Curso de fotografía

Fotomacrografía

Para el profesor

Guía para el ejercicio

El ejercicio es básicamente muy sencillo. Se trata de hacer una foto de una flor. Elijo una flor porque es lo más sencillo de obtener donde yo doy clases. Naturalmente cambialo por lo que tengas a mano. Es muy importante que sea un objeto con volumen, no plano, para obligar a calcular la profundidad de campo.

Haz que calculen en el orden expuesto en el punto *Orden de actuación*: Primero que determinen el factor de ampliación y de ahí, el tiraje, que es el factor de ampliación mulltiplicado por la longitud focal del único objetivo macro que tendreis. Si hay más de uno bien por vosotros. Si no teneis, usad el que podais, preferiblemente alrededor de un normal. Recuerda que un objetivo de kit que dice "macro" normalmente no lo es. Que un objetivo no es macro porque tenga marcas de reproducción ni porque se avance para enfocar a corta distancia. Pero de todas maneras, si usais zooms, que hagan los cálculos con la longitud focal que vayas a usar. Para salir de dudas y quitarte de problemas usa objetivos fijos.
Cuando tengan el tiraje mira a ver si hay alguna combinación de anillas de extensión que se aproxima a ese valor. Intenta que la flor, o lo que sea que vayas a fotografiar, aparezca ocupando aproximadamente el 80% del lado largo del fotograma. Asegurate de haber anotado antes el tamaño del sensor en ancho y alto. En milímetros por favor.
Si no puedes hacer el tiraje exacto calculado busca el inmediatamente inferior. En este caso, hazles que calculen la magnificación realmente usada (dividiendo el tiraje entre la longitud focal del objetivo). Si tienes un fuelle, no debería haber problema.
Que midan la flor para saber la profundidad de campo que les hace falta.
Ahora haz que calculen el diafragma de trabajo. Tienes la ecuación en la lista de operaciones anterior. Como círculo de confusión usa 0,03. Vigila que usen todas las medidas en milímetros.
Recuerda que este diafragma es el que tienen que ajustar en la cámara. Ahora que calculen la luminosidad del objetivo, que es el diafragma que realmente emplea. La profundidad de campo lo determina el primer diafragma, el segundo la exposición.
Pon dos flashes más o menos a 45º a ambos lados de la cámara para dar una iluminación plana. Ajustalos en automático o TTL con el diafragma segundo, no con el de la profundidad de campo. No un paso menos, sino el mismo que has calculado. Si alguien te dice que la luz de los dos flashes se suma y por tanto el diafragma sube un paso diles que no, que eso sería si estuvieran en manual, pero que al estar en automático cada flash va a cortar el destello para dejar la luz que tu quieres para el diafragma ajustado en el mecanismo.
Con luz día, usa el sol directo o un difusor plano. Coloca un fondo plano blanco o negro, una simple cartulina, para aislar la flor. Como ampliación puedes decirles que usen como fondo el color complementario del dominante de la flor.
Mide la luz con un fotómetro de iluminación, es decir, lo que en los libros antiguos llamaban

“de incidencia”. Con esto determina el tiempo de obturación para el diafragma empleado. Ahora pídeles que corrijan el tiempo de obturación con el factor de fuelle que, recuerda, lo calculan sumando uno al factor de ampliación tras lo cual elevas el resultado al cuadrado.

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 triángulos: el que forma el objeto A y su imagen, A' (triángulos 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 longitud 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.

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'.

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*.

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:

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

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.
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:

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

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:

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

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

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

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

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

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

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)

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.

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.

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:

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

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

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.

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:

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

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.

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.

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

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).

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-.