Curso de aplicaciones fotográficas

Macrofotografía

Fotografía aplicada

Original:06/09/10 Copia:26/11/10

1 Fundamentos de fotomacrografía

#1.1 Ecuación de Gauss de las lentes

Vamos a suponer un punto a una altura h del eje de una lente delgada que está a una distancia d. Forma su imagen, de altura h' a la distancia d' (fig 1).

El punto A lanza una esfera de luz en todas las direcciones. Vamos considerar solo dos de estos rayos de luz: el que pasa por la intersección de eje de visión con la lente (línea AA') y el que es paralelo a ella (línea AB).

El punto C es el punto focal del objetivo. La distancia OC es la *longitud focal* el objetivo, que vamos a llamar F.

Vamos a considerar sistemas de triangulos: el que forma el objeto A y su imagen, A' (triangulos AHO y A'H'O) y el que forma la lente y la imagen A' (triángulos BOC y A'H'C).

~~Imagen del esquema de la ecuación de Gauss~~

fig 1

Del primer triángulo tenemos que:

$$\frac{h}{d}=\frac{h'}{d'} \quad \text{[EC 1]}$$

$$\frac{h}{h'}=\frac{d}{d'} \quad \text{[EC 2]}$$

$$m=\frac{h'}{h} \quad \text{[EC 3]}$$

Donde m es la *magnificación* o *factor de ampliación*. Es decir, el número de veces que es más grande la longitud de la imagen que la lognitud del objeto que la produce.

En el segundo triángulo vemos que:

$$\frac{h}{F}=\frac{h'}{d'-F}$$

Donde F es la longitud focal del objetivo.

Por tanto, recurriendo a la ecuación EC 1:

$$\frac{d'-F}{F}=\frac{h'}{h}$$

Por tanto

$$\frac{d'-F}{F}=\frac{d'}{d}$$

$$\frac{d'}{F}-1=\frac{d'}{d}$$

$$\frac{d'}{F}=\frac{d'}{d}+1$$

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{d'} \quad \text{[EC 4]}$$

La ecuación 4 es la llamada *ecuación de gauss* y podríamos decir que es la ecuación fundamental de la lente.

Recordemaos que F es la longitud focal de la lente, cuya inversa (1/F) se llama *potencia de la lente* y se mide en *dioptrías*. La longitud focal de la lente se mide en metros en el sistema internacional aunque en la práctica fotográfica preferimos usarla en milímetros.

La d es la distancia del objeto a la lente y d' la de la lente a la película (a la imagen).

El enfoque se consigue cambiando la distancia de la lente a la película (d') lo que provoca que cambie la distancia a la que se enfoca la escena.

Lo que nos dice la ecuación es que cuanto más cerca está el objeto que enfocamos más lejos se produce su imagen.

#1.2 Enfoque mínimo

¿Cual es la mínima distancia a la que podemos enfocar? Vamos a escribir la ecuación de gauss despejando la distancia de la lente a la película:

$$\frac{1}{d'}=\frac{1}{d}-\frac{1}{F}$$

Si la distancia de enfoque (de la lente al objeto) es la longitud focal entramos en una incongruencia:

$$\frac{1}{d'}=\frac{1}{F}-\frac{1}{F}$$

$$\frac{1}{d'}=0$$

Y es imposible obtener un 0 mediante una división a no ser que el denominador sea infinitamente grande. Por tanto a una distancia de enfoque igual a la longitud focal la imagen se forma en el infinito. Si tratamos de enfocar a una distancia menor que la longitud focal nos sucede que el lado derecho de la ecuación será menor que cero, por tanto negativo y la imagen se forma *delante* de la lente. Se trata por tanto de una imagen virtual y no real, que no podemos aprovechar con una cámara fotográfica.

Por tanto:

No se puede enfocar a menos distancia que la focal del objetivo.

Por ejemplo, un objetivo de 50mm no se puede enfocar a menos de 50mm, un objetivo de 100mm no se puede enfocar a menos de 100mm.

En realidad la distancia mínima de enfoque no es la longitud focal, sino el doble, porque aunque heos llamado *distancia de enfoque* a la d, que es la que hay entre el centro óptico de la lente y el objeto, lo cierto es que la distancia de enfoque con que se marcan los objetivos es la que hay entre el objeto y la película. Es decir, la suma de d con d'.

#1.3 Limitaciones de la ley de Gauss

Para deducir la ley de gauss hemos realizado una serie de simplificaciones geométricas. En el ejemplo, tal cual lo hemos expuesto, solo se han considerado dos rayos y hemos impuesto, sin demostrarlo, que el rayo paralelo al eje pasa por un punto fijo que el punto focal. En realidad deberíamos demostrar esto, pero no lo vamos a hace aquí.

Las simplificaciones que hemos hecho suponen que solo se ha estudiado la óptica de la lente considerando los rayos que tienen muy poca inclinación respecto del eje de la lente, que esta tiene un perfil perfectamente esférico y que su grosor es infinitésimos.

Esto supone que los cálculos de las lentes mediante esta ecuación solo sirven cuando los rayos de luz vienen muy paralelos al eje y muy cerca de él. Por tanto cuando los rayos vienen muy inclinados los cálculos fallan.

Los rayos vienen muy inclinados en dos casos: con los objetos situados muy fuera de cuadro y con los objetos muy cerca de la lente.

De hecho los objetivos se calculan con la ecuación de Gauss y solemos decir que sus cálculos son más o menos exactos cuando la distancia de enfoque es al menos diez veces mayor que su longitud focal.

Cuando queremos enfocar a distancias menores a 10 veces la longitud focal conviene emplear objetivos calculados especialmente para estos casos. Son los llamados *objetivos macro*.

#1.4 Determinación del tamaño del objeto a partir de su imagen

La fotogrametría es la medición de distancias y superficies a partir de fotografías. Para ello hay que conocer la longitud focal del objetivo.

