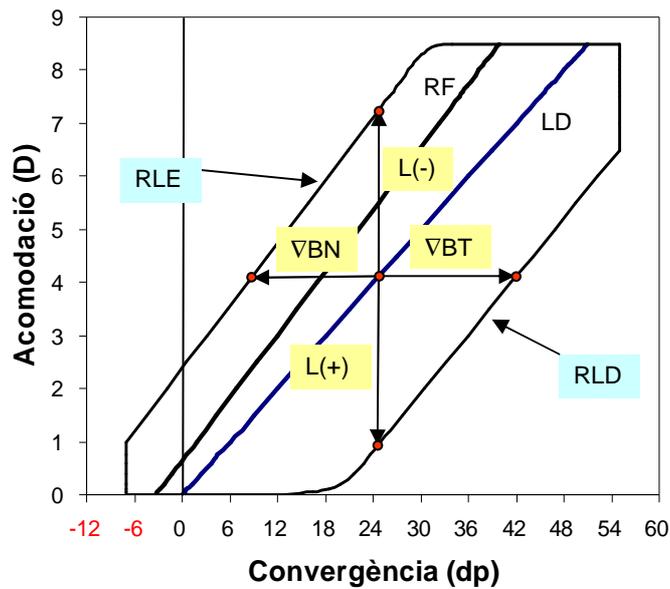


Figura 4.4.3: Límites de la ZVBSN

En base a la relación acomodación-convergencia podemos definir una serie de conceptos íntimamente ligados a la ZVBNH.

- **Amplitud relativa de convergencia (ARC):** para un valor de acomodación determinado, es la longitud del segmento horizontal que va desde la RLI hasta la RLD. Es la variación que permite la convergencia si se mantiene constante la acomodación.
 - **Convergencia relativa positiva (CRP):** para un valor de acomodación determinado, es la longitud del segmento horizontal que va desde la LD hasta la RLD. Es decir, la cantidad de convergencia que puedo estimular manteniendo constante la acomodación.
 - **Convergencia relativa negativa (CRN):** para un valor de acomodación determinado, es la longitud del segmento horizontal que va desde la LD hasta la RLE. Por lo tanto, es la cantidad de convergencia que puedo relajar manteniendo constante la acomodación.
- **Convergencia fusional positiva (CFP):** para un valor de acomodación determinado, es la longitud del segmento horizontal que va desde la RF hasta la RLD.
- **Convergencia fusional negativa (CFN):** para un valor de acomodación determinado, es la longitud del segmento horizontal que va desde la RF hasta la RLE.
- **Amplitud relativa de acomodación (ARA):** para un valor de convergencia determinado, es la longitud del segmento vertical que va desde la RLI o RLS hasta la RLD o RLE.
 - **Acomodación relativa positiva (ARP):** para un valor de convergencia determinado, es la longitud del segmento vertical que va desde la LD hasta la RLS o la RLE. En otras palabras, es la cantidad de acomodación que puedo estimular manteniendo la convergencia estable. Los valores dependen en gran medida de la edad del paciente.

- **Acomodación relativa negativa (ARN):** para un valor de convergencia determinado, es la longitud del segmento vertical que va desde la LD hasta la RLI o la RLD. Es decir, es la cantidad de acomodación que puedo relajar manteniendo estable la convergencia.
- **Reserva fusional positiva (RFP):** exceso de convergencia fusional respecto a la requerida para superar la exoforia existente. Corresponde a la CRP en el caso de una exoforia.
- **Reserva fusional negativa (RFN):** exceso de divergencia fusional respecto a la requerida para superar la endoforia existente. Corresponde a la CRN en el caso de una endoforia.

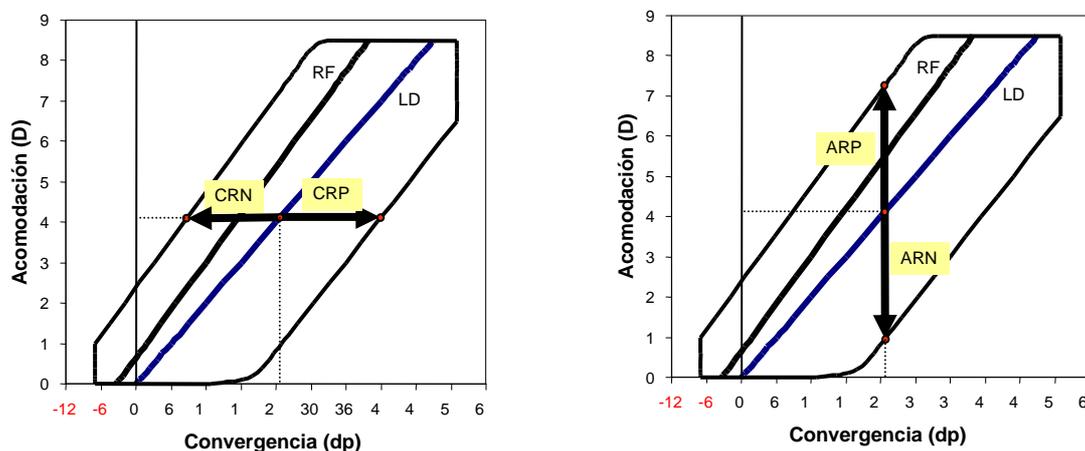


Figura 4.4.4. Representación de las amplitudes relativas y convergencias relativas.

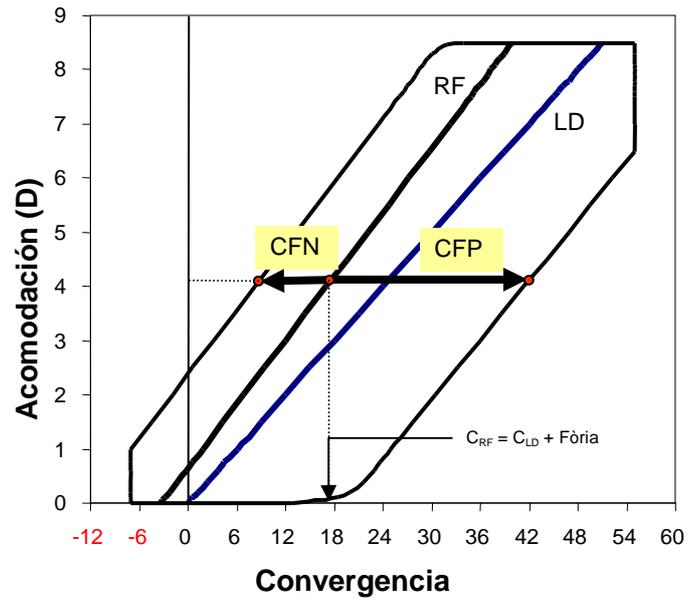


Figura 4.4.5. Representación de las convergencias fusionales.