

# Fundamentos de fotografía digital

Rubén Osuna ©

En este trabajo tratamos de ofrecer *una guía para la lectura de fuentes externas*, o una síntesis integrada de los fundamentos de la imagen digital, es decir, una pre-digestión de un material variado y a veces técnicamente difícil. Hasta donde sabemos, no hay un texto similar en español, por lo que esperamos que sea útil para todos los que decidan que merece la pena dedicarle un poco de tiempo, y de paciencia, al tema. El documento está pensado para consultas parciales y puntuales, y no tanto para una lectura lineal, a no ser que se tenga ya una cierta familiaridad con los temas tratados, en cuyo caso puede servir también de compilación y síntesis organizada y relativamente completa.

La estructura del documento es la siguiente:

0. Introducción.

1. Capacidad resolutive del objetivo y capacidad resolutive del sensor. Resolución de un sistema.

1.1. El objetivo.

1.2. El sensor.

1.3. Resolución del sistema.

2. Los problemas de *aliasing*.

3. La resolución real o efectiva de una cámara digital. Algunos ejemplos.

4. Para conseguir más detalle, ¿más 'píxeles' o más densidad de 'píxeles'?

5. Resolución e impresión.

6. Determinantes de la evolución de los sensores. Una reconsideración de la importancia de la densidad de 'píxeles' y el tamaño del sensor.

7. La razón señal-ruido, el espaciado entre fotocélulas y su tamaño real.

8. Gama tonal y amplitud de tonal.

9. Profundidad de campo y perspectiva.

10. Consideraciones adicionales sobre las diferencias entre formatos.

11. Conclusiones.

12. Referencias.

## 0. Introducción.

La calidad de una imagen digital depende de muchos factores, algunos de los cuales son puramente subjetivos. Pero hay dos de ellos muy importantes, y que se pueden medir. Son la cantidad de detalle y el nivel de contraste de ese detalle, que determina la *definición* con que lo percibimos. Ambos factores están estrechamente relacionados y puede decirse que son las dos caras de una misma moneda. Una imagen con más detalles y más contraste será preferida por cualquier observador a la misma imagen pero reproducida con menos detalles y con menor contraste. Analizaremos también otras variables como la gama tonal, la amplitud de la escala tonal, la acutancia y el ruido digital.

Pero, ¿qué factores determinan a su vez la cantidad de detalle captado o reproducido y su nivel de contraste en una imagen digital? En la *primera* sección analizaremos de qué depende la capacidad máxima o teórica de resolver detalle de un objetivo y un sensor, y cómo se determina la capacidad resolutoria de un sistema compuesto por al menos esos dos componentes. Además, el detalle realmente captado o reproducido puede tener distintas "calidades", en función del nivel de contraste de ese detalle. Hablaremos también sobre los determinantes de esos niveles de contraste. Sin embargo, cuando medimos el detalle realmente captado o reproducido por una cámara digital descubrimos que es inferior al que teóricamente podrían proporcionar el objetivo y el sensor separadamente ¿Por qué? Dedicaremos la *segunda* sección a responder a esa pregunta. En la *tercera* sección presentaremos algunos ejemplos de resoluciones efectivas, medidas, de cámaras digitales.

En la *cuarta* sección empezaremos a abordar temas más concretos, como el impacto relativo de la densidad de 'píxeles' (resolución en sentido estricto) y el número de éstos en la calidad de la imagen digital. Una precisión terminológica es necesaria antes de seguir: lo correcto es hablar de *fotocélulas*, compuestas por una celdilla que contiene componentes electrónicos, entre otros un fotodiodo. Puede haber, y de hecho hay, sensores que emplean más de una fotocélula para construir un píxel, que es el punto que finalmente vemos en la pantalla de nuestro ordenador o en el papel impreso (el píxel es un vector que comprende datos de coordenadas, nivel de luminosidad y color, en la pantalla o en el papel). Sin embargo, cuando no haya ambigüedad, usaremos a menudo el término más común de 'píxel' para referirnos al (los) fotocélula(s) empleados en la construcción de un píxel, si bien entrecomillado, para atenuar así el uso un tanto impropio que estamos dando al término. Está claro que un píxel no tiene dimensiones físicas, pero un 'píxel' sí. En cualquier caso, en la inmensa mayoría de los sensores un píxel se corresponde a un 'píxel', y resulta intuitivo referirse a uno y otro concepto con términos parecidos. La *quinta* sección trata el tema de la impresión y su relación con el tamaño de la fotografía y el detalle real captado. La *sexta* sección sintetiza todo lo anterior e investiga qué propiedades debería tener el sensor ideal. La *séptima* sección trata la relación entre la densidad de 'píxeles', el tamaño de las celdillas y la llamada relación señal-ruido, que es otro de los determinantes fundamentales de la calidad de la imagen digital. La sección *octava* profundiza en lo anterior y completa el análisis del tema de la calidad de imagen, incorporando otras variables relevantes además de la resolución y el contraste, como son la *gama tonal* (o *resolución tonal*) y el *intervalo tonal* o *amplitud de la escala tonal* (o *amplitud tonal*, a secas).

Para acabar, en la sección *novena* profundizaremos en el análisis de las diferencias entre formatos, analizando la relación entre profundidad de campo y perspectiva, mientras que en la *décima* sección cerramos el análisis de las diferencias entre formatos y de la imagen fotográfica digital en general.

La *undécima* sección está dedicada a las conclusiones, con algunas predicciones sobre el desarrollo futuro de los sensores. En la *duodécima* y última sección recogemos referencias

que recomendamos consultar para ampliar aún más los conocimientos sobre el tema, muchas de ellas de fácil acceso en Internet. A lo largo del texto habrá también referencias adicionales concretas que vendrán señaladas a veces con una flecha (->), y que permiten consultar las fuentes aludidas, ejemplos, explicaciones terminológicas o análisis de temas que no se tratan aquí en detalle.

## **1. Capacidad resolutive del objetivo y capacidad resolutive del sensor. Resolución de un sistema.**

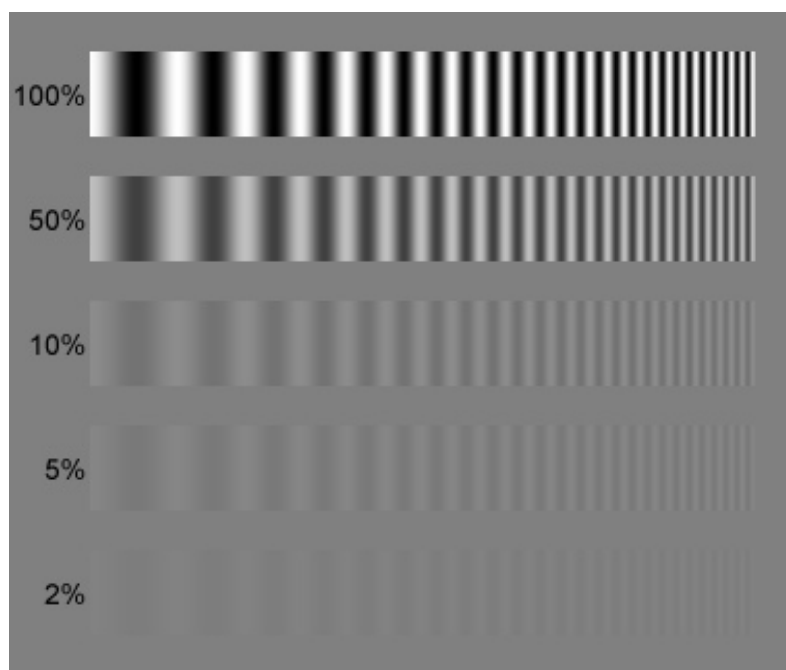
La señal (una imagen en nuestro caso) puede representarse matemáticamente sin pérdidas mediante una *transformación de Fourier* (->) en términos de unas pocas variables (frecuencia, modulación o contraste y fase). Esto permite la captura y el tratamiento digital de las imágenes. Pero antes de disponer de esa información “codificada” la imagen original “pasa por las manos” de distintos componentes del sistema fotográfico (objetivo, película o sensor), y cada uno de esos componentes afecta de alguna manera la información original, produciéndose pérdidas en la misma.

Las llamadas *funciones de transferencia de contraste, de rendición tonal o de frecuencia de respuesta espacial* ([MFT](#), *modulation transfer function*) nos dicen qué alteraciones sufren las variables frecuencia y modulación por el paso de la luz por cada componente del sistema fotográfico. Todos estos componentes tienen su propia función de *transferencia* de contraste.

Pero ¿qué es el contraste exactamente? El contraste es la diferencia de tonalidad con la que se registra, percibe o reproduce un par de líneas, negra y blanca. Resulta quizás más intuitivo referirse al contraste como una medida de la *preservación* de detalles cuando éstos se registran, transmiten o reproducen. El contraste es máximo, del 100%, cuando se consigue distinguir ambas líneas perfectamente, como una línea puramente negra y una línea puramente blanca. Pero cuando el contraste es menor veremos dos líneas grises, pero de intensidades diferentes.

Resolución y contraste son las dos caras de la misma moneda. Cuando el contraste cae por debajo de cierto nivel dejamos de percibir detalle (se necesita al menos un 5% de contraste para percibir algún detalle, aunque un 15/20% debe considerarse un mínimo razonable en la práctica) (->). Por otra parte, el detalle se muestra de forma más clara y nítida cuanto más alto es el contraste.

En el siguiente gráfico ilustra lo que venimos explicando, esto es, que a menor contraste, menos clara es la separación de líneas.



Contraste y nitidez de imagen ([Norman Koren](#)©).

La 'acutancia', en cambio, es la rapidez con la que se pasa del negro puro al blanco puro, pudiendo ocurrir que entre ambas zonas haya una zona gris de transición (->). Cuanto mayor sea esa zona gris, menor será la acutancia. En el medio digital la acutancia es típicamente mayor que en el medio fotoquímico, y las imágenes dan una sensación de nitidez más marcada. La explicación está en la difusión de la luz al atravesar las distintas capas que forman la película fotosensible.

Filtros como el 'unsharp mask' de Photoshop incrementan la *acutancia* de una imagen, pero no la resolución. Lo que esos filtros hacen realmente es crear un duplicado difuminado de la imagen original, calcular un diferencial entre ambas y añadir ese diferencial a la imagen original. Es posible aumentar marginalmente la resolución de una imagen digital, pero ello requiere algoritmos muy complejos difíciles de encontrar en los programas convencionales de retoque fotográfico (el *Raw Developer* ->, sin embargo, incorpora el algoritmo iterativo de Richardson-Lucy, ->).

Las *funciones de transferencia de contraste* (MTF) muestran una relación inversa entre sus principales variables, es decir, el contraste se reduce conforme aumentamos la resolución. Esto quiere decir simplemente que el objetivo tiene dificultad en distinguir nítidamente los detalles cuanto más finos son éstos. También ocurre que conforme nos alejamos del centro de la imagen se produce una pérdida de contraste, que en algunos casos puede llegar a ser sustancial.

De hecho, las *MTF* se *representan* como curvas que muestran, para cada abertura y distancia focal de un objetivo, y en un punto concreto de la imagen, la relación *decreciente* entre contraste (en tantos por uno) y resolución espacial (en pares o ciclos por milímetro). Pero también pueden presentarse gráficamente como una curva que relaciona contraste (en tantos por uno) y distancia respecto del centro de la imagen (en milímetros), para resoluciones escogidas (en pares por milímetro, suelen ser 5 lp/mm, 10 lp/mm, 20 lp/mm, 30 lp/mm y 40 lp/mm, o cualquier selección de esos números, pues son los determinantes de la

calidad percibida en impresiones de tamaño moderado, tradicionalmente cercano a un A4), a una apertura y distancia focal determinadas, en la dirección sagital (radial) y tangencial (hay por tanto dos MTF para cada punto de la imagen). Salvo que se diga otra cosa, nos vamos a referir siempre al área central de la imagen, empleando funciones de transferencia de contraste (MTF) que relacionan resolución, contraste y apertura para cada objetivo, y no las funciones que incorporan la distancia al centro para resoluciones escogidas.

Cuando *no* se emplea película y se analiza directamente la imagen proyectada por el objetivo, hablamos de capacidad resolutive del objetivo (*aerial image resolution*, [->](#)), la capacidad resolutive de un objetivo, que se puede describir mediante una MFT. El motivo suele ser una carta de resoluciones de alto contraste en la que hay racimos más o menos apretados de líneas negras separadas entre sí por líneas blancas (véase [esta](#) como ejemplo, o [esta](#) otra, también muy empleada, aunque [aquí](#) pueden encontrarse varias más). Esas líneas blancas y negras de la carta de resoluciones son los famosos "pares". Cuando se emplea una carta con ondas sinusoidales se puede hablar de "ciclos" por milímetro, en vez de pares. Un ciclo parte de un valor 0, pasa a un valor 1, baja de nuevo a 0, después a -1 y nuevamente a 0. El 1 puede representar el color negro y el -1 el color blanco, y por tanto un ciclo completo equivale a un par.

La *resolución del sistema* se obtiene aplicando la fórmula  $R = u/(Fd)$ , donde  $R$  es la resolución en pares de líneas por milímetro,  $u$  es la distancia del objetivo a la carta,  $F$  es la distancia focal del objetivo y  $d$  es la resolución en pares por milímetros del patrón de líneas más fino resuelto.

No obstante, si fotografiamos la carta y analizamos el negativo, las resoluciones obtenidas serán resultado no sólo de la capacidad resolutive del objetivo, sino también de las propiedades de la película o sensor empleado, que tienen su propia función de transferencia de contraste (MTF). Ambos elementos, objetivo y medio de captura, forman el sistema fotográfico más básico.

La capacidad resolutive del sistema vendrá dada por *el producto de las funciones de transferencia óptica (OTF) de cada uno de sus componentes* o, alternativamente, las funciones de transferencia de contraste (MTF) (las MTF son el valor absoluto de las OTF). Las MTF del objetivo empleado en la ampliación (fotografía química) y del papel de impresión vienen a unirse a la cadena multiplicativa, pero puede haber más elementos, cada uno con su propia MTF. Por tanto, tendremos que la función que determina la resolución y el contraste final de una imagen fotográfica puede obtenerse mediante un producto de funciones:

$$MTF_0 = MTF_1 \times MTF_2 (\times MTF_3) \times MTF_4 \dots$$

donde 0 es la fotografía final impresa, 1 es el objetivo, 2 el sensor o película, 3 el objetivo de la ampliadora (si procede), 4 el papel, etc.

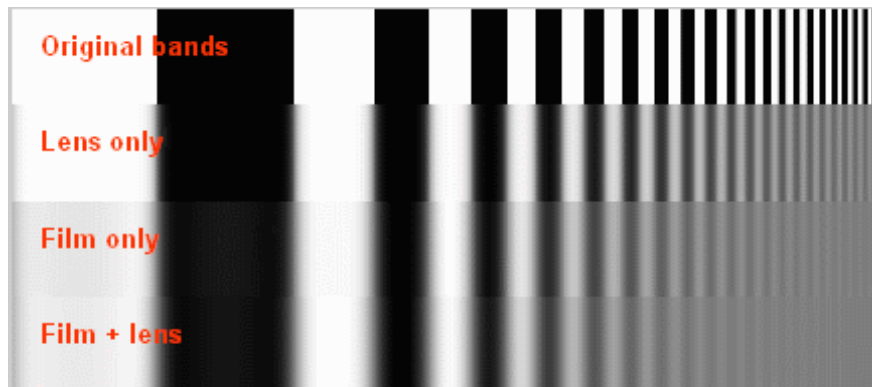
Bajo ciertas condiciones, la capacidad resolutive máxima de un sistema puede *aproximarse empíricamente* mediante la fórmula

$$R = 1/(1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3 + 1/r_4\dots)$$

donde las  $r_1, r_2, r_3, r_4\dots$  son las capacidades resolutive *máximas* –que implican un determinado nivel mínimo de contraste– de cada componente del sistema (objetivo, sensor o película, etc.) y  $R$  es la capacidad resolutive máxima final del conjunto, para un nivel de contraste mínimo suficiente. Como veremos, la resolución máxima de un objetivo no es una

variable que aproxime bien la función de transferencia de contraste del mismo, que varía además con la apertura (entre otros factores). Esto explica que la aproximación *empírica* sólo sea aceptablemente válida bajo determinados supuestos (->). La fórmula cuadrática, que puede verse en muchas referencias, no es una aproximación tan buena para el medio digital (ofrece números un poco mayores).

En resumen, la resolución y el contraste final de la imagen resultante dependerá de las MTF de cada eslabón del proceso. El siguiente gráfico es una ilustración de esta idea:



Contraste y resolución de los diferentes eslabones de la cadena de imagen ([Norman Koren](#)©).

Es interesante consultar para estos temas los artículos "Resolution", de Makoto Honda; "Resolution and MTF curves in film and lenses" de Norman Koren; y los capítulos 3 y 5 del "Leica Lens Compendium", de Erwin Puts, referencias todas ellas recopiladas en la última sección.

A continuación vamos a estudiar con más detalle las particularidades de cada uno de los elementos que intervienen de forma decisiva en el resultado final, empezando por el objetivo para continuar después con el sensor.

### 1.1. El objetivo.

Los objetivos transmiten a la película o sensor puntos de luz, que por efecto de la *difracción* (->) aparecerán como un punto circular rodeado de una serie de anillos alternativamente brillantes y oscuros. Los puntos centrales son los llamados *discos de Airy* (por el astrónomo inglés *George Biddell Airy*, 1801-1892, ->), de luminosidad decreciente, mientras que el conjunto de anillos concéntricos se conoce como *patrón de Airy*. La difracción se debe a causas físicas que no tienen remedio. Lo ideal sería que tanto el círculo central como el halo fueran lo más perfectos y pequeños posibles. Idealmente deberían ser infinitamente pequeños y circulares, que es imposible. Cualquier desviación de este ideal, sin embargo, es una indicación de degradación de la imagen original, y la difracción no es la única.

Cuanto mayor es el efecto de la *difracción*, mayor será también el diámetro del disco de Airy. La difracción es similar al efecto del agua que sale a presión por una manguera, una especie de dispersión del flujo de agua cuando ésta se ve liberada de la presión del conducto (->). El efecto es, como se ha dicho, una ampliación del diámetro del punto de luz, y una cancelación y refuerzo de la señal en la superficie del círculo que provoca la aparición de esos aros concéntricos.

Por su parte, las *aberraciones* (->) (del latín *ab errare*, *ab*, fuera, *errare*, errar, es decir, apartarse del camino, desviarse o extraviarse) provocan alteraciones diversas en el círculo o el halo, entre ellas la *de esfericidad*, *de coma*, *de curvatura de campo*, *de astigmatismo* y *de distorsión* –aberraciones monocromáticas o geométricas–, más las *aberraciones cromáticas* (que son de dos tipos, *longitudinal* y *lateral*). A estas aberraciones se las conoce como aberraciones de tercer orden o de Seidel (por el matemático alemán *Ludwing von Seidel*, 1821–1896, ->), pero hay otras de órdenes superiores (las 9 aberraciones de quinto orden o de Schwarzschild, las 14 aberraciones de séptimo orden...). Las aberraciones más importantes para la fotografía son las de tercer y quinto orden, y éstas últimas van ganando peso conforme aumenta el ángulo de visión (o ángulo de toma) y la luminosidad del objetivo, degradando la imagen independientemente del grado de corrección de las aberraciones de Seidel. Esto obliga a llevar la corrección más allá y a tratar conjuntamente las de tercer y quinto orden. Dado que no hay grados de libertad suficientes (radios, grosores y espacios) para una corrección completa de todas las aberraciones, es usual dejar permitir una cantidad controlada de algunas para compensar la presencia inevitable de otras.

Así pues, la capacidad resolutive de un objetivo (*aerial image resolution*) depende de las *aberraciones* y la *difracción*. Cuando cerramos el diafragma las aberraciones se ven mitigadas y el único factor limitante es la difracción. Cuando abrimos el diafragma la difracción pierde importancia pero las aberraciones cobran fuerza.

Además de la resolución y el contraste hay otros aspectos de la calidad de un objetivo que una MTF no capta, como son la rendición del color, las distorsiones o la resistencia a los reflejos internos y luz parásita (*flare*). Es imposible corregir todas las aberraciones al máximo, por lo que la calidad de la imagen que proyecta un objetivo sobre la película o sensor tiene mucho que ver con la “receta” aplicada a las aberraciones residuales.

Por ejemplo, la calidad de la imagen fuera de foco, conocida por el término japonés *bokeh*, tiene su importancia a la hora de evaluar un objetivo, aunque casi siempre se presta atención sólo a su complementario, la imagen en el plano enfocado, el *pinto* (->, ->). Una buena porción de la fotografía puede quedar desenfocada, por encontrarse los objetos representados delante del plano enfocado (*mae-bokeh*) o detrás (*ushiro-bokeh*). Pues bien, la aberración de esfericidad residual es un ingrediente esencial del *bokeh*, junto con la aberración cromática longitudinal (formando lo que se conoce como *esferocromatismo*), pero también el diseño de las palas del diafragma, el propio viñeteo óptico o el resto de las aberraciones residuales (->). En general, cuanto más cercanas se mantengan las líneas sagitales y tangenciales de las curvas MTF mejor será la “calidad” del *bokeh*. Por tanto, los gráficos MTF aportan una información más rica que una mera medición de resolución y contraste pero, como se ve, son indicadores muy toscos de otras variables que resultan decisivas para la percepción de “calidad” en la imagen transmitida por un objetivo.

Es más, esas importantes variables no sólo no se pueden medir con un instrumento como la representación gráfica de funciones matemáticas, sino que tampoco pueden medirse cardinal u ordinalmente de forma objetiva de otra forma, lo que explica que el diseño de los objetivos tenga parte de ciencia y parte de arte. Por seguir con el ejemplo, el *bokeh* sólo puede ser descrito y valorado subjetivamente (véase este buen análisis comparativo de objetivos, ->). Para ello los japoneses utilizan una profusión de términos más o menos precisos. Por ejemplo, el *nin-sen-bokeh* es aquel en que se aprecia duplicación de las formas, que no se considera un buen *bokeh*. Las luces altas desenfocadas se describen con términos como *enkei* (circular), *han-enjoh* (semi-circular), *marumi-ga-arui* (redondeado), *hosonagai* (alargado y estrecho) o *kometto-joh* (forma de cometa). El conjunto del *bokeh* se describe con términos como *sofuto* (suave), *katai* (duro), *hanzatsu* (complejo), *kuzureru* (que

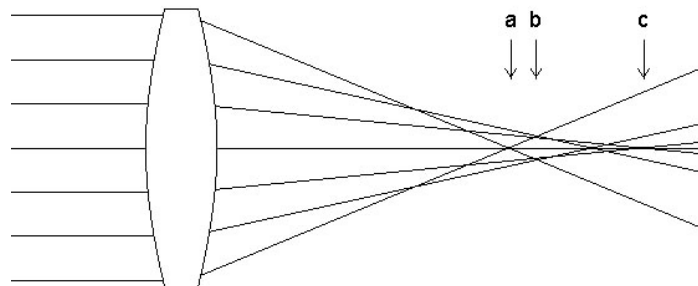
pierde los perfiles), *keikoh* (un *bokeh* muy ligero). Para la calificación se emplean términos como *kirei* (hermoso y limpio), *sunao* (amable), *yoi* (bueno), *konomashii* (bonito, agradable), *odayaka* (suave) o *shizen* (natural).

Nos centraremos a partir de ahora en el análisis de la resolución y el contraste. Las *aberraciones* dependen de la abertura y del ángulo visual, ángulo de toma, amplitud de campo o campo visual (*field of view*, o *angle of view*, o *angle of coverage*, *FoV*), entre otras cosas, pero no de forma lineal, como muestra la siguiente tabla:

Aberración	Abertura (D = diámetro)	Campo (ángulo visual, = V)	Distancia respecto al eje (= d)
Aberración esférica	$D^3$	No afecta	No afecta
Coma	$D^2$	V	d
Curvatura	D	$V^2$	$d^2$
Astigmatismo	D	$V^2$	$d^2$
Distorsión (%)	No afecta	$V^3$	$d^2$
Aberración cromática axial	D	No afecta	No afecta
Aberración cromática lateral	No afecta	$1/V$ (*)	d

La última columna demuestra que es más difícil corregir las aberraciones cuanto mayor sea el formato que se pretende cubrir (->).

Si el radio del diafragma se duplica, la aberración esférica se multiplica por 8 ( $=2^3$ ). La misma relación hay entre la distorsión y el ángulo visual (->). Cuanto más luminoso es un objetivo, y menor su distancia focal, más difícil es corregir las aberraciones, que se multiplican. Cuanto mayor es el volumen del cilindro de un objetivo, *caeteris paribus*, más fácil resulta compensar las aberraciones, pero los diseñadores ópticos trabajan además con fuertes restricciones de coste y posibilidades de manufactura en serie y escala de producción (->).

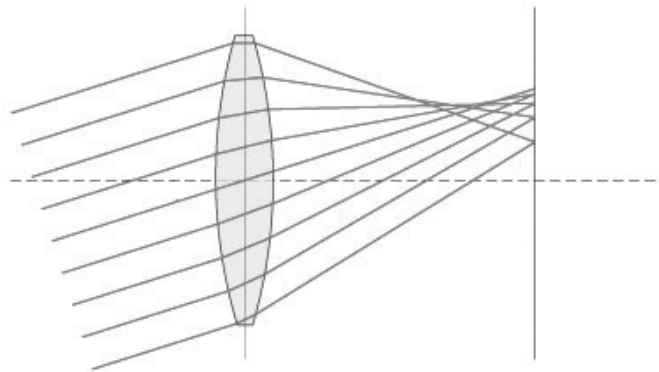


[Paul van Walree ©](#)

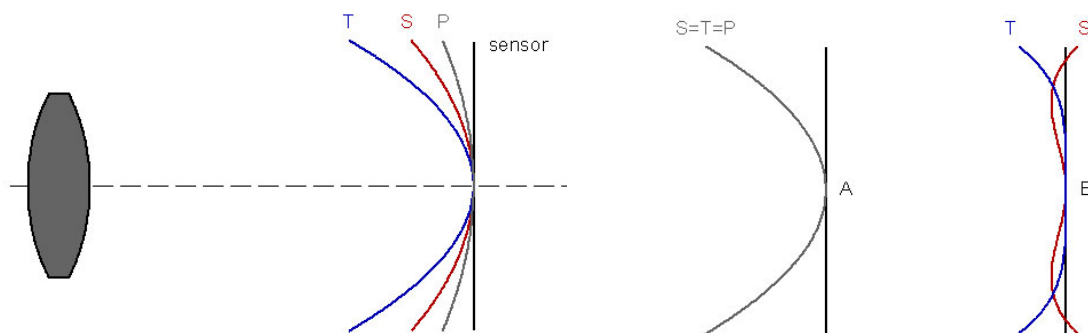
La *aberración de esfericidad* (->) provoca lo que se conoce como desviación de enfoque (*focus shift* en inglés, o *Blendendifferenz* en alemán), es decir, el plano focal se desplaza con la abertura. El diagrama muestra cómo los haces de luz que entran por los extremos de una lente con superficies esféricas (de tipo positivo en el ejemplo) convergen en un punto *a*, mientras que la luz que entra por el centro converge en un punto *c*. La imagen que proyecta una lente con aberración esférica es un punto luminoso rodeado de un halo. El plano de enfoque *óptimo* no está ni en *a* ni en *c*, sino en *b*, donde el diámetro del disco de Airy es menor. Si delante de la lente disponemos las palas de un diafragma, y este se cierra, la luz que incide en los bordes ve interrumpido su paso. ¡El plano focal se habrá desplazado hacia



c! Por tanto, un sujeto que aparece enfocado a una determinada distancia y abertura puede aparecer desenfocado con solo variar la abertura. Este problema afecta a todos los objetivos, en mayor o menor medida, aunque se trata de minimizar el problema para que las oscilaciones del plano focal no alteren sustancialmente la nitidez percibida de la imagen. Las lentes con superficies asféricas (no esféricas, con perfiles con forma de parábolas o elipses) ayudan a reducir esta aberración. No obstante, si la distancia entre el diafragma y la superficie asférica es relativamente grande, otras aberraciones pueden verse agravadas.



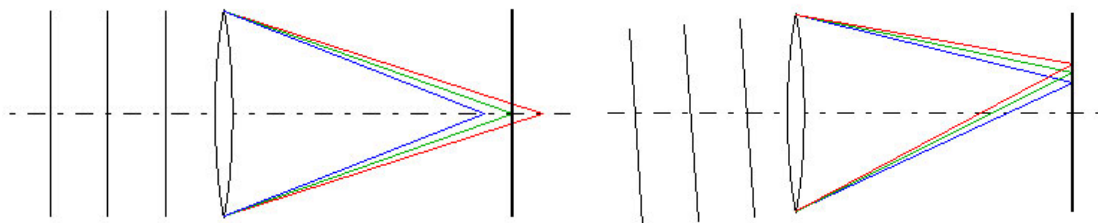
La *aberración de coma* (también conocida como *aberración esférica oblicua*) es de naturaleza similar a la anterior, en el sentido de venir explicada por diferencias en la refracción de los haces de luz en función de su ángulo de incidencia en la superficie curva de la lente. La luz con un mayor ángulo de incidencia es desviada con un ángulo distinto que la luz que entra más cerca del eje. El efecto son puntos de luz proyectados con un halo triangular y forma de cometa. Se puede corregir mediante combinaciones de distintas curvaturas en una y otra cara de la lente (*bending*) y, en objetivos con varias lentes, mediante un diafragma central y un diseño simétrico. Un objetivo corregido de aberraciones esféricas y coma se conoce como “*aplanático*”.



[Paul van Walree ©](#)

El *astigmatismo* y la *curvatura de campo* (->) son dos aberraciones monocromáticas asociadas, pero distintas. El problema de la curvatura de campo está en que el plano focal o plano gaussiano deja de ser tal y se convierte en una superficie curva que coincide parcialmente con el sensor (o la película) sólo en una pequeña zona central. El radio de esa curvatura se corresponde aproximadamente con la distancia focal del objetivo. El astigmatismo es la diferencia entre las superficies curvas correspondientes a detalles sagitales (líneas orientadas hacia el centro de la imagen) y tangenciales (líneas

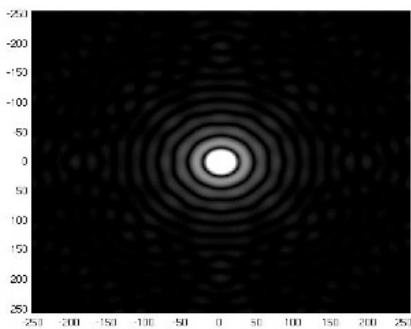
perpendiculares a las anteriores). En el gráfico de la izquierda, la curva marcada con  $T$  contiene los detalles tangenciales, y la marcada con  $S$  los detalles sagitales.  $P$  es la *superficie de Petzval*, que puede ser plana incluso en presencia de astigmatismo, y que guarda una relación matemática con las otras dos:  $TP = 3xSP$ , donde  $TP$  es la separación entre  $T$  y  $P$ , y  $SP$  entre  $S$  y  $P$ . Conforme nos alejamos del centro de la imagen, ésta va apareciendo más y más desenfocada (curvatura de campo) y quedando más afectados los detalles tangenciales que los sagitales (astigmatismo). Se puede definir una superficie plana entre  $S$  y  $T$  que ofrece un mejor compromiso en términos de enfoque, con el centro (detrás) y los bordes (delante) algo desenfocados, pero en menor medida de lo que estarían los bordes si respetáramos la posición señalada en el gráfico por el plano gaussiano (donde enfoca la luz que entra por el centro). Conociendo la distancia entre montura y sensor (o película) el diseñador óptico tiene que elegir sobre qué plano focal realizar los cálculos. También se puede jugar con la posición del diafragma y con los vidrios que componen las lentes del objetivo para acercar  $T$  y  $S$  (reducir el astigmatismo hasta conseguir una imagen perfectamente *estigmática*, en la que  $T=S$ ) o reducir también la curvatura que afecta a ambas (y conseguir una imagen *anastigmática*, sin curvatura de campo ni astigmatismo). En el gráfico de la derecha tenemos, en la parte A, una imagen estigmática (con  $S$  y  $T$  igualadas), pero con curvatura de campo; en la parte B tenemos una imagen con residuos de astigmatismo y curvatura de campo, pero aproximadamente anastigmática. Aunque las curvas  $T$  y  $S$  no se ven afectadas por la abertura, cerrando el diafragma sus efectos en la imagen se reducen. Grupos de lentes flotantes pueden reducir efectivamente el astigmatismo y la curvatura de campo. En cualquier caso, una corrección total de ambas aberraciones no es posible, si bien una imagen aproximadamente anastigmática es un buen compromiso. El astigmatismo puede observarse en las curvas MTF para cualquier abertura dada como una separación de las líneas tangenciales y sagitales *conforme nos alejamos del centro de la imagen*.



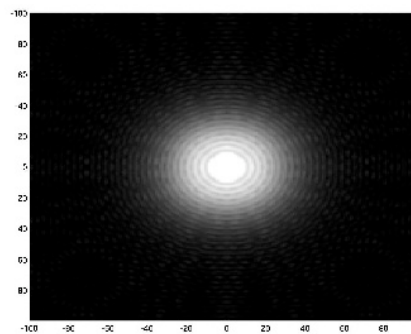
[Paul van Walree ©](#)

Las *aberraciones cromáticas* (->) son de dos tipos diferentes, *longitudinal* (o *axial*) y *lateral*. En la aberración cromática *longitudinal* (diagrama de la izquierda) cada longitud de onda converge en un plano distinto. Como vemos en el ejemplo, sólo la luz verde enfoca sobre el sensor, mientras que la azul lo hace antes de llegar a él, y la roja detrás. Afecta especialmente a objetivos muy luminosos (con grandes aberturas). En el caso de la aberración cromática *lateral* (diagrama de la derecha) todas las longitudes de onda (colores) enfocan en el mismo plano, pero con desplazamientos laterales respecto del eje (centro). Es muy frecuente en los teleobjetivos y los diseños retrofoco empleados en muchos gran angulares (\*), y explica que las líneas sagitales y tangenciales de las curvas MTF se separen *conforme cerramos el diafragma* (pues sólo la línea tangencial resulta afectada por la aberración, y no mejora al cerrar, mientras que la sagital sí). Los dos tipos de aberraciones cromáticas se dan *a la vez*, degradan la resolución y contraste de un objetivo y son uno de los causantes de esa coloración en los bordes de los objetos en presencia de marcados contrastes de luz (halos), pero con algunas diferencias: la aberración *longitudinal* o *axial* afecta todo el perímetro de los objetos, los tinte de un solo color, ocurre en cualquier

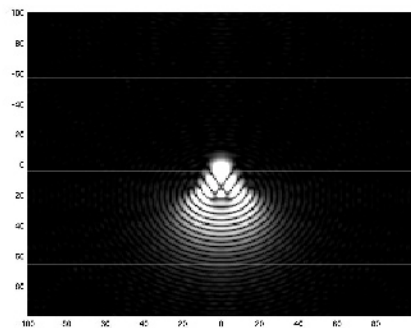
parte de la imagen y se reduce cerrando el diafragma; la aberración *lateral*, por el contrario, sólo afecta tangencialmente a la imagen, modifica la coloración según el orden de la secuencia oscuro-claro o claro-oscuro, empeora sus efectos al acercarnos a las esquinas y no depende de la apertura. Estas aberraciones se combaten combinando distintos tipos de vidrios exóticos con dispersión baja o anómala. Si los tres colores primarios están libres de esta aberración podemos hablar de objetivo “apocromático”, mientras que si la corrección afecta sólo a las bandas del azul al amarillo el objetivo será “acromático”. Los objetivos “superacromáticos” llevan la corrección a 4 o más longitudes de onda diferentes (Zeiss fabrica objetivos de este tipo, [->](#)). El problema de la aberración cromática tiene efectos más serios sobre sensores que sobre película, debido a la mayor sensibilidad ultravioleta e infrarroja de los sensores (donde la corrección de esta aberración en los objetivos era escasa por innecesaria) o a un problema de birrefringencia ([->](#)) provocado por el ángulo de incidencia de la luz en las microlentes que los cubren ([->](#)).



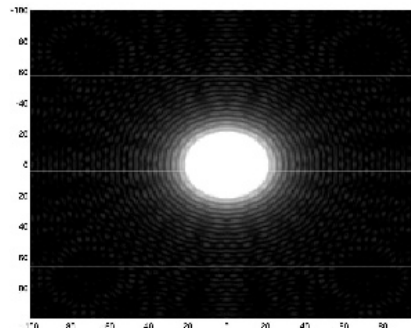
Patrón de Airy sin aberraciones



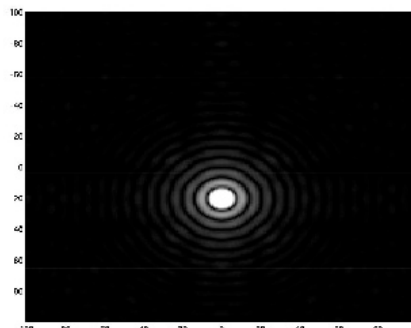
Patrón de Airy con aberración de esfericidad



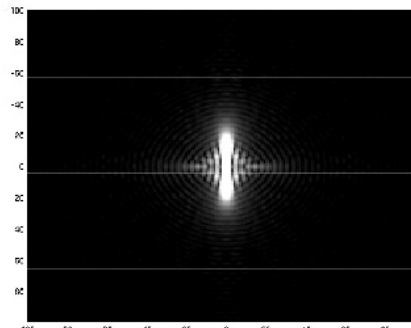
Patrón de Airy con curvatura de campo



Patrón de Airy afectado por un problema de distorsión

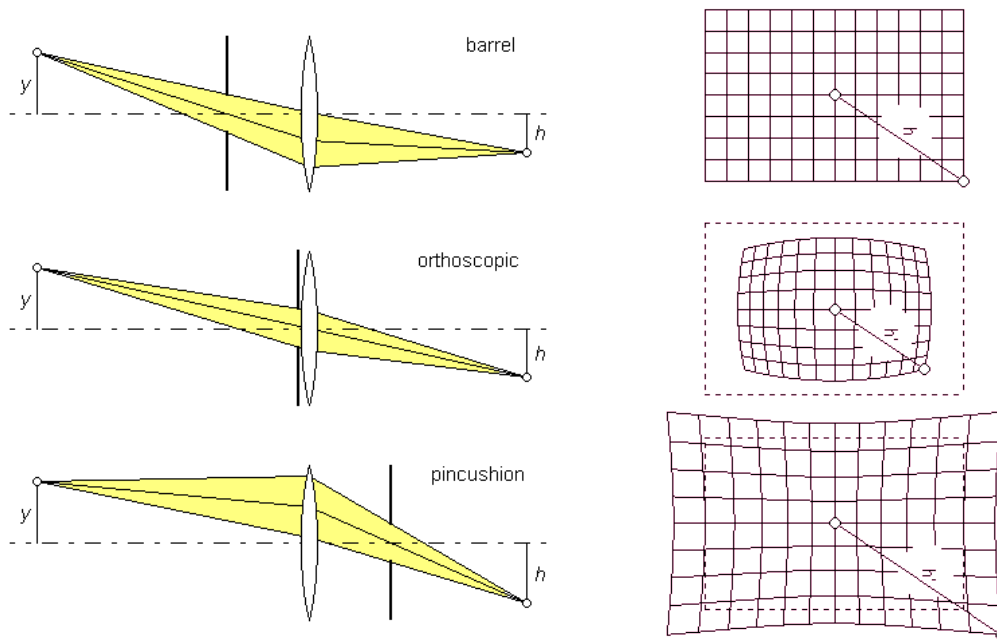


Patrón de Airy afectado por un problema de coma



Patrón de Airy con astigmatismo

*Patrones de Airy generados por ordenador para mostrar el efecto de las aberraciones*  
([Natalie Gakopoulos](#)©)



[Paul van Walree ©](#)

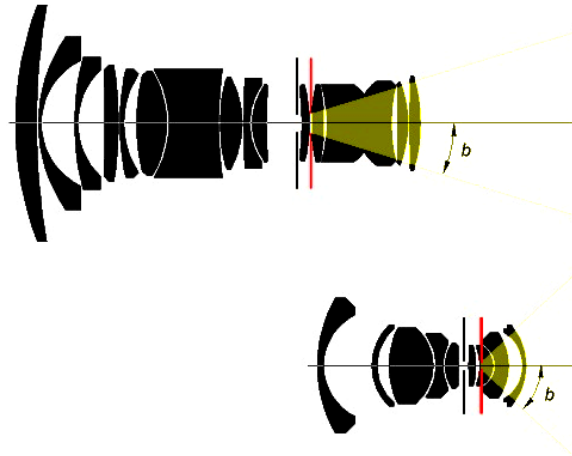
La *distorsión óptica* (->) es una aberración de Seidel, si bien no se puede ver su huella en el perfil de las curvas MTF. Distorsiona las líneas rectas, que se curvan, adoptando forma de *barril* ( $y > h$ ) o de *acerico* (*pincushion*,  $y < h$ ). El objetivo que no distorsiona la imagen se llama *ortoscópico*, que significa “visión correcta”. La razón  $h/y$  se conoce como magnificación de la imagen, y estaremos en presencia de una distorsión cuando dicha variable dependa de la distancia al centro de la imagen. Si  $h/y$  se reduce conforme nos alejamos del eje, la distorsión será de barril, y si aumenta será de acerico. Como puede verse, es la posición relativa del diafragma lo que provoca el problema. Un objetivo gran angular de tipo retrofoco tiende a mostrar distorsión de barril, pues el grupo frontal de lentes, de tipo negativo, actúa ópticamente como un diafragma. Los teleobjetivos son el caso contrario, con un grupo trasero negativo, y tienden a provocar distorsión de acerico. En cambio, los diseños simétricos son casi ortoscópicos. No hay que confundir las distorsiones ópticas con lo que se conoce como *distorsiones de la perspectiva*, y que no son realmente distorsiones. Un buen ejemplo son las líneas paralelas que se ven como convergentes (las esquinas de un rascacielos, los bordes de una carretera), debido simplemente a que el plano focal no se encuentra paralelo al objeto observado, sino formando un ángulo con él. Este efecto natural de la perspectiva puede corregirse con objetivos que permiten alterar la orientación del plano focal mediante desplazamientos de los grupos de lentes que lo forman. Las *distorsiones geométricas* también se confunden a menudo con una distorsión óptica. Éstas se producen cuando proyectamos un objeto con tres dimensiones en un plano bidimensional. No todos los puntos del objeto están a la misma distancia del plano. Esto explica que los objetos se vean distorsionados si se sitúan en los bordes de una imagen tomada con un gran angular. Las *distorsiones de la perspectiva* y las *geométricas* se corrigen en parte si, frente a la fotografía, adoptamos la misma posición que el fotógrafo frente al objeto, es decir, acercándonos más a las fotografías tomadas con grandes angulares o situando en alto las fotografías de edificios tomadas a la altura de la calle.

Los reflejos internos y la luz parásita (*flare*) (->) es otra variable que afecta severamente al contraste de un objetivo y, por tanto, a la calidad de imagen, si bien no es una aberración. Es luz que se desvía de su trayectoria y acaba alcanzando la película o el sensor, cuando no debería, o no en la forma en que lo hace. Las causas son múltiples, pero son reflejos incontrolados de la luz al cambiar de medio (de aire a vidrio o al revés) o al chocar con las palas del diafragma, con alguna impureza en el vidrio de las lentes, con la cara interna del barril del objetivo o con la propia película o superficie del sensor. Los multirevestimientos han permitido corregir esto en cierta medida (reduciendo las pérdidas de transmisión del 4% de las superficies aire-vidrio no revestidas hasta un 0,5-1%, ->), y el uso de *parasoles* adecuados evita que el problema se agrave (->). No es posible sin embargo eliminar totalmente el problema bajo todas las circunstancias posibles, aunque hay sistemas mejor corregidos que otros. El efecto de los reflejos es variado, desde manchas de color, a halos, velos neblinosos (*veiling glare*) o imágenes fantasma. Con los velos, la pérdida de contraste y saturación es notable, y la calidad de la imagen queda severamente degradada.

El *viñeteo* (->) tampoco es una aberración, pero afecta a la calidad de imagen, y podemos considerarlo una propiedad de los objetivos. Hay tres tipos de viñeteo, según su causa: el *óptico* (o físico, o artificial); el *natural*; y el *mecánico*. El de origen *óptico* se da cuando la luz que entra por los bordes de la lente frontal se encuentra con las paredes internas del objetivo. El viñeteo *natural* se produce porque los haces de luz que inciden en las zonas periféricas de la película o sensor recorren una mayor distancia que aquellos que alcanzan zonas cercanas al eje, y se dispersan en una superficie mayor. El *mecánico* se da cuando algún accesorio entorpece la entrada de la luz, como puede ser el caso de los filtros o los parasoles.

La *pupila de salida* es una abertura virtual, determinada por la proyección del diafragma en la lente que le sigue. La luz que pasa por esta pupila de salida consigue salir del objetivo (->). En los diseños de objetivos de tipo *simétrico* la distancia entre la *pupila de salida* y el plano focal coincide con la distancia focal y la luz incide en las esquinas del fotograma que encaja en el círculo de luz con el mismo ángulo que el *ángulo visual* (FoV) del objetivo, que es el ángulo de entrada. Sin embargo, los teleobjetivos, o los angulares retrofoco, tienen la *pupila de salida* más alejada, para disponer de más espacio tras ella con distintos propósitos (entre otros, permitir el juego del espejo en las cámaras réflex). En estos diseños la luz incide en las esquinas del fotograma con un menor ángulo. Un *teleobjetivo* (con dos elementos básicos, un elemento positivo en la parte frontal y un elemento negativo en la posterior) tendrá una distancia focal efectiva *mayor* que su longitud física. Al contrario, si observamos la longitud física de un objetivo gran angular y comprobamos que es superior a la distancia focal efectiva, tendremos un indicio del empleo de un diseño *retrofoco* (un teleobjetivo invertido, con dos elementos básicos, un elemento negativo en la parte frontal y un elemento positivo en la posterior). Los angulares retrofoco necesitan lentes frontales de mayor tamaño y son más difíciles de diseñar, pero ofrecen más posibilidades de control de las aberraciones. El viñeteo natural es inferior en este tipo de objetivos pero, en conjunto, el viñeteo observado es más sensible en ellos a la abertura del diafragma (y los problemas de distorsión tienden a ser más severos tanto en los teles como en los angulares, pero eso es otra historia).

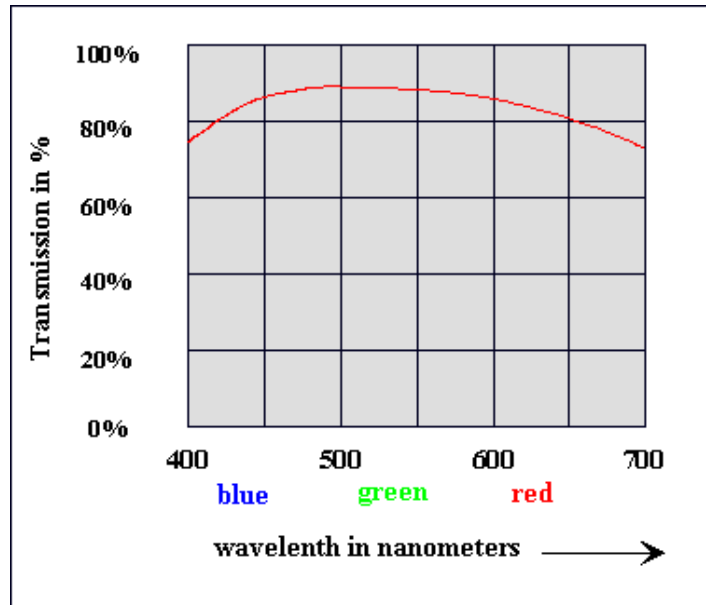
Los dos objetivos del dibujo que sigue a este párrafo son Zeiss de 21mm de distancia focal, el primero un diseño *Distagon* de tipo retrofoco para cámaras réflex Contax y el segundo un *Biogon* de tipo simétrico para cámaras telemétricas Contax G. Las líneas verticales negras señalan la posición del diafragma, y las rojas la posición de la pupila de salida. La distancia entre la pupila de salida y el plano focal es mucho mayor en el primer caso, así como la longitud física del objetivo, mientras que el ángulo de incidencia en los bordes del sensor o película de formato 35mm (b) es mucho menor, y por tanto también el viñeteo natural.



[Paul van Walree ©](#)

Los números  $f$  indican la abertura del diafragma, y son iguales a la razón entre la distancia focal y el diámetro de abertura del objetivo. Los números  $f$  responden a una serie de potencias de la raíz cuadrada de 2. En efecto, la raíz cuadrada de 2 es 1,4, y pasamos a los siguientes números de la escala multiplicando o dividiendo por ese número: 0,7 ( $\approx 1/1,4 = 1,4^{-1}$ ), 1 ( $\approx 1,4/1,4=1,4^0$ ), 1,4 ( $\approx \sqrt{2}=1,4^1$ ), 2 ( $\approx 1,4^2$ ), 2,8 ( $\approx 1,4^3$ ), 4 ( $\approx 1,4^4$ ), etc. Es fácil calcular la diferencia de luminosidad para pasos intermedios con la fórmula  $(1,4)^n = f$ , de donde, tomando logaritmos y despejando,  $n = \ln f / \ln 1,4$ . Recordamos que  $f$  es la abertura intermedia para la que queremos hacer el cálculo (por ejemplo,  $f/1,2$ ,  $f/1,8$ ,  $f/3,5$  o  $f/2,5$ ) y  $n$  la luminosidad en una escala lineal, donde 1 representaría la correspondiente a un objetivo  $f/1,4$ . Los objetivos para el formato 35mm (24x36mm) tienen un rango típico de aberturas comprendido entre  $f/1$  y  $f/22$ . El ojo humano, en cambio, tiene aberturas comprendidas entre  $f/2,1$  y  $f/8,3$ , mientras que un gato llega a  $f/0,9$ . Existe un simpático crustáceo, de nombre *Gigantocypris*, que habita a grandes profundidades, cuyos ojos tienen una abertura máxima de  $f/0,25$ .

Cada número  $f$  de la serie indica que la cantidad de luz que pasa a través del objetivo por unidad de tiempo es la mitad de la representada por el número anterior si la *transmisión lumínica o espectral* es del 100% (para cada longitud de onda). Los números  $t$ , de *transmisión*, normalizan la escala para tener en cuenta la posibilidad de que la transmisión lumínica de un objetivo en particular no sea del 100% (lo que en fotografía ocurre siempre, dependiendo la magnitud de la pérdida de factores como el número, composición y grosor de las lentes que componen el objetivo, del tratamiento de la cara interna del barrilete y del número de superficies aire-vidrio y de su tratamiento con revestimientos,  $\rightarrow$ ).



[Schneider-Kreuznach ©](#)

Un número  $t/2$  indica una transmisión de luz equivalente a un  $f/2$  con un 100% de transmisión lumínica, pero equivalente a un número  $f$  inferior si la transmisión lumínica es menor. Dos objetivos con el mismo *número t* tienen la misma luminosidad, pero eso no ocurrirá necesariamente dos objetivos con el mismo *número f* (dependerá de sus transmisiones lumínicas relativas). Esta escala normalizada de *números t* se emplea mucho en los objetivos para cámaras de cine, por ejemplo. Es importante recordar siempre que los *números f* son índices *geométricos*, no lumínicos.

Es muy fácil calcular el diámetro de la abertura si sabemos la distancia focal del objetivo y el número  $f$ , como mostramos en la siguiente tabla (->) construida para un objetivo de 50mm:

	Diámetro de la abertura (mm)	Radio de la abertura (mm)	Superficie total de la abertura (mm <sup>2</sup> )	Cantidad de luz transmitida por unidad de tiempo ( $f/5,6 = 1$ )
Abertura	= 50mm / $f/\#$	= Diámetro/2	= $\pi * \text{radio}^2$	
f/1	50,0	25,0	1963	x32
f/1,4	35,7	17,9	1002	x16
f/2	25,0	12,5	491	x8
f/2,8	17,9	8,9	250	x4
f/4	12,5	6,3	123	x2
f/5,6	8,9	4,5	63	1
f/8	6,3	3,1	31	x1/2
f/11	4,5	2,3	16	x1/4
f/16	3,1	1,6	8	x1/8
f/22	2,3	1,1	4	x1/16



Como puede observarse, la superficie de la abertura se reduce por la mitad con cada paso que damos en la serie de números  $f$ , lo que explica esa reducción por mitades en la cantidad de luz por unidad de tiempo de la que hablábamos. Esos cálculos serían correctos *sólo si* las palas del diafragma estuvieran instaladas delante de la primera lente del objetivo (sería la *pupila de entrada* en ese caso). Normalmente el diafragma está situado dentro del objetivo y sus dimensiones son más reducidas de lo que muestran los cálculos de la tabla, si bien las proporciones se mantienen en todo caso.

A plena abertura el efecto de la difracción es mínimo, pero las aberraciones esféricas y de coma son muy severas y difíciles de corregir. Cerrando el diafragma al máximo las aberraciones mencionadas se minimizan, pero los efectos de la difracción se multiplican. Hay un punto medio en el que se consigue un justo equilibrio entre ambas causas del deterioro de la imagen –aberraciones y difracción– y en el que la calidad de ésta (resolución, contraste) alcanza su máximo para cada objetivo. Esa abertura óptima dependerá del formato. Aproximadamente, los objetivos para el formato de 35mm suelen verse condicionados por las aberraciones para aberturas de  $f/5,6$  o mayores (números  $f$  menores), mientras que suelen estar condicionados por la difracción para aberturas de  $f/11$  o menores (números  $f$  mayores). No obstante eso depende también de cada objetivo (no es lo mismo un objetivo de focal variable que otro de focal fija, o en general dos diseños ópticos distintos, etc.).