La ley de Gauss de las lentes relaciona la longitud focal del objetivo con su distancia a la figura enfocada y a la cámara. Simplificadamente la ley de gauss se escribe así:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{d'}$$

Donde F es la longitud focal del objetivo, d la distancia del punto enfocado de la escena al centro óptico de la escena y d' la que va del centro óptico a la película.

Si el objetivo estuviera constituido por una sola lente delgada el centro óptico sería el de esta lente.

Si el ángulo abarcado desde el objetivo sobre la escena fuera igual al ángulo cubierto por el objetivo sobre el fotograma -algo que sucede con una cámara estenopeica o con un objetivo de lente delgada- en este caso podemos relacionar fácilmente los tamaños en longitud de un objeto, de su imagen y de la distancia entre el objeto y la lenta y ésta y la película.

Dado que los ángulos desde el objetivo en ambas direcciones son iguales podemos escribir:

$$\frac{h}{d}=\frac{h'}{d'}$$

Donde h es la altura del objeto, h' la de su imagen, d la distancia del objeto al objetivo y d' del objetivo a la imagen.

De ambas ecuaciones podemos deducir que:

$$m=\frac{h'}{h}=\frac{d'}{d}$$

Esta relación entre la altura de la imagen y la del objeto que la produce es muy importante, tanto que tiene nombre propio, se llama *ampliación* y suele escribirse con la letra *a* o la *m*. Aquí emplearemos la *a*.

Cuando enfocamos a infinito, la distancia d es la longitud focal del objetivo, por tanto:

$$objeto=\frac{Distancia\ de\ enfoque \cdot imagen\ del\ objeto}{Longitud\ \ focal}$$

#1.5 Ángulo de visión

La longitud del objeto que fotografiamos se proyecta en la imagen a través del estenopo (centro óptico de la lente delgada que lo representa).

Por tanto los ángulo con que se proyectan los lados del cuadro de imagen dependen de la distancia a la que está el estenopo de la pelicula. Por tanto, de la longitud focal del objetivo.

~~Ilustración con el esquema para determinar el ángulo de visión~~

Para una cámara que forma una imagen rectangular tenemos tres ángulos de visión importantes que son el correspondiente al lado largo, al lado corto y a la diagonal. Normalmente el dato que se ofrece es el de la diagonal.

Supongamos que tenemos un lado del fotograma que mide H milímetros y que el objetivo tiene una longitud focal F. Tenemos por tanto un triángulo con vértice en el objetivo y cuya base mide H y altura F. La pendiente del triángulo es la mitad de H dividida entre F:

$$\frac{H}{2\mathrm{F}}$$

Una pendiente no es más que una tangente, por tanto este ángulo que forma la mitad del largo de la película con la longitud focal es el arcotangente de lo anterior. Es decir:

$$atan\left(\frac{H}{2\mathrm{F}}\right)$$

Y como este es la mitad del ángulo total que buscamos, el ángulo de visión resulta ser:

$$\alpha=2\cdot atan\left(\frac{H}{2\mathrm{F}}\right)$$

El resultado está en radianes. Si lo queremos en grados.

$$\alpha=\frac{360}{\pi}\cdot atan\left(\frac{H}{2\mathrm{F}}\right)$$

Los ángulos se calculan para H igual al largo, ancho y diagonal.

#1.6 Luminosidad de un objetivo

Sea un punto A emisor de luz y del que queremos conocer la iluminancia que produce en el interior de la cámara fotográfica. (fig 2)

~~Esquema de la iluminancia en el interior de la cámara~~

Fig 2

Si suponemos que el objetivo no tiene pérdidas (pensamos en un estenopo sin difracción) todo el flujo emitido que alcanza al estenopo pasa hasta iluminar el plano de la película. La iluminancia en el interior de la cámara es el flujo divido entre la superficie iluminada.

$$E_p=\frac{\Phi}{S'}$$

Fi es el flujo, Ep la iluminancia en el fondo de la cámara, en la película. S' es la superficie iluminada.

Pero el flujo que llega hasta la película, si no hay pérdidas, es el mismo emitido por el punto que representa al objeto de la fotografía, ya que *flujo* es el nombre que damos a la energía luminosa. Por lo que podemos relacionar la luz que forma la imagen del objeto con la luz que emite el objeto a través del flujo.

Por tanto:

$$j_1=\frac{\Phi}{\varepsilon_1}$$

La intensidad emitida por el punto es j1, fi es el flujo radiante que nos interesa y epsilon es el ángulo sólido con vértice en el punto y base en el estenopo (diafragma).

$$\phi = j_1 \varepsilon_1$$

$$\phi = E_p S'$$

Así:

$$E_p = \frac{j_1 \varepsilon_1}{S'}$$

Vamos a quitar la S', hay una relación geométrica que debemos tener en cuenta y es que la proporción que guarda entre la superficie del objeto y el cuadrado de su distancia al objetivo es la misma que hay entre la superficie de la imagen del objeto y el cuadrado de su distancia al objetivo:

$$\frac{S_1}{d^2} = \frac{S'}{d'^2}$$

S1 es la superficie del objeto, S' la superficie de la imagen del objeto que corresponde a S. d es la distancia del objeto a la lente (al estenopo) d' es la distancia del estenopo hasta la imagen del objeto.

Con lo que:

$$\frac{1}{S'} = \frac{d^2}{d'^2 S_1}$$

Por tanto la iluminancia en la cámara que, recordemos valía

$$E_p = \frac{j_1 \varepsilon_1}{S'}$$

La podemos reescribir asi:

$$E_p = \frac{d^2}{d'^2 S_1} j_1 \varepsilon_1$$

Epsilon es el ángulo sólido abarcado del cono con base (esférica) en el estenopo y vértice en el punto radiante del objeto. Si el estenopo es pequeño y el objeto está a una distancia comparativa muy grande, la diferencia entre la superficie esférica de la base y la superficie plana es despreciable, así que suponemos que es una disco.

Por definición el ángulo sólido es la superficie de la base (esférica) del cono dividida entre el cuadrado de su altura. Aquí la altura del cono es d, la distancia del objeto al objetivo.

$$\varepsilon = \frac{S_f}{d^2}$$

Y la superficie de este cono es el diafragma (el estenopo) y como hemos dicho vamos a suponer que es plano, no esférico. Por tanto:

$$\varepsilon = \frac{1}{d^2} \pi r^2$$

Donde r es el radio de la abertura del diafragma (el radio del estenopo).

Sin embargo vamos a escribir la fórmula dependiendo del diámetro D no del radio r, entonces es:

$$\varepsilon = \frac{1}{d^2} \frac{\pi D^2}{4}$$

Sustituyendo:

$$E_p = \frac{d^2}{d'^2 S_1} j_1 d^2 \frac{\pi D^2}{4}$$

Con lo que simplificando y reordenando tenemos:

$$E_p=\frac{\pi j_1 D^2}{4 S_1 d'^2}$$

O mejor escrito:

$$E_p=\frac{\pi j_1}{4 S_1}\frac{D^2}{d'^2}$$

En la fracción que tenemos a la izqueirda solo hay constantes. Pi cuartos es, obviamente una constante mientras que la intensidad emitida J1 dividida entre la superficie que la emite es la luminancia del objeto que fotografíamos. La luminancia de un objeto no lambertiano ya que la definición estricta divide este valor por pi, de manera que en realidad la intensidad entre la superficie emisora si bien no es estrictamente la luminancia si que es proporcional a ella y dependería del factor de peso que asignáramos a la dirección de emisión.

En la fracción de la derecha tenemos el diametro del estenopo (elevado al cuadrado) y la distancia del estenopo a la película. El diámetro del estenopo es el diámetro del diafragma. Por tanto la cantidad de luz que llega al fondo de la cámara solo depende de la proporción que guardan el diámetro del diafragma con la distancia a la que se coloca la película y no de sus valores absolutos.

Es decir, si alejamos la lente de la película una distancia y aumentamos el diámetro del estenopo (diafragma) la misma cantidad la cantidad de luz que llega a la película no cambia. Como al enfocar cambiamos la distancia de la lente a la película, la cantidad de luz que alcanza a esta es diferente con cada enfoque. Los objetivos se construyen de manera que entre la distancia mínima de enfoque y la de infinito no haya más de 1/6 de paso de diferencia, lo que es inapreciable en la prácitca. Sin embargo al hacer enfoques a muy corta distancia si que se hace notar esta falta de luz.

Al enfocar a infinito la distancia d' del objetivo a la película es, por definición, la longitud focal del objetivo. Por tanto la división del diámetro del diafragma entre la longitud focal es una constante. A la inversa de esta fracción la llamamos *número f* y caracteriza la luminosidad de un objetivo.

Es decir, para una distancia cualquiera de enfoque:

$$f=\frac{d'}{D}$$

Cuando enfocamos a infinito:

$$f=\frac{F}{D}$$

Y la ecuación de la iluminación en cámara queda:

$$E_p=\frac{C\cdot L}{f^2}$$

Donde L es la luminancia del objeto y C una constante que modifica la luminancia según sea la dirección desde la que se ve (multiplicada por pi cuartos) y f es el número f del objetivo.

#1.7 Cambio de la distancia de enfoque al añadir un tiraje

Al alejar el objetivo una distancia de la cámara (*tiraje*) cambiamos la distancia mínima de enfoque. Podemos dar una fórmula para calcularlo pero resulta demasiado engorrosa y resulta más conveniente hacerlo en dos partes.

La ecuación de gauss relaciona la distancia de enfoque con la del objetivo a la película. Cuando no usamos un tiraje la ecuación es esta:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d}+\frac{1}{d'}$$

Y si añadimos una anilla de extensión alejamos el objetivo una distancia T que se suma a la d' con lo que cambia la distancia de enfoque, es decir d ya no puede ser la misma:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d_2}+\frac{1}{d'+T}$$

Podemos despejar d' en la primera y sustituirla en la segunda, pero el resultado es bastante molesto de recordar. Resulta mejor operar numéricamente, calculando primero la distancia a la que queda el objetivo y con esta y el tiraje determinar el nuevo enfoque. Es decir:

1º La distancia del objetivo a la película, sin tiraje es:

$$\frac{1}{d'}=\frac{1}{F}-\frac{1}{d}$$

Por tanto

$$d'=\frac{F\cdot d}{d-F}$$

2º La nueva distancia de enfoque es:

$$\frac{1}{d_2}=\frac{1}{F}-\frac{1}{d'+T}$$

$$d_2=\frac{F(d'+T)}{d'+T-F}$$

Por ejemplo. Nuestro objetivo de 50mm tiene una distancia mínima de enfoque, desde el centro del objetivo, de 30cm. Queremos saber a qué distancia estará enfocado al añadir una anilla de extensión de 12mm.

Primero calculamos a qué distancia está el centro del objetivo de la película cuando no usamos anillas:

$$d'=\frac{F\cdot d}{d-F}=\frac{50\cdot 300}{300-50}=60\text{mm}$$

Luego el centro del objetivo está a 60mm. Al añadir la anilla alejamos el objetivo 12mm, por tanto la nueva distancia de enfoque será:

$$d_2=\frac{F\cdot d'_2}{d'_2-F}=\frac{50\cdot(60+12)}{(60+12)-50}=163{,}64\,mm$$

Es decir, al añadir un tiraje de 12mm hemos pasado de enfocar de 30cm a 16,3cm.

#1.8 Factor de ampliación con tiraje

El factor ampliación es la longitud de la imagen del objeto dividida entre la longitud del objeto. Longitud, no superficie. También resulta ser la distancia desde el centro óptico a la película dividida entre la distancia del objeto a la lente.

En condiciones normales, sin tiraje, la ampliación es:

$$m_0=\frac{h'}{h}=\frac{d'}{d}$$

Si añadimos un fuelle o una anilla de extensión con un tiraje de T milímetros entonces la ampliación es la nueva distancia del objetivo a la película, d'2 dividida entre la nueva distancia de enfoque d2. Por tanto la amplificación nueva es:

$$m_2=\frac{d'_2}{d_2}$$

El numerador es la distancia del objetivo a la película con tiraje, que es la misma distancia d' del objetivo a la lente en el primer caso (sin tiraje) más el tiraje. La distancia d2 es la que va del objeto a la lente en el segundo caso, con tiraje. Para eliminarla nos vamos a la ecuación de gauss que seria:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{d_2}+\frac{1}{d'_2}$$

$$\frac{1}{d_2}=\frac{1}{F}-\frac{1}{d'_2}$$

Sustituyendo d2 en la ecuación de la amplificación:

$$m_2=d'_2[\frac{1}{F}-\frac{1}{d'_2}]$$

$$m_2=\frac{d'_2}{F}-1$$

Como decíamos, la distancia del objetivo a la película con tiraje es la misma distancia que había sin tiraje más el tiraje:

$$d'_2=d'+T$$

Así que:

$$m_2=\frac{d'+T}{F}-1$$

Si enfocamos a infinito el objetivo, la distancia d' es la longitud focal F del objetivo, por tanto:

$$m_2=\frac{F+T}{F}-1$$

$$m_2=\frac{T}{F}$$

Por tanto, cuando hagamos un tiraje, es decir, alejemos el objetivo del cuerpo de la cámara una distancia T, bien sea con una anilla de extensión o con un fuelle, la nueva amplificación que conseguimos podemos determinarla dividiendo el tiraje entre la longitud focal del objetivo.

#1.9 Cambio de la luminosidad de un objetivo al añadir un tiraje

Ya hemos dicho que la luminosidad de un objetivo depende de la distancia de enfoque y que tiene un valor límite, mínimo, que es el número f, que solo se consigue cuando enfocamos a infinito. Como al enfocar a corta distancia la luminosidad cambia más de lo tolerable (1/3 de paso) tenemos que corregir las medidas y ajustes para conseguir la exposición que queremos.

Vamos a ver que pasa al añadir un tiraje T a un objetivo.

En un principio, al enfocar a infinito el objetivo está a una distancia F (su longitud focal)de la película. Pero al añadir un tiraje T mediante una anilla o un fuelle de extensión la distancia F cambia a F+T. Por tanto la luminosidad antes de añadir el tiraje es:

$$f_0=\frac{F}{D}$$

Donde D es el diámetro del diafragma y F la longitud focal.

Pero al alejar el objetivo una distancia T debida a la anilla de extensión, entonces:

$$f_1=\frac{F+T}{D}$$

Vamos a dividir f1 entre f0:

$$\frac{f_1}{f_0}=\frac{F+T}{F}$$

Por tanto el diafragma con que trabajamos en realidad al hacer un tiraje es:

$$f_1=f_0(1+\frac{T}{F})$$

Y como hemos visto, la división del tiraje entre la focal es la magnificación. Por tanto:

$$f_1 = f_0 (1+m)$$

Donde f1 es el diafragma con que trabajamos en realidad, f0 es el diafragma que hemos ajustado en cámara.

Por ejemplo, un objetivo de 35 mm con un tiraje de 12mm y un diafragma ajustado de f:8 tiene un número f real de:

$$f_1 = 8(1+\frac{12}{35}) = 10{,}74$$

Que en la práctica es un f:11.

#1.10 Compensación de la pérdida de luminosidad alargando el tiempo de obturación

Al alejar el objetivo con una anilla de extensión o con un fuelle cambia la luminosidad del objetivo. Podemos compensar la pérdida de exposición alargando el tiempo de obturación. Vamos a suponer que el diafragma no cambia y compensar la diferencia con el tiempo de obturación.

Lo que buscamos es que el valor de exposición en ambos casos, sin tiraje y con tiraje, sea el mismo.

El valor de exposición vale, por definición:

$$ev = \ln \frac{f^2}{t}$$

Donde ev es el *valor de exposición*, ln es el logaritmo neperiano, f el diafragma y t el tiempo de obturación.

Antes de meter el tiraje el valor de exposición es:

$$ev = \ln \frac{f_0^2}{t_0}$$

y después del tiraje:

$$ev = \ln \frac{f_1^2}{t_1}$$

Como debemos conseguir la misma exposición ambos valores deben ser iguales, por tanto:

$$\ln \frac{f_0^2}{t_0} = \ln \frac{f_1^2}{t_1}$$

Por lo que podemos olvidarnos de los logaritmos y escribirlo asi:

$$\frac{f_0^2}{t_0} = \frac{f_1^2}{t_1}$$

Así que:

$$t_1 = t_0 \frac{f_1^2}{f_0^2}$$

Como ya hemos visto, la luminosidad del objetivo cambia al realizar el tiraje de manera que la nueva luminosidad vale:

$$f_1 = f_0 (1+\frac{T}{F})$$

Por tanto:

$$t_1 = t_0 \frac{f_0^2 (1+\frac{T}{F})^2}{f_0^2}$$

Lo que deja el tiempo de obturación a usar como:

$$t_1 = t_0 (1+\frac{T}{F})^2$$

Como el tiraje dividido entre la focal es la magnificación podemos volver a escribir la fórmula así:

$$t_1 = t_0 (1+m)^2$$

Como se ve, al añadir un tiraje podemos calcular el diafragma necesario por la profundidad de campo y cambiar el tiempo de obturación para compensar la perdida de exposición multiplicando el tiempo original por un factor que es uno más la magnificación que queremos elevada, esta suma, al cuadrado.

Como este factor de multiplicación es fijo y depende del tiraje, de la elongación del fuelle, lo podemos escribir en una tabla en los fuelles de manera que podamos leerlo directamente y usarlo sin tener que recurrir a ningún cálculo. Incluso algunos fotómetros tienen este factor uno más eme al cuadrado indicado para cada tiraje. Tan importante resulta este factor que recibe un nombre propio *factor de fuelle*.

Por tanto: al realizar un tiraje determinamos el tiempo de obturación multiplicando el medido para el diafragma ajustado por el factor de fuelle.

$$t_1 = t_0 (1+m)^2$$

#1.11 Profundidad de campo

La profundidad de campo es el espacio de la escena que queda enfocado por delante y por detrás del punto al que hemos enfocado.

La profundidad de campo se puede determinar la siguiente ecuación:

$$pdc = \frac{2 \cdot f \cdot c(1+m)}{m^2}$$

Donde pdc es la profundidad de campo. El diafragma utilizado es f, c es el diámetro del círculo de confusión y m el factor de ampliación.

El diámetro del círculo de confusión se toma como 0,03mm. (La décima parte de la distancia mínima que pueden estar separadas dos líneas para verlas a un metro de distancia) (Se admiten muchas otras definiciones).

#1.12 La distancia hiperfocal

La profundidad de campo se extiende desde un poco antes del punto de enfoque a un poco después. Conforme más lejos enfocamos aun más lejos queda el punto más lejano enfocado. A una distancia determinada podemos decir que el enfoque va desde "un poco antes" hasta infinito.

Esta distancia a la que si enfocamos, la profundidad de campo se extiende hasta infinito se llama *distancia hiperfocal* y vale (no vamos a demostrarlo).

$$H = \frac{F^2}{cf}$$

Donde H es la distancia hiperfocal. F es la longitud focal del objetivo, c es el diámetro del círculo de confusión y f es el diafragma empleado.

Más tarde veremos que la profundidad de campo, cuando ajustamos el enfoque la distancia hiperfocal, se extiende desde la mitad de ésta hasta el infinito.

Por ejemplo, la distancia hiperfocal para un objetivo de 50mm con un círculo de confusión de 0,03mm y un diafragma f:8 es:

$$H=\frac{0{,}05^2}{0{,}00003\cdot 8}=10{,}4\,m$$

Por tanto la profundidad de campo va de 5,2 metros a infinito.

En resumen: La distancia hiperfocal es aquella más corta a la que hay que enfocar el objetivo para que el espacio enfocado se extienda hasta infinito. Sin que sea evidente la distancia desde la cámara hasta el punto enfocado más cercano es la mitad de la hiperfocal. Así si la distancia hiperfocal es de, por ejemplo, tres metros significa que el espacio enfocado se extiende desde metro y medio hasta el horizonte. Si la hiperfocal es de cinco metros, el espacio enfocado va desde los dos y medio hasta infinito.

Cuanto más largo sea el objetivo, más lejos estará la hiperfocal. Cuanto más cerrado sea el diafragma, más cercana. Si por ejemplo un objetivo a tiene una hiperfocal de cuatro metros con un diafragma f:8 al cerrar a f:11 la hiperfocal se hará la mitad -dos metros- y si abrimos a 5,6 será el doble -ocho metros-.

#1.13 Distancias cercana y lejana

Cuando enfocamos a una distancia el punto más cercano y más lejano que quedan enfocados pueden determinarse con la distancia hiperfocal.

El punto más cercano enfocado es:

$$CERCA=\frac{H\cdot d}{H+(d-F)}$$

Mientras que el punto más lejano enfocado es:

$$LEJOS=\frac{H\cdot d}{H-(d-F)}$$

Como por regla general la distancia de enfoque es mucho más grande que la distancia focal normalmente podemos despreciar el objetivo y calcular suponiendo que F es cero, lo que deja las ecuaciones así:

$$CERCA=\frac{H\cdot d}{H+d}$$

$$LEJOS=\frac{H\cdot d}{H-d}$$

Estas fórmulas se han determinado realizando ciertas aproximaciones que, en resumen, se concretan en que la distancia de enfoque es bastante mayor que la focal. Como regla práctica empleamos estas ecuaciones cuando la distancia de enfoque es de más de diez veces la focal. Para un 50mm, (0,05 metros) la ecuación es válida para distancias mayores a medio metro (0,5 metros, 500mm).

2 Macrofotografía

La macro fotografía es la fotografía que se realiza a corta distancia.

#2.1 Definición

Macro fotografía es, estrictamente hablando, aquella en la que la imagen del objeto es mayor, en longitud, que la propia del objeto. A la hora de la verdad llamamos macro fotografía a aquella en la que la imagen es aproximadamente igual que el objeto en tamaño.

Microfotografía es la fotografía en la que el motivo son objetos de tamaño microscópico. Según la definición anterior toda micro fotografía es también macro aunque establecemos la diferencia en la necesidad, para la micro, de emplear un microscopio.

A parte de lo dicho, por macro en realidad entendemos la fotografía a distancias muy cortas.

#2.2 Problemas del macro

Los objetivos están fabricado de manera que enfoquen a distancias grandes. Típicamente a diez o más veces su longitud focal. Las aproximaciones matemáticas que con se que estudian las lentes solo tienen en cuenta los rayos de luz que entran paralelos al eje de la lente o con poco ángulo, sin embargo la luz que entra con ángulos grandes en el objetivo descuadran los cálculos. Las figuras muy cercanas a la cámara arrojan su luz con ángulos grandes, por lo que no encajan bien en los cálculos simplificados usuales. Como resultado, los objetivos no están preparados para enfocar a corta distancia, precisamente el reino de la fotografía macro.

Por tanto si queremos hacer una fotografía a corta distancia de calidad necesitamos objetivos fabricados ex-profeso para enfocar a corta distancia.

Para enfocar a corta distancia hay que alejar el objetivo de la película. Cuanto más lejos la lente de la película, más cerca enfocamos. Pero la luminosidad de un objetivo depende de la posición del objetivo. Cuanto más lejos está de la película, menos iluminancia produce en el interior de la cámara. El número f es, por definición, el diámetro de la mancha de luz en el centro óptico de la lente equivalente al objetivo dividida entre la longitud focal el objetivo, pero la iluminancia depende del cuadrado del número f. Por tanto, al enfocar a corta distancia el número f se hace más oscuro. Al enfocar a corta distancia perdemos luz.

La profundidad de campo es menor cuanto menor sea la distancia de enfoque. Por tanto en macro vamos a tener problemas, que pueden llegar a ser muy serios, de enfoque. Un cambio pequeño en la posición de la cámara, por ejemplo el debido al temblor de la mano, hace que se pierda el enfoque.

#2.3 Técnicas de aproximación

Para enfocar a corta distancia hay que alejar el objetivo de las lentes o cambiar su longitud focal.

Las soluciones que podemos encontrar en el mercado para alejar el objetivo de la película son:

1. Anillas de extensión.
2. Fuelles de extensión.

Las soluciones para modificar la longitud focal son:

1. Lentes de aproximación.
2. Inversión del objetivo.

#2.4 Objetivos macros

Un objetivo macro es un objetivo fabricado de manera que ofrezca su mejor rendimiento en distancias cortas, presenta menos aberraciones a distancias de enfoque cortas que otro no fabricado como macro. Esto significa que por alejar un objetivo "normal" no conseguimos que mejore su comportamiento a corta distancia, solo conseguimos que enfoque objetos cercanos.

#2.5 Anillas de extensión

Son unos anillos que se intercalan entre el objetivo y el cuerpo de la cámara alejándolos. Normalmente se encuentran en juegos de 3 anillos de diferente tamaño. Como los anillos pueden montarse unos con otros tenemos varias longitudes de extensión fijas.

Un anillo de extensión no hace que un objetivo que no sea macro se convierta en macro. Por tanto lo apropiado es emplear los anillos con objetivos macro. Es decir, con objetivos pensados para enfocar a corta distancia.

Las anillas son rígidas, por tanto son duras y tienen bastante resistencia mecánica. Como separan el objetivo del cuerpo desconectan ambos mecánica y eléctricamente. En cámaras manuales esto solo afecta a la transmisión del diafragma, pero en cámaras autofoco y automáticas también se ven afectados los sistemas automáticos. Las anillas de marcas baratas, como kenko, pueden dar problemas con cámaras que exigen la conexión eléctrica. Una buena anilla que mantenga las transmisiones mecánicas y eléctricas son más caras que las que no las mantienen.

Sobre la pérdida de luz de las anillas y la variación de la relación de ampliación hablamos más adelante en otro epígrafe.

#2.6 Fuelles

Los fuelles se intercalan también entre la cámara y el objetivo pero a diferencia de las anillas no producen alargamientos fijos. Los fuelles dan extensiones contínuas y graduables.

Los fuelles son bastante más caros que las anillas, más engorrosos y menos resistentes. Normalmente tienen una tabla de cálculo que indica la pérdida de luz para cada relación de ampliación.

#2.7 Las lentes de aproximación

Son lentes de potencia positiva (convergentes) que se colocan delante del objetivo y que modifican su longitud focal permitiéndonos acercarnos más a los objetos.

Una lente de aproximación es la solución más barata para conseguir el macro pero no convierte a un objetivo normal en uno de este tipo. Una lente de aproximación modifica el comportamiento del objetivo y por regla general empeora sus aberraciones. Su ventaja es que apenas modifica la luminosidad del objetivo.

Sobre cómo afecta a la relación de ampliación hablaremos más tarde.

#2.8 Objetivos invertidos

La inversión del objetivo es una solución que suele proporcionar buena calidad de imagen. Los objetivos forman la imagen a corta distancia por detrás de ellos, por tanto si les damos la vuelta su comportamiento, para enfocar a corta distancia, es bastante mejor que a distancias normales. Para invertirlos pueden adquirirse unas *anillas de inversión* que consiste en unos adaptadores de poco grosor que se roscan en la montura de los filtros del objetivo y se montan en la bayoneta del cuerpo. Naturalmente esta forma de trabajar desconecta el objetivo y la cámara.

La pérdida de luz es mínima y las aberraciones no empeoran.

#2.9 La relación de ampliación

La principal característica de la fotografía macro es la *relación de ampliación* que es la proporción que guarda una dimensión lineal de la imagen de un objeto con la misma dimensión en el objeto. Es decir, el número de veces que la imagen es mayor que el objeto. Por ejemplo, si el objeto mide 10mm y la imagen correspondiente mide 5 milímetros la relación de ampliación es 5:10. Es decir, 1:2.

Siempre es: tamaño de la imagen dividido entre el tamaño del objeto.

$$m=\frac{imagen}{figura}$$

#2.10 Relación de ampliación y distancia de enfoque

La relación de ampliación es el tamaño de la imagen entre el de la figura, pero cuando enfocamos a infinito la relación de ampliación es

$$m=\frac{F}{d}$$

Es decir, la longitud focal el objetivo divida entre la distancia de la figura al centro óptico de la lente. Como la distancia más corta a la que se puede enfocar es la longitud focal, en estas condiciones si enfocamos a infinito la relación de ampliación es 1:1. Es decir, que el tamaño de la imagen es igual que el de la figura.

Pueden conseguirse ampliaciones mayores que 1:1 (La imagen mayor que la figura) siempre que alejemos el objetivo de la posición de enfoque a infinito.

#2.11 Efectos del tiraje

Se llama tiraje a la medida en que el objetivo se aleja de la cámara cuando utilizamos una anilla de extensión o un fuelle.

El tiraje tiene dos efectos:

1. Pérdida de diafragma. Cuando alejamos el objetivo perdemos luz, el diafragma que marca el objetivo no es el real sino que se hace más grande.
2. Reducción de la distancia mínima de enfoque. Al alejar el objetivo del podemos enfocar a menos distancia.

#2.12 Pérdida de luminosidad

La luminosidad de un objetivo depende de la distancia del centro óptico a la película. Cuanto más lejos esté el objetivo, menos luz proporciona a la imagen. Si el objetivo se aleja el doble en una posición que en otra la iluminancia que se produce en el interior de la cámara es cuatro veces menor, dos pasos. Puede decirse que la película ve la luz como si fuera un foco puntual colocado en la posición del nodo trasero del objetivo, es decir, que sigue una ley semejante a la inversa del cuadrado de la distancia: al alejar el centro óptico trasero la luz se reduce en un factor que depende del cuadrado de la distancia, no lineal. Esto significa que al utilizar anillas o fuelles tenemos una fuerte pérdida de iluminación en cámara, por lo que el número f indicado en el objetivo no es real sino que estamos empleando un valor mucho mayor.

El número f realmente empleado depende por tanto de la distancia del centro óptico a la película. Normalmente no conocemos la posición exacta del centro óptico pero si conocemos lo que se ha movido porque las anillas de extensión tienen anchos fijos y en los fuelles siempre tenemos una guía que nos dice cuanto fuelle metemos. Aunque no es fácil conocer la nueva posición del centro óptico podemos conocer la pérdida de luz por un procedimiento indirecto que consiste en emplear el factor de ampliación, ya que la ampliación relaciones dos pares de cosas: el tamaño del objeto y el de su imagen por un lado y la distancia del centro óptico a la película y la del centro óptico al objeto. Por tanto la ampliación es un camino indirecto para solucionar el problema de conocer cuanta luz perdemos al hacer un tiraje,

#2.13 Pérdida de luz mediante el tiraje

La luminosidad real del objetivo (el diafragma real) al realizar el tiraje es:

$$f_{real} = \frac{tiraje + focal}{focal} \cdot f_{ajustado}$$

Donde f real es el diafragma que realmente estamos utilizando. Tiraje es el tamaño de la anilla de extensión, en milímetros, Focal es la distancia focal del objetivo.

Por ejemplo, un objetivo de 50mm al que hemos ajustado un diafragma f:8 y una anilla de extensión de 12mm tiene un diafragma real de:

$$f_{real} = \frac{50+12}{50} \cdot 8 = 10$$

El diafragma ajustado de f:8 en realidad ha aumentado hasta f:10.

#2.14 Corrección de exposición para la pérdida por tiraje

La medición dada por el fotómetro de mano debe por tanto compensarse para recuperar la pérdida introducida por la extensión del objetivo. Hay por tanto dos acciones correctoras: abrir más el diafragma o aumentar el tiempo de exposición en la misma cantidad que hemos perdido.

#2.15 Corrección de la pérdida mediante el diafragma

Dado que podemos calcular la luminosidad real del objetivo al realizar el tiraje tan solo hemos de abrir el diafragma tantos puntos como hayamos perdido. En el ejemplo anterior en el que un diafragma ajustado en cámara de f:8 se reducía a un f:10, es decir, dos tercios de paso, solo hemos de abrirlo esos mismos dos tercios de paso. Esto es, ajustar un f: 6.3.

Pero hay dos problemas con esta técnica:

1. Puede que el objetivo no disponga de ese diafragma. Esto sucede especialmente en cámaras de gran formato donde las aberturas máximas vienen a ser de f:5,6 (objetivos caros) o f:8 (objetivos baratos).
2. Cuando el diafragma está condicionado por la profundidad de campo. Un efecto secundario del diafragma es que establece la profundidad de campo. El diafragma final que usamos debe ser el calculado para la profundidad de campo requerida, no el determinado para la iluminación. En el ejemplo, si queremos la profundidad de campo de un f:8 hemos de ajustar un f:6,3 no un f:8.

#2.16 Corrección de la pérdida mediante el tiempo de exposición

Si queremos reajustar la exposición manteniendo la luminosidad del objetivo y cambiando el tiempo de exposición nos fijamos en el *factor de fuelle* que es el factor por el que tenemos que multiplicar el tiempo de exposición inicial para conocer el que vamos a ajustar. Recordemos que este tiempo de obturación inicial es el que hemos determinado que debemos emplear al realizar la medición con el fotómetro.

En general, dado un factor de ampliación a el factor de fuelle es:

$$ff = (1+m)^2$$

Una guía para la modificación es la siguiente:

Relación de	25% (1:4)	50% (1:2)	100% (1:1)	150% (1,5:1)	200% (2:1)	300% (3:1)

ampliación						
Factor de fuelle	1,6	2,2	4	6,5	9	16

Por ejemplo, queremos realizar una fotografía macro con una relación de ampliación 1:4. El tiempo de obturación medido es de 1/60 de segundo. Para compensar la pérdida debemos emplear un tiempo de obturación de 1/37,5, que es aproximadamente 1/40.

(En una calculadora deberíamos hacer lo siguiente: primero dividir el multiplicador de la tabla por el denominador del tiempo de obturación, que es como normalmente hablamos, en este caso 60: $\frac{1}{60}\cdot 1{,}6=0{,}027$. Ahora dividimos uno entre el número indicado, en una calculadora deberíamos buscar la tecla que dice 1/x. En este caso nos da: 37.5 Por tanto el tiempo de obturación sería de 1/37.5 que es aproximadamente 1/40, el ajuste más cercano de la cámara).

#2.17 Cambio de la distancia de enfoque

Al añadir una anilla o un fuelle modificamos la distancia de enfoque a un nuevo valor que se calcula por el procedimiento explicado en el capítulo anterior.