Se puede calcular aproximadamente la *transmisión lumínica* de un objetivo atendiendo al número de superficies aire-vidrio, y al tratamiento de dichas superficies, según un método de Rudolf Kingslake. Si éstas no están tratadas la pérdida que se produce en cada una es de un 4%, si el vidrio está tratado con un revestimiento de una capa, la pérdida es del 2%, y del 0,5% si se trata de un multirevestimiento moderno. La *transmisión lumínica* en tantos por ciento sería:

$$T = (1-S)^N$$

donde  $T$  es la transmisión (como %),  $S$  es la pérdida (como %) y  $N$  el número de superficies aire-vidrio (el doble del número de elementos, o de grupos cementados). Para calcular la pérdida ocurrida en pasos de luz empleamos:

$$|\log_2 T| = L$$

donde  $L$  son los pasos de pérdida. Ahora hay que crear un índice que, multiplicado por la abertura máxima de un objetivo, nos de su abertura efectiva, en *números  $t$* . Para ello:

$$M = 2^{L/2}$$

donde  $M$  es el índice. Así, para calcular el *número  $t$*  a partir del *número  $f$*  sólo hay que multiplicar dicho *número  $f$*  por  $M$ , de manera que  $f/X * M = t/Y$ . Este cálculo es sólo una aproximación debido a que intervienen otros factores (que hemos mencionado), pero es fácil de hacer con poca información. Sólo con saber el número de superficies, y suponiendo que todas están tratadas, podemos tener una idea de la pérdida de transmisión mínima esperable. Un mismo objetivo puede (o no) transmitir a  $f/1,4$  el doble de luz que a  $f/2$ , pero *no* debe suponerse en ningún momento que dos objetivos distintos a  $f/1,4$  transmiten la misma cantidad de luz por unidad de tiempo. Para cualquier objetivo con una transmisión de menos del 100% el *número  $t$*  será siempre mayor que el *número  $f$* , y la desviación puede ser sustancial, como diferente entre objetivos. Por dar una idea aproximada, diremos que un objetivo para fotografía de 35mm con una transmisión inusualmente elevada es el Leica Summilux-M 75mm, con un 93,1%.

Volveremos a este tema de la transmisión de luz al final de este artículo (epígrafe 10), pues tiene muy interesantes repercusiones.

El *ángulo visual* (*FoV*) para un objetivo *rectilíneo* se puede aproximar mediante la fórmula (->):

$$FoV = 2 * \arctan [ T / (L * 2 * (m + 1)) ]$$

Donde *arctan* es el arco-tangente (->), *T* es la dimensión del formato, ya sea horizontal, vertical o diagonal, *L* es la distancia focal y *m* es la magnificación. Ésta se puede calcular mediante la expresión:

$$m = L / (d_f - L)$$

donde *d<sub>f</sub>* es la distancia a la que estamos enfocando, y *L* la distancia focal, como siempre.

Ocurre pues que el ángulo visual depende de la distancia a la que enfocamos, y cuando ésta es infinita la magnificación se hace cero, mientras que cuando la distancia de enfoque se reduce el ángulo visual lo hace también, pero sólo para distancias muy cortas. Hay ángulos de visión horizontales, verticales y diagonales para cada formato, y por eso *T* puede representar cualquiera de los lados del fotograma, o su diagonal. Por ejemplo, el ángulo de cobertura *diagonal* de un objetivo rectilíneo de 50mm para el formato de 35mm enfocando a infinito se calcula haciendo *m* = 0 y *T* = 43, lo que nos da unos 47 grados. A continuación presentamos una tabla con los ángulos correspondientes a las focales más comunes, en los tres sentidos, para formato de 35mm:

Distancia focal (mm)	15	21	24	28	35	50	70	85	90	100	135	200
Diagonal (°)	110,5	91,7	84,1	75,4	63,4	46,8	34,3	28,6	27,0	24,4	18,2	12,3
Vertical (°)	77,3	59,5	53,1	46,4	37,8	27,0	19,5	16,1	15,2	13,7	10,2	6,9
Horizontal (°)	100,4	81,2	73,7	65,5	54,4	39,6	28,8	23,9	22,6	20,4	15,2	10,3

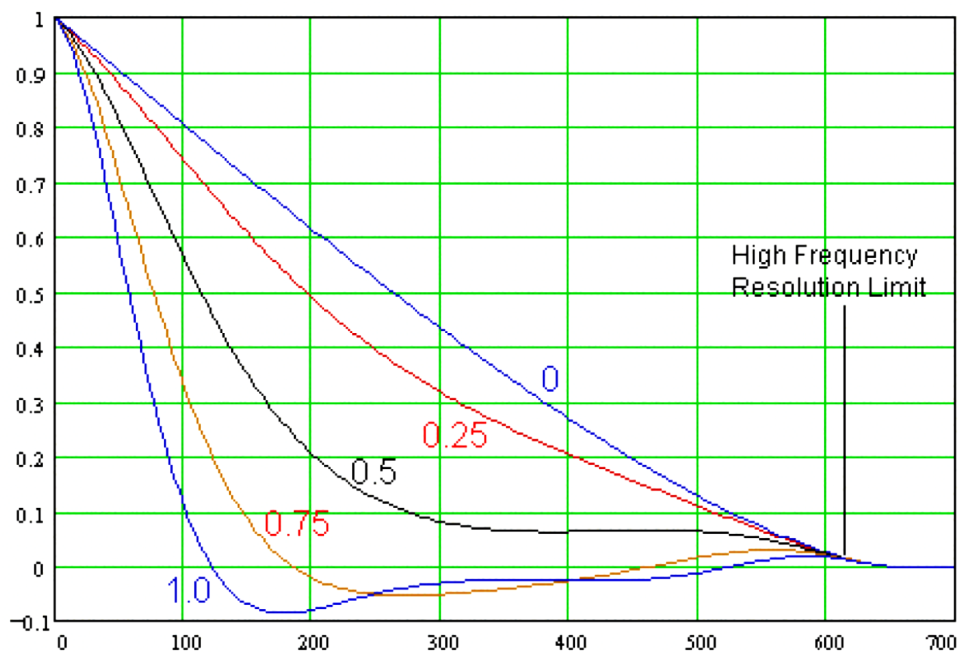
El ángulo visual binocular horizontal y vertical de un ser humano es de unos 180 y 90 grados respectivamente, con un ángulo monocular de 140 y 90 grados (ángulos de aceptación de luz), siendo de 120 grados el campo en que se produce una superposición “estéreo”. No obstante, percibimos detalles de forma y color para un área mucho menor (campo central o *foveal*), de unos pocos grados. Ello se debe a que sólo una parte de la retina, llamada *fóvea*, tiene una alta concentración de “conos”, que son células fotosensibles que responden a los colores. El resto de la retina está cubierta sobre todo de “bastoncillos”, monocromáticos. La información de este campo *periférico* se emplea para regular el movimiento de los ojos. El movimiento de tipo “sacádico” proporciona un “barrido” (parecido a un escaneo) de un objeto mediante pequeños saltos en la posición del ojo (“sacadas”), lo que nos permite obtener información visual detallada de objetos grandes a partir de un campo foveal muy pequeño. No es de extrañar que los datos sobre el ángulo visual humano “con detalle” (ángulo visual foveal) sean tan variados, pues depende de cada circunstancia. Podemos concentrar nuestra atención en una línea de la página de un libro para leer o en la pantalla de un cine, cubriendo el “barrido” sacádico en cada caso ángulos muy distintos, lógicamente. Si el objeto en que centramos la atención se mueve o el área es demasiado amplia, nuestro cerebro dispone de otros movimientos adicionales de ojos y cabeza para ajustar el ángulo visual foveal debidamente, aunque resultan menos precisos y confortables. Se considera

que el rango de ángulos de visión que proporcionan las sacadas, se correspondería aproximadamente con el de objetivos de 35 a 90mm para el formato de 35mm.

Un objetivo teóricamente perfecto estaría libre del efecto degradante de las aberraciones, pero nunca de la difracción, que es inevitable (->). Esos objetivos ideales, libres de aberraciones, reciben el nombre de "limitados o condicionados sólo por la difracción" o "sin aberraciones" (*diffraction limited lenses* o *aberration free lenses*).

Es fácil calcular la capacidad resolutive *máxima* teórica de uno de estos objetivos sólo condicionados por la difracción, mediante una sencilla fórmula (que veremos ahora). Esas cifras se aproximan a las de un objetivo con aberraciones sólo cuando cerramos el diafragma. Por otro lado, cuanto mayor sea el grado de corrección de las aberraciones de un objetivo (medido mediante el *error del frente de onda*, o *wavefront error*) más similares serán las *funciones de transferencia de contraste* (MTF) a las de un objetivo sólo limitado por la difracción (->).

En el siguiente gráfico mostramos cómo afectan las aberraciones a una curva MTF cualquiera, donde en el eje de ordenadas (vertical) se representan los niveles de contraste (en tantos por uno) y en el de abscisas (horizontal) las resoluciones (en pares por milímetro). Cuando el *error del frente de onda* es igual a 0 'longitudes de onda' podemos decir que el objetivo está libre de aberraciones. La curva MTF, como se puede ver, decrece a una tasa constante hasta cero. Para errores de 0,25 'longitudes de onda' o menores tenemos un nivel de aberraciones aceptable, mientras que a 0,5 'longitudes de onda' las aberraciones ya estarán afectando apreciablemente la imagen, y a partir de 0,75 'longitudes de onda' la pérdida de calidad es notable. Puede observarse cómo, si bien las aberraciones no reducen el límite resolutive máximo del objetivo, sí afectan al perfil de la curva, que adopta una forma convexa, deteriorando muy sustancialmente los niveles de contraste *en el rango de resoluciones relevante para la fotografía*, que en las cámaras réflex digitales actuales es inferior a los 100 pares por milímetro.



El efecto de las aberraciones en una curva MTF (Bob Atkins©).

La resolución máxima teórica de un objetivo libre de aberraciones, sólo limitado por la difracción, con 0 'longitudes de onda' de *error de frente de onda*, depende de dos factores: la apertura y la longitud de onda de la luz que atraviesa el objetivo. El ser humano puede percibir longitudes de onda dentro del rango 0,0004-0,0007mm, que va del azul al rojo. Podemos basar nuestros cálculos en un valor medio, un verde-amarillo con una longitud de onda de 0,000555mm, para la que el ojo humano es más sensible (aunque 0,00050mm puede ser más representativo de la luz día).

La MTF de un objetivo sólo limitado por la difracción responde a la fórmula (->)

$$MTF(R) = \frac{2}{\pi} \left[ \cos^{-1}(Rwf) - (Rwf) \sqrt{1 - (Rwf)^2} \right]$$

Donde  $R$  es la resolución o frecuencia espacial,  $w$  es la longitud de onda de la luz y  $f$  es el número que indica la apertura.

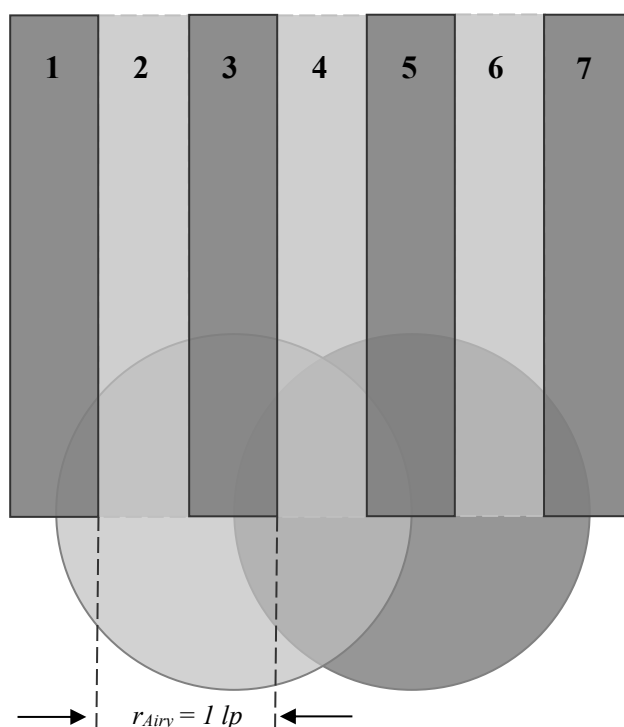
Si adoptamos el *criterio de Rayleigh* (por el físico británico *John William Strutt, Lord Rayleigh*, 1842-1919, ->), según el cual dos puntos se distinguen como tales cuando el primer anillo de oscuridad (primer mínimo) del *grupo de círculos concéntricos* de uno coincide con el centro del *disco de Airy* del otro (->), la fórmula sería:

$$R_9 = 1 / (1,22 * w * f) = 0,82 / (w * f)$$

Donde  $R_9$  es la máxima resolución alcanzable en pares por milímetro a un 9% de contraste,  $w$  es la longitud de onda de la luz en milímetros y  $f$  es el número que indica la apertura. Por otro lado,  $r_{Airy} = 1,22 * w * f$  sería el *radio* del disco de Airy.

Debe tenerse en cuenta que según el *criterio de Rayleigh* dos puntos son distinguibles cuando están separados por una distancia igual al *radio* del disco de Airy, es decir, al radio del disco de luz central.

Como muestra Williams (1990, página 59):



El gráfico indica la correspondencia según el *criterio de Lord Rayleigh* entre el radio del disco de Airy (=  $r_{Airy}$ ) y la separación de una línea (=  $d$ , un par, pues incluye su compañera blanca), es decir, *cada radio define un par*. Debe haber una diferencia en intensidad luminosa suficiente entre las áreas marcadas con número par y las áreas marcadas con número impar. Es obvio que en las áreas pares hay también cierto nivel de luz, y eso explica que el contraste sea relativamente bajo.

Debe recordarse que el criterio de Rayleigh es una regla empírica basada en la capacidad visual humana, inicialmente derivada de la necesidad de diferenciar puntos luminosos cercanos entre sí sobre fondo oscuro, en un telescopio. Por tanto, ese valor del 9% de contraste es puramente convencional. Veremos que cuando se trata de resolver detalle con un sensor la relación entre el diámetro del disco de Airy, su separación y la resolución puede cambiar. De hecho, incluso tratándose de pura inspección visual, cuando el motivo es distinto *debe* cambiar (más adelante trataremos el tema de la agudeza visual humana).