El cálculo en una sola ecuación es:

1º Calcular la distancia del objetivo a la película:

$$d'=\frac{focal\cdot distancia\ de\ enfoque}{focal-distancia\ enfocada}$$

2º Sumar a esta distancia del objetivo a la película el tiraje:

$$D=d'+tiraje$$

3º Calcular la nueva distancia de enfoque mediante:

$$Distancia\ de\ enfoque\ con\ tiraje=\frac{focal\cdot D}{focal-D}$$

Aunque decimos que hemos cambiado la distancia mínima de enfoque hay que entender esta frase. La distancia mínima, realmente, no podemos modificarla porque está determinada por la longitud focal del objetivo y ésta no cambia por alejarlo de la cámara. Por tanto por "cambio de la distancia mínima de enfoque" debemos entender que es la distancia a la que podemos aproximarnos por haber extendido el objetivo.

#2.18 Profundidad de campo

Hagamos un experimento mental. Dibuja un punto pequeño en una hoja de papel y piensa en lo que sucede cuando lo enfocas con tu cámara. Del punto salen rayos de luz en todas las direcciones, algunos de ellos llegan hasta nuestro objetivo, con lo que se crea un cono de luz cuyo vértice es el punto que has dibujado y tiene por base la lente frontal del objetivo. Esta luz que llegado hasta la óptica penetra en la cámara proyectándose a través del punto nodal posterior que puedes es el equivalente del estenopo, el agujero de la caja de zapatos con que hacemos la cámara estenopeica. En definitiva, tienes que la luz que sale del punto dibujado queda concentrada por el objetivo que la proyecta sobre la película. Los rayos de luz forman entonces un cono desde el objetivo hasta la película pero invirtiendo las relaciones de la figura. Ahora la base del cono interior a la cámara está en el objetivo y el vértice queda en la superficie de la película.

Imaginalo: la luz saliendo del punto que has dibujado en el papel y llegando hasta el objetivo y desde ahí volviéndose a concentrar sobre la película ¿Que pasa más allá de la película? ¿Que pasaría si no hubiera película en el fondo de la cámara? La luz en el interior de la cámara se concentra desde el objetivo más y más hasta formarse un punto y sigue más allá volviéndose a abrir, como un diábolo. ¿Que pasa si no colocar la película exáctamente en el lugar donde la luz se concentra? Sucedería que en vez de cortar un punto cortaría un círculo. No tendrías un punto en la película sino una mancha más o menos grande.

$$pdc = \frac{2 \cdot c \cdot f(m+1)}{m^2}$$

#2.19 Profundidad de foco

Así como en la escena hay un espacio en profundidad que queda (más o menos) enfocado alrededor de la distancia a la que hemos enfocado la cámara también hay una zona, dentro de la cámara, dentro de la que la imagen queda (más o menos) nítida. Este espacio es del que disponemos para colocar el material sensible.

La profundidad de foco es mayor cuanto menor es la distancia focal y cuanto mayor es el diafragma. Con aperturas bajas (números f pequeños) la profundidad de foco puede ser tan pequeña que incluso sea menor que el espesor de la película. En estos casos las tolerancias mecánicas de fabricación del sistema de posición del material sensible juega en nuestra contra, dándose el caso de que los sensores de estado sólido pueden quedar desenfocados con diafragmas amplios y enfocados cuando diafragmamos.

#2.20 Distancia hiperfocal en cámaras con anillo de diafragma

Las cámaras que tienen anillo de diafragma y marcas de enfoque permiten ajustar la distancia hiperfocal y la profundidad de campo con unas sencillas operaciones.

Las anillas de estos objetivos son tres, dos móviles y una fija. Las móviles son una para enfocar, marcada en metros (y pies), y otra para el diafragma. La anilla fija tiene escritos los números f de forma simétrica a partir del centro y alrededor de la marca de enfoque.

Para conocer la distancia hiperfocal para un diafragma ajustamos éste y colocamos el anillo de enfoque de manera que el infinito caiga sobre la marca de la anilla fija del diafragma que queremos emplear. La distancia así ajustada es la hiperfocal para ese diafafragma.

#2.21 Orden de actuación

A la hora de plantear un trabajo en macrofotografía el orden de trabajo sería:

1. Primero: Conocemos el tamaño del objeto a fotografiar y el tamaño al que queremos su imagen en la cámara. Por tanto calculamos el factor de ampliación que será:

$$ampliación = \frac{tamaño\ de\ la\ imagen}{tamaño\ del\ objeto}$$

2. Segundo: Conocemos o tenemos una idea de qué objetivo macro vamos a utilizar. Tenemos que calcular el tiraje que se determina a partir de la ampliación.

$$Tiraje = ampliación \cdot focal\ el\ objetivo$$

Este tiraje puede conseguirse con anillas (usaríamos la combinación más cercana posible) o un fuelle (deseable).

3. Tercero: Determina la profundidad de campo que necesitas y con ella y la focal del objetivo calcula el diafragma que te hace falta:

$$diafragma\ a\ ajustar = \frac{profundidad\ de\ campo\ x\ ampliación^2}{2\ x\ circulo\ de\ confusión\ x\ (ampliación+1)}$$

4. Al añadir el tiraje la luminosidad se reduce. El diafragma calculado sirve para determinar la profundidad de campo, pero para calcular la iluminación necesaria tenemos que corregir este valor. El diafragma para determinar la iluminación es:

$$f_{real} = f_{ajustado}\left(1 + \frac{tiraje}{focal}\right)$$

5. Si empleamos luz contínua podemos controlar la exposición con el tiempo de obturación. El tiempo de obturación lo calculamos multiplicando el tiempo medido con el fotómetro para el diafragma ajustado

en cámara (el que nos da la profundidad de campo deseada) por el factor de fuelle. Este factor de fuelle vale:

$$factor\ de\ fuelle = \left(\frac{tiraje + focal}{focal}\right)^2$$

Técnicas de aproximación

Macrofotografía