El llamado *criterio de Dawes* adopta un 0% de contraste como límite, y la fórmula, simplificada, pasa a ser:

$$R_0 = 1 / (w * f)$$

Donde R es la frecuencia espacial. Si elevamos la exigencia de contraste la fórmula para el cálculo de resoluciones vuelve a cambiar. Para un contraste del 10% tendríamos ( $\rightarrow$ ,  $\rightarrow$ ):

$$R_{10} = 1 / (1,30 * w * f) = 0,77 / (w * f)$$

Para un contraste del 50% tendríamos:

$$R_{50} = 1 / (2,63 * w * f) = 0,38 / (w * f) = 0,38 R_0$$

Y para el 80%:

$$R_{80} = 1 / (6,25 * w * f) = 0,16 / (w * f) = 0,16 R_0$$

Aplicando esas sencillas fórmulas es fácil construir una tabla de resoluciones máximas para un objetivo ideal, perfecto, que haya conseguido eliminar todas las aberraciones para todas las aberturas y esté limitado sólo por la difracción. Un ejemplo de objetivos (casi) sólo limitados por la difracción son el Apo-Telyt-R 280mm f/4 ( $\rightarrow$ ) y el Apo-Summicon-R 180mm f/2 (cerrando algo) de Leica ( $\rightarrow$ ), o el propio 300mm f/2.8 L de Canon. Recordemos que estos valores convergen a los de un objetivo con aberraciones conforme cerramos el diafragma o, dicho de otra forma, no podemos en general esperar alcanzar las resoluciones indicadas en la tabla para los valores  $f$  más bajos.

Nos será de utilidad computar también el *diámetro* del disco de Airy para un objetivo sólo limitado por la difracción y para un motivo perfectamente enfocado. La fórmula es muy sencilla ( $\rightarrow$ ), ya que  $2r_{Airy} = d_{Airy}$ :

$$d_{Airy} = 2,44 * w * f * 1000$$

donde  $d_{Airy}$  es el diámetro de dicho punto (se refiere al punto luminoso central encerrado en el primer aro oscuro, que tiene una luminosidad decreciente hacia los bordes  $\rightarrow$ ), y se multiplica por 1000 para pasar a micras si la variable  $w$  viene dada en milímetros. Obsérvese que  $R_9 = 2/d_{Airy}$ , es decir, el número de discos de Airy que hay en un milímetro multiplicado por dos, pues *cada disco completo define dos pares de líneas*. La razón entre la base del

disco de Airy (diámetro) y su altura (luminosidad) determina la capacidad resolutive del sistema. Cuanto menor es la luminosidad del disco y mayor su diámetro, menor será la resolución y contraste. La rapidez de la pérdida de luminosidad que se produce conforme nos alejamos del centro del disco nos dará la acutancia del detalle.

Abertura	Máxima resolución teórica según el criterio de Dawes (lp/mm)	Máxima resolución teórica según el criterio de Rayleigh (lp/mm)	Máxima resolución teórica (lp/mm)	Máxima resolución teórica (lp/mm)	Diámetro del disco de Airy (micras) para un motivo perfectamente enfocado
	MTF 0%	MTF 9%	MTF 50%	MTF 80%	
Luz verde-amarillo de 0,000555 milímetros de longitud de onda					
f/1	1818	1490	691	291	1,3
f/1,4	1299	1065	494	208	1,9
f/2	909	745	346	145	2,7
f/2,8	649	532	247	104	3,8
f/4	455	373	173	73	5,4
f/5,6	325	266	123	52	7,5
f/8	227	186	86	36	10,7
f/11	165	135	63	26	14,8
f/16	114	93	43	18	21,5
f/22	83	68	31	13	29,5

Esta tabla muestra las máximas resoluciones posibles en un objetivo (*aerial image resolution*), a distintos niveles de contraste. Para diafragmas más cerrados la tabla aproxima los valores reales que podemos encontrar en cualquier objetivo. Para diafragmas más abiertos todo dependerá de la calidad del objetivo, del grado en que se han corregido las aberraciones, lo que depende de su diseño y de la calidad de su fabricación. Por ejemplo, con un nivel de contraste del 50% muy pocos objetivos podrán ofrecer más de 100 pares de líneas por milímetro (sólo aquellos limitados por la difracción a f/5.6).

El diámetro del disco de Airy nos ayudará a entender más adelante por qué las cámaras de menor formato pierden rápidamente nitidez cuando cerramos el diafragma. También nos servirá para introducir un importante concepto: el *círculo de confusión*.

El círculo de confusión (*circle of confusion*, CoC,  $\rightarrow$ ) es el tamaño máximo del disco de Airy que, ampliado para pasar la foto de su medio de captura original al papel, garantiza que el ojo humano no lo perciba como tal punto. *Las partes de la imagen representadas por discos de Airy con tamaños iguales o inferiores al círculo de confusión se percibirán como nítidas.* La profundidad de campo (*depth of field*, DoF) está relacionada por tanto con el diámetro de estos puntos de luz proyectados por el objetivo.

El diámetro del círculo de confusión depende del tamaño de la superficie de captación original, pero también de la ampliación a la que sometamos la imagen para llevarla al papel, por lo que tiene un componente convencional. En general se adopta como referencia un tamaño de impresión de 8x10 pulgadas (203x254mm, con proporciones 2:2,5 y que cabe en un DIN A4, que son 210x297mm, con unas proporciones 2:2,8), que para el formato de 35mm (24x36 mm) lleva a unos círculos de confusión dentro del margen 0,025-0,035mm (25 a 35 micras) si nos basamos en una estimación conservadora de lo que el ojo humano

puede distinguir con claridad a simple vista (veremos este tema con detalle un poco más adelante). Actualmente se adopta el valor de 0,030 milímetros. En cualquier caso, cualquier imagen captada en una superficie de ese formato debe ampliarse 7,6 veces para conseguir una impresión 8x10, pues la diagonal del formato de 35mm es de 43mm y un rectángulo de 8x10 pulgadas tiene una diagonal de 325mm ( $325/43 = 7,6$ ). Por tanto, tendremos 0,030 milímetros por 7,6, que son 0,23 milímetros, cuya inversa son algo más de 2 lp/mm. Puede parecer poco, pero veremos que esos 2 pares por milímetro tienen un impacto muy importante en la percepción subjetiva de calidad en una imagen.

Una impresión 8x12 pulgadas (203x305 mm) respeta las proporciones del fotograma (2:3 = 1:1,5), pero no cabría (por poco) en un DIN A4 (8,3x11,7 pulgadas). Un fotograma de formato 35mm tendría que ampliarse 8,5 (=  $366/43$ ) veces para alcanzar un tamaño de 8x12 pulgadas. Se puede emplear el 8 como un número redondo intermedio para cálculos rápidos en los que tenga que ver el factor de ampliación.

Las estimaciones que acabamos de ver son las que se siguen para el trazado de las marcas de profundidad de campo de los objetivos, pero se trata de convenciones de los años 30 *muy anticuadas*.

Zeiss, en el número 1 de *Camera Lens News*, dejó claro que

“Todos los fabricantes de objetivos del mundo, incluyendo Carl Zeiss, tuvieron que adoptar el mismo principio y el estándar internacional basado en él (0,03 mm para el círculo de confusión del formato 35mm), para producir las marcas y tablas de profundidad de campo”. Sin embargo, “El estándar internacional de profundidad de campo procede de una época en la que la calidad de imagen estaba severamente limitada por las emulsiones disponibles. Aquellos que emplean estas marcas, tablas y fórmulas (por ejemplo, para calcular la distancia hiperfocal) se están refiriendo, probablemente sin saberlo, al potencial de calidad de imagen medio de las emulsiones previas a la Segunda Guerra Mundial” (->).

Además, hoy sabemos que el ojo humano puede llegar a captar hasta 3 veces más detalle a simple vista, es decir, distinguimos puntos de unos 0,07 milímetros de diámetro cuando menos (->), por lo que el círculo de confusión debería ser mucho menor. Volveremos a este tema con detalle ahora.

Un factor más que debe tenerse en cuenta: si adoptamos como referencia un tamaño de impresión mayor (un A3, por ejemplo, muy común hoy día gracias a las asequibles impresoras fotográficas), el círculo de confusión tiene que ser todavía más pequeño (->).

El tema es importante y requiere algo más de análisis. Normalmente lo que se hace es medir el límite puntual de resolución del ojo determinando el tamaño mínimo de *punto* discernible. A partir de las dimensiones de ese punto se computa la capacidad resolutive del ojo en pares por milímetros. El tamaño mínimo de punto discernible es de 1/60 de grado o un minuto de arco (60 segundos). A 25 centímetros, que es la distancia óptima de observación, eso supone (->) un punto de 0,07 milímetros de diámetro (70 micras), lo que permite calcular la conocida cifra de los 6-7 pares por milímetro. Para que un punto tan pequeño sea visible su luminosidad debe diferir de la del fondo en al menos un 20 por ciento, que es el contraste mínimo para ese tamaño de punto. Para puntos mayores el requerimiento de contraste se reduce hasta un mínimo del 5 al 1 por ciento dependiendo de las condiciones de luz. No es lo mismo un punto negro en un fondo brillante que un punto luminoso sobre un fondo oscuro. En este segundo caso la capacidad resolutive del ojo es

muy superior a la que venimos mencionando. Por tanto, el círculo de confusión de 30 micras está basada en criterios muy conservadores en cuanto a tamaño de ampliación (copias de 8x10 pulgadas), tamaño de negativo (formato 24x36mm) y capacidad visual del ojo (2 lp/mm). ¿Esto es todo? En absoluto. Los errores de las viejas convenciones son mucho mayores de lo que se acaba de indicar.

Para empezar, la separación entre conos en la fovea es de 0,0015 milímetros, lo que traslada la máxima resolución visual posible a 20 segundos de arco. Por otro lado, en términos prácticos, 30 segundos de arco son difícilmente discernibles. Con esos límites mínimos podemos aceptar el valor de 60 segundos de arco, aunque no es un valor universalmente aceptado. Se trata en todo caso del diámetro de puntos.

Por otro lado, no es lo mismo discriminar un punto que una línea. Un punto debe ser suficientemente grande para estimular varios conos de la retina. Lo mismo ocurre con las líneas, pero aquí la exigencia de grosor es menor que la de diámetro en el punto, ya que la longitud de la línea consigue estimular varios conos en todo caso. El ojo puede ver una línea aislada negra sobre fondo brillante con alto contraste si tiene un grosor de una micra o menos (0,001 milímetros) a 25 centímetros (0,8 segundos de arco). Una línea aislada brillante sobre fondo negro puede verse por pequeña que sea, dependiendo sólo del brillo, y no de su anchura. Curiosamente, si son grupos de líneas, el ojo pierde capacidad de discernir. Grupos de líneas negras sobre fondo brillante deben separarse (de centro de línea a centro de línea, es decir, un par) al menos 0,05 milímetros para poder distinguirse visualmente (50 micras o 20 pares de líneas por milímetro a 25 centímetros, para 40 segundos de arco; la línea negra sería de 25 micras). Si es un grupo de líneas brillantes sobre fondo negro la resolución visual es de 1 segundo de arco. Puede tomarse este dato como límite máximo, para sujetos de alto contraste, en situaciones de observación ideales.

Al no distinguir entre el mínimo tamaño del punto visible y la mínima separación discernible entre dos puntos adyacentes (recordemos el *criterio de Rayleigh*: el diámetro del punto no se puede igualar a la anchura de la línea), al confundir la capacidad resolutive respecto a un punto con la capacidad resolutive respecto a una línea o grupo de líneas, y al no distinguir entre el contraste de los motivos, se dan cifras muy dispares de la capacidad visual del ser humano.

Como hemos visto, el círculo de confusión de 30 micras es una convención adoptada para cálculos de profundidad de campo que, implícitamente, supone un tamaño de copia pequeño y película de muy baja resolución, o una agudeza visual de no mucho más de 2 pares de líneas. Los 0,07 milímetros para una línea se basan en el punto, lo que no es correcto. Si 40-60 segundos de arco para un punto se trasladan correctamente a pares de líneas (véase el criterio de Rayleigh) tendremos 14-20 lp/mm. Es más, la calidad de imagen percibida es sensible a detalle de incluso 25 lp/mm.

Estos cálculos suponen máxima agudeza visual, y una distancia de observación de 25 centímetros. Pero una fotografía no se mira a esa distancia siempre. La distancia natural de observación depende de la distancia focal, de la diagonal de la fotografía y de la diagonal del formato de captura. Tenemos que  $e = L * v$ , donde  $e$  es la distancia a la que se debe contemplar la foto,  $L$  es la distancia focal y  $v (=D/d)$  son las veces que hemos ampliado el fotograma para alcanzar el tamaño de la foto impresa. Los 25 centímetros proporcionan una distancia natural de observación sólo para una focal de 30mm y una impresión tamaño A4, o una focal de 21mm y una impresión A3, en ambos casos con un formato de 35mm. En cualquier otro caso una perspectiva natural implicará alguna pérdida de resolución visual.



Una cosa es la capacidad resolutive del ojo y otra la percepción de calidad en una imagen. La llamada "legibilidad" de una fotografía es la percepción de nitidez en una fotografía ya impresa (Williams 1990, páginas 55 y 56). Entre 6 y 8 pares por milímetro, a 25 centímetros de distancia, se garantiza una imagen que se percibe como de gran nitidez. Incluso a 4 pares por milímetro la percepción de nitidez es aceptable. Por tanto, el valor de 6 pares en la fotografía final es un buen punto de referencia práctico, a pesar de todo. También lo es considerar, a partir de estudios empíricos de Zeiss, que 40 lp/mm de detalle real resuelto en un formato de 35mm, e incluso el formato medio, es un valor clave para la percepción de calidad y legibilidad en una imagen fotográfica (->).

Pero se puede afinar más, y especificar qué rango de detalles afecta más a la percepción *subjetiva* de nitidez. Se trata del rango que va de 0,5 a 2 lp/mm en el papel (->), a una distancia de observación de unos 34 cm. Eso supone, para el sensor y el objetivo, un rango de resoluciones que va de 6 lp/mm (0,5\*12) a 24 lp/mm (12\*2 lp/mm) si hablamos de una impresión A3 obtenida a partir de un sensor o película de formato 35mm. El objetivo que transmite un alto nivel de contraste dentro de ese estrecho y *modesto* rango de resoluciones, proporciona una imagen con buen impacto visual.

No obstante, cuando se examina la *capacidad límite* de un sistema fotográfico, hay que elevar la exigencia al máximo, y no limitarse a las condiciones prácticas impuestas por la agudeza visual o el tamaño de impresión. Las fotos pueden verse en pantalla ampliadas a cualquier tamaño. De hecho, 12 MP al 100% en una pantalla de 96 píxeles por pulgada equivale a una impresión de 1 metro por 70 centímetros, y a ese tamaño las diferencias más pequeñas pueden hacerse notar. Retomaremos el tema de la capacidad límite de un sistema fotográfico con distintos formatos al final de este estudio

Véanse los análisis sobre agudeza visual humana de Norman Koren (->), R. N. Clark (->), Ronald W. Harris (->), y sobre todo Williams (1990).

En cualquier caso, la resolución real que debe alcanzar el sistema en pares por milímetro,  $R$ , vendrá dada por la resolución real que queremos en el papel en pares por milímetro multiplicada por la razón de las diagonales de la foto impresa y el medio de captura, de modo que

$$R = r_f * (D/d)$$

Donde  $r_f$  es la resolución final en el papel,  $D$  es la diagonal de la fotografía impresa y  $d$  la diagonal del fotograma o sensor. Podemos emplear la fórmula para calcular qué resolución debe alcanzar el sistema (sensor y objetivo) para garantizar determinada resolución en una impresión de determinado tamaño. Por ejemplo, para conseguir una impresión 8x12 con 6 pares por milímetro (*de detalle real captado*) el sensor de 35mm tiene que proporcionar una resolución lineal real de 50 pares por milímetro ( $\approx 6*366/43$ ).

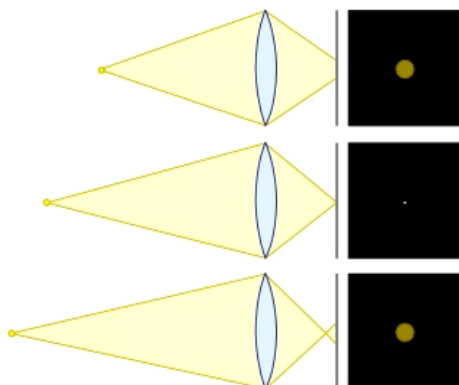
El círculo de confusión no es más que la inversa de  $R$  multiplicada por dos, para pasar a milímetros, es decir,

$$CoC = 2/R$$

Hay una regla sencilla, aunque algo tosca, para calcular el círculo de confusión, que es dividir la diagonal del sensor o película por 1500

$$CoC = d/1500$$

En efecto, el formato de 35mm tiene una diagonal de 43mm, de manera que, sustituyendo, tendremos que  $CoC = 0,030$  mm para dicho formato.



*Tres puntos en distintas posiciones de una escena que vemos nítidos por proyectar en el plano focal puntos iguales o menores al círculo de confusión (->).*

Volvamos a la tabla anterior. Obsérvese que para el formato de 35mm cerrar el diafragma más allá de  $f/22$  conlleva una pérdida apreciable de nitidez percibida en una impresión 8x10 (ó 8x12), pues el *disco de Airy* superará el tamaño del círculo de confusión (convencionalmente definido) (->). Los formatos más pequeños tienen ese límite en un número  $f$  menor (a una abertura mayor), pues su círculo de confusión es menor (hay que ampliar la imagen original más veces). Lo contrario para los formatos más grandes, cuyos objetivos se pueden permitir números  $f$  mayores que los mostrados en la tabla. En general, para el cálculo de los círculos de confusión de cada formato se puede emplear el factor de recorte de todos ellos respecto de uno cualquiera (->). En efecto, para dos sistemas cualesquiera,

$$CoC_2 = CoC_1 / q$$

donde  $q$  es el factor de recorte, es decir, la razón de las diagonales de ambos formatos ( $q = d_1/d_2$ ). Por tanto, el APS ( $q = 1,5$ ) tendría un círculo de confusión de 0,020 milímetros de diámetro ( $=0,030/1,5$ ) y el 4/3 ( $q = 2$ ) uno de 0,015 milímetros ( $=0,030/2$ ). Obsérvese que, si queremos evitar una pérdida de nitidez general en una impresión 8x10 (ó 8x12), los objetivos para el formato APS sólo podrán cerrar el diafragma hasta  $f/16$  y los objetivos para el formato 4/3 hasta  $f/11$ , aunque siempre es posible imprimir a menor tamaño (->).

Pero una cosa son los objetivos sólo limitados por la difracción y otra muy distinta los objetivos reales con los que trabajamos normalmente. A título de ejemplo, mostramos una tabla de resoluciones para una colección de objetivos de 50mm para formato de 35mm actualmente comercializados, medidas por Erwin Puts (->) en condiciones de laboratorio ("Reflections on current optical design trends", 05/06/06). La tabla presenta los niveles de contraste (en términos porcentuales) en el centro de la imagen para un amplio rango de resoluciones (en pares por milímetro) a una abertura de  $f/5,6$  y enfocando a infinito. Los objetivos son el Zeiss Planar  $f/1,4$  ZF (->), Zeiss Planar  $f/2$  ZM (->), Voigtländer Nokton  $f/1,5$  (->), Leica Summilux-M  $f/1,4$  ASPH (->) y Leica Summicron-M  $f/2$  (->). Todos tienen monturas M para cámaras telemétricas de Leica, excepto el Zeiss ZF, que es un objetivo para cámaras réflex con montura F de Nikon. Todos son diseños ópticos muy recientes, excepto el Leica Summicron, que es de 1979. El Summilux de Leica tiene un diseño un tanto especial, por separarse del clásico Doble-Gauss simétrico, incorporando una lente a esférica

y un elemento flotante compuesto por dos lentes para garantizar una calidad uniforme incluso enfocando a distancias cortas.

Objetivos:	Zeiss Planar ZF f/1,4	Zeiss Planar ZM f/2	Voigtländer Nokton f/1,5	Leica Summilux M f/1,4 ASPH	Leica Summicron M f/2
lp/mm	%	%	%	%	%
4	96	96	96	96	96
8	95	95	94	95	95
10	94	94	94	95	94
16	94	94	92	93	93
20	90	90	88	90	90
40	78	78	80	80	78
80	60	58	62	60	58
160	35	30	35	35	35

Como puede verse, incluso para una resolución de 160 pares por milímetro, estos objetivos ofrecen altos niveles de contraste en el centro de la imagen. La tabla, aun en condiciones de laboratorio, nos da una imagen más realista de la capacidad resolutive real de los objetivos.

Recordemos que en el cálculo teórico dábamos una resolución máxima para una abertura f/5,6 de 268 pares por milímetro, si bien esa cifra asumía la total ausencia de aberraciones y niveles de contraste más bajos que un 30-35%. Se supone que a una abertura intermedia como f/5,6 se consiguen los mayores niveles de resolución y contraste para este tipo de objetivos, aunque, dependiendo del objetivo, también podría alcanzarse con una abertura un poco mayor (f/4) o un poco menor (f/8).

Como vimos, muchas de las aberraciones se multiplican con el ángulo visual, por lo que las mayores resoluciones se alcanzan con teleobjetivos, y no con objetivos normales como los incluidos en la tabla. El peor problema de los teles son las aberraciones cromáticas, –que se corrigen mediante una combinación de vidrios adecuada– pero, por lo demás, es más fácil para ellos acercarse a los valores de resolución condicionados sólo por la difracción.

Una cuestión interesante es si el medio digital requiere de diseños ópticos especialmente adaptados a él. La verdad es que, dejando a un lado el tema de la reflectancia de los sensores, y el del ángulo de incidencia de la luz en los bordes, el tema está aún por clarificar. Ningún objetivo puede corregir totalmente todas las aberraciones a todas las aberturas, dadas las restricciones de coste, escala de producción y tamaño de cada producto. Los diseñadores ópticos tienen sus propias recetas para estas aberraciones residuales. Hay diseños mejores y peores, o para objetivos más caros y más asequibles, pero también hay criterios distintos ¿Afecta el medio digital a estos criterios? En principio podría ser que sí, por dos motivos. Primero, porque el tratamiento ex-post mediante software de la imagen podría permitir corregir parcialmente los efectos de determinadas aberraciones (distorsión) o defectos (como el viñeteo), lo que daría al diseñador más grados de libertad para actuar. Segundo, porque los efectos de las aberraciones podrían ser distintos en el medio digital (pensemos en las aberraciones cromáticas o en la aberración esférica y el desplazamiento del enfoque). Si ha habido o no un impacto real de la nueva tecnología de captura en el diseño de objetivos es una pregunta que espera todavía respuesta.

## 1.2. El sensor.

El siguiente elemento que hay que considerar es la capacidad resolutive de la película o sensor. Al hablar de sensores utilizaremos como conceptos sinónimos o estrechamente relacionados los términos 'densidad de píxeles', 'frecuencia espacial', 'límite Nyquist', 'frecuencia Nyquist', 'frecuencia de muestreo' o 'capacidad resolutive máxima o teórica'.

Cada tipo de película tiene sus valores resolutivos, dependiendo de si hacemos la medición para un motivo ideal con alto contraste (1000:1) o para un motivo con un contraste medio (1,6:1), más realista. La capacidad resolutive es superior para un motivo de alto contraste, pero éstos sólo se encuentran en pruebas de laboratorio (cartas de resolución). También es superior, en general, para película en blanco y negro a igual sensibilidad. En película de color de alta resolución (una *Fuji Velvia*, por ejemplo) podemos esperar una capacidad resolutive máxima de unos 80 pares para un motivo de alto contraste, mientras que en película de blanco y negro (una *Kodak Technical Pan*, *Agfa APX25* o *Ilford Delta 100*) podrían registrarse resoluciones superiores a 100 pares por milímetro.

Veamos ahora las frecuencias de muestreo o capacidades resolutivas máximas teóricas de algunos sensores actuales (medidas en pares por milímetro). Según los cálculos de Bob Atkins (->), redondeando, el sensor de la [Canon 10D](#) podría resolver como máximo casi 70 pares de líneas por milímetro (fotocélulas de 7,7 micras de lado, ->) y la [Canon 20D](#) (o la [30D](#)) casi 80 pares (fotocélulas de 6,4 micras de lado, ->). La nueva [Canon 40D](#), con su sensor de 10 millones de píxeles, tiene una frecuencia de muestreo de 88 pares de píxeles (celdillas de 5,7 micras de lado). Estos números son fáciles de comprobar. El sensor de esas dos cámaras es de 15,1x22,7mm, y el tamaño de la imagen en la 10D es 2048x3072 píxeles, de manera que la máxima resolución (límite Nyquist) es 2048/15,1 = 135,63 píxeles por milímetro = 67,8 pares de línea o ciclos por milímetro. Obsérvese que la frecuencia de muestreo se mide en muestreos por milímetro o píxeles por milímetro, y la frecuencia de la señal se mide en pares de líneas por milímetro.

Hay una fórmula que permite el cálculo directo de la resolución máxima teórica (o *límite Nyquist* en pares de líneas por milímetro,  $R_y$ ) a partir del dato del espaciado entre 'píxeles', medido en milímetros (variable  $p$ ). Tenemos entonces que

$$R_y = 1/(2p)$$

La fórmula se puede emplear con la Canon 30D, para confirmar el dato de Atkins, o para calcular la capacidad resolutive de otras cámaras. En efecto, las 6,4 micras de espaciado de los 'píxeles' de esta cámara son 0,0064 milímetros, para los que la fórmula da unos 78 pares de líneas por milímetro de resolución máxima posible (*límite Nyquist*).

La [Canon EOS-1Ds Mark II](#), con un sensor 24x36mm, tiene 70 pares de líneas por milímetro de resolución máxima teórica o límite Nyquist (140 píxeles por milímetro de frecuencia de muestreo). La [Canon 5D](#), también con un sensor de formato 35mm sin recorte, tiene una cifra relativamente baja, de unos 60 pares (8,2 micras, muy similar al tamaño de "píxel" de la Nikon D3). La [Canon EOS-1Ds Mark III](#), con sus casi 22 millones de píxeles (de 6,4 micras de lado), puede resolver como máximo 78 pares de líneas por milímetro. En cambio, la Nikon [D300](#) (5,3 micras de espaciado entre píxeles, 13,1 millones de píxeles totales en un sensor 23,6x15,8 mm) o la Canon 450D (5,1 micras de espaciado) tienen nada menos que 93 y 97 pares por milímetro de resolución máxima teórica (límite Nyquist) respectivamente, cifra sólo ligeramente superada por la Pentax [K20D](#) (4,9 micras, 15,1 millones de píxeles totales) y las Olympus [E-410](#), E-510 y E-3 (4,7 micras), que superan ligeramente los 100 pares por milímetro.

Como vemos, los sensores tienen capacidades resolutivas máximas inferiores a la película en blanco y negro de alta resolución y baja sensibilidad, pero similar a la película en color. Los sensores digitales tienen además la ventaja de no ver muy degradada su capacidad resolutiva cuando se aumenta la sensibilidad equivalente ISO (sobre este concepto, [->](#)).

En cuanto a las MTF de los sensores electrónicos, estas funciones pueden ser aproximadas matemáticamente mediante una expresión como esta ([->](#)):

$$MTF(r) = |\text{sinc}(r/R_y)|^n$$

Donde  $r$  es la frecuencia para la que se mide el nivel de contraste en pares por milímetro,  $R_y$  es el límite Nyquist en *pares* de líneas o ciclos por milímetro,  $\text{sinc}(x)$  es una función que adopta valor 1 para  $x = 0$  y un valor  $\sin(\pi x)/(\pi x)$  en otro caso ([->](#)) y  $n$  puede adoptar distintos valores para una mejor aproximación, siendo  $n = 3$  adecuada para sensores tipo Bayer con filtro de paso bajo,  $n = 2$  para sensores Bayer sin filtro de paso bajo y  $n = 1,5$  para sensores como el Foveon ([->](#)) (un número  $n$  menor implica mayores niveles de contraste para cada resolución  $r$ ).

Dado que  $R_y = 1/(2p)$  podemos decir que  $p = 1/(2R_y)$ , es decir, cuanto mayor es el tamaño (o mejor, *espaciado*) de cada 'píxel' ( $p$ ) mayor será también el argumento  $x$  de la función *sinc* para cada frecuencia ( $r$ ). En efecto,  $x$  es una *proporción* que se mueve entre 0 y 1, de manera que cuando  $x$  es 0 el contraste es máximo y cuando  $x$  es 1 el contraste se reduce a un mínimo. Nos interesa conocer el nivel de contraste para determinado nivel de resolución ( $r$ ) de dos sensores de igual tamaño pero con frecuencias de muestreo distintas (y por tanto, tamaños de 'píxel' distintos). Para ello deberemos comparar las MTF para proporciones  $x$  distintas, de forma que el nivel de contraste del sensor con mayor tamaño de píxel será medido para un valor de  $x$  superior (el denominador del argumento de la función *sinc* es más pequeño), y eso supone necesariamente un nivel de contraste menor para un mismo valor de  $r$ .

En definitiva, *sensores de píxeles más pequeños tienen MTF algo más elevadas, y por tanto proporcionarían el mismo detalle con mayores niveles de contraste*. Obviamente, hay muchos más factores que afectan la MTF del sensor, como son la presencia (o no) de un filtro de paso bajo y sus características, la eficiencia cuántica para cada longitud de onda ([->](#)), la proporción que representa la superficie realmente sensible del sensor (para un estado de la tecnología dado será menor cuantos más 'píxeles', pues la circuitería que cubre parte de la misma aumenta también), el mosaico Bayer, las microlentes, etcétera. Es muy difícil conseguir datos de las MTF de los sensores, pues los fabricantes no las publican (a diferencia de las películas, para las que hay información abundante, [->](#)), por lo que hay que recurrir a estimaciones independientes. En general, podemos decir que los sensores proporcionan un nivel de contraste de entre el 30 y el 50 por ciento para la máxima frecuencia de señal ([->](#)).

### 1.3. Resolución del sistema.

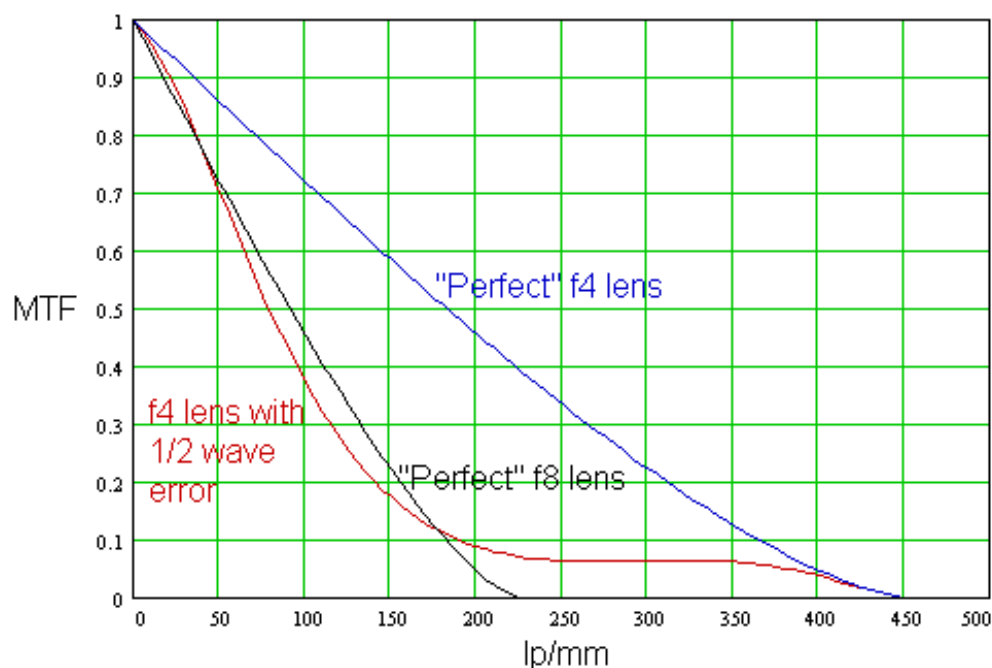
Vamos a combinar ahora los dos elementos que acabamos de estudiar en detalle, objetivo y sensor (o película). En la siguiente tabla hemos calculado las resoluciones *máximas* de un sistema (R) para distintas combinaciones de capacidad resolutive máxima en el objetivo ( $r_1$ ) y película o sensor ( $r_2$ ) para un motivo de alto contraste, empleando la conocida fórmula  $R = 1 / (1/r_1 + 1/r_2)$ , que proporciona una aceptable aproximación empírica. Por máximo entendemos “con el contraste suficiente para ser discernible”, que depende del motivo fotografiado (con una carta de resoluciones, un contraste mínimo bajo es aceptable). Mostramos capacidades resolutive *máximas* poco realistas para los objetivos porque son ilustrativas de la relativa importancia de uno de los elementos del sistema por separado.

Ip/mm Resolución del objetivo (lp/mm)	Resolución de la película/sensor (lp/mm)													
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
100	17	23	29	<b>33</b>	<b>38</b>	<b>41</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>50</b>	52	55	57	58	60
200	18	26	33	<b>40</b>	<b>46</b>	<b>52</b>	<b>57</b>	<b>62</b>	<b>67</b>	71	75	79	82	86
300	19	27	35	<b>43</b>	<b>50</b>	<b>57</b>	<b>63</b>	<b>69</b>	<b>75</b>	80	86	91	95	100
400	19	28	36	<b>44</b>	<b>52</b>	<b>60</b>	<b>67</b>	<b>73</b>	<b>80</b>	86	92	98	104	109
500	19	28	37	<b>45</b>	<b>54</b>	<b>61</b>	<b>69</b>	<b>76</b>	<b>83</b>	90	97	103	109	115
600	19	29	38	46	55	63	71	78	86	93	100	107	114	120
700	19	29	38	47	55	64	72	80	88	95	102	110	117	124
800	20	29	38	47	56	64	73	81	89	97	104	112	119	126
900	20	29	38	47	56	65	73	82	90	98	106	114	121	129
1000	20	29	38	48	57	65	74	83	91	99	107	115	123	130

La capacidad resolutive máxima combinada de objetivo y película química ha sido ampliamente analizada, y se sabe que con bastante esfuerzo alcanzará los 100/120 pares por milímetro *en el negativo* (->). Es más razonable esperar resoluciones máximas de entre 80 y 90 pares en el negativo, y empleando película para blanco y negro de alta resolución y en condiciones muy controladas, lo que está dentro de los valores que predice la tabla. En el caso de los sensores esas cifras pueden ser algo más bajas para el blanco y negro, pero superiores si se compara con película de color. Hablamos siempre de detalle a un nivel de contraste que lo hace justamente perceptible.

Sin embargo, cuando fotografiamos a pulso, el motivo se mueve, enfocamos con rapidez o empleamos película más sensible (grano más grueso), la resolución máxima que podemos esperar cae rápidamente, situándose entre los 20 y los 40 pares por milímetro en el mejor de los casos. *Al ampliar el negativo químico a través de un objetivo para obtener una copia en papel se producen pérdidas de resolución y contraste adicionales*, cosa que no ocurre si imprimimos a partir de un archivo digital. Si disponemos de 20 pares por milímetro en el negativo o sensor de 35mm, lo más que podremos obtener en un A4 son poco más de 2 pares por milímetro. Pero con 40 pares por milímetro en el negativo podemos alcanzar los 5 pares en el papel (->), detalle que se acerca al límite de lo que podemos discernir, por lo que 40 pares por milímetro se ha considerado siempre la cifra máxima realmente relevante para impresiones moderadas (volveremos a esta cifra más adelante). Por tanto, *más importante que la resolución máxima alcanzable (a un nivel de contraste meramente suficiente) es el contraste al que el sistema ofrece esos 40 pares y las resoluciones inferiores.*

Así pues, la resolución a la que la función de transferencia alcanza un valor mínimo de contraste tiene una importancia secundaria, académica si se quiere, en la mayor parte de los casos (->). En la práctica, lo importante es el perfil de la curva hasta el nivel de resolución relevante (->). Hemos representado en un gráfico dos curvas que podrían corresponder a dos objetivos de calidades distintas para una misma abertura, más otra que representa la función para otro valor de la misma. Imaginemos que la frecuencia de muestreo del sensor es de 200 píxeles por milímetro (también muestreos por milímetro). En ese caso se podrán resolver hasta 100 lp/mm fielmente (como máximo). El límite resolutivo del objetivo puede ser muy superior al del sensor (para un nivel de contraste del 0 por ciento), pero la diferencia de detalles percibida en la imagen vendrá determinada por la altura de la curva (aberraciones, difracción) para las resoluciones comprendidas en un rango relevante. Éste estaría acotado por la capacidad resolutiva del sensor, pero dependería en última instancia de motivo, formato, tamaño de impresión y distancia de observación, entre otras cosas.



Curvas MTF y resolución máxima de los objetivos ([Bob Atkins©](#)).

Pueden darse determinadas condiciones en las que la resolución máxima alcanzable por un sistema, para un nivel de contraste mínimo aceptable, sea importante para una fotografía, pero no es el caso general. La resolución límite o máxima de un objetivo determina, junto con la del sensor, la del sistema, pero esta no está correlacionada en general con una impresión de más calidad en la imagen. Volveremos a este punto cuando hablemos de la impresión de la imagen digital (Sección 5).

Un aspecto en el que la resolución máxima de un objetivo y un sensor sí tiene cierta relevancia es el de la *eficiencia* de la imagen digital como contenedor de información determinada por la resolución y el contraste.

%	Resolución de la película/sensor (lp/mm)													
Resolución del objetivo (lp/mm)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
100	83	77	71	<b>67</b>	<b>63</b>	<b>59</b>	<b>56</b>	<b>53</b>	<b>50</b>	48	45	43	42	40
200	91	87	83	<b>80</b>	<b>77</b>	<b>74</b>	<b>71</b>	<b>69</b>	<b>67</b>	65	63	61	59	57
300	94	91	88	<b>86</b>	<b>83</b>	<b>81</b>	<b>79</b>	<b>77</b>	<b>75</b>	73	71	70	68	67
400	95	93	91	<b>89</b>	<b>87</b>	<b>85</b>	<b>83</b>	<b>82</b>	<b>80</b>	78	77	75	74	73
500	96	94	93	<b>91</b>	<b>89</b>	<b>88</b>	<b>86</b>	<b>85</b>	<b>83</b>	82	81	79	78	77
600	97	95	94	92	91	90	88	87	86	85	83	82	81	80
700	97	96	95	93	92	91	90	89	88	86	85	84	83	82
800	98	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84
900	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	87	86
1000	98	97	96	95	94	93	93	92	91	90	89	88	88	87

Resulta interesante considerar además el porcentaje de la capacidad resolutive del sensor o película que es aprovechada realmente por el sistema fotográfico. El cálculo es muy sencillo, pues sólo hay que dividir el valor de cada celda en la tabla precedente por el límite de la capacidad resolutive del medio de captura, que consta en la cabecera de cada columna.

La idea es que para poder conseguir mayores resoluciones máximas del sistema y reproducir correctamente una mayor parte de la señal transmitida por los objetivos, hay que incrementar la capacidad resolutive del sensor o de la película, *pero aceptando un menor aprovechamiento de la misma*. Esto tiene implicaciones para el medio digital porque la capacidad resolutive del sensor, dadas unas dimensiones físicas, determina el tamaño de la foto (en número de píxeles y en megabytes). Es obvio que hay una parte de la matriz de píxeles que forma la fotografía digital que *no* contiene información relevante en términos de detalle, problema de ineficiencia que se agrava cuanto mayor es la capacidad resolutive de los sensores (retomaremos esta idea más adelante).

Un factor que limita seriamente la resolución máxima alcanzable por un sistema fotográfico compuesto por objetivo y medio de captura es la *vibración* del mismo durante la captura. La tabla que presentamos procede de Williams (1990, p. 191), y está calculada para dos sistemas con resoluciones máximas de 40 y 100 pares por milímetro. Se asume un desplazamiento de 200 micras durante una décima de segundo (típico del pulso), y a partir de ahí se calcula la ganancia en resolución con una reducción del tiempo de exposición. Como se puede ver, cuanto mejor sea el sistema fotográfico más cortas tendrán que ser las obturaciones para evitar una degradación del potencial resolutive. A 1/250 de segundo el sistema de 40 pares sólo pierde un 5 por ciento, pero el sistema de 100 pares pierde un 22 por ciento.



1/10	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250	1/500	1/1000	Max. R.
5	7	15	25	34	38	39.5	39.9	40
5	7	16	30	53	78	93	98	100

Si bien el desplazamiento o componente dispersivo (->) creado por el movimiento depende, entre otras cosas, de la magnificación del objetivo, y por tanto de la distancia focal, la tabla es capaz de mostrarnos con un sencillo ejemplo que muchas de las reglas intuitivas que empleamos para conjurar la pérdida de detalle debida al movimiento (del sistema o del sujeto) son incorrectas.

Como hemos visto, para aprovechar más a fondo la capacidad resolutive de los sensores, los objetivos deben superarla ampliamente, lo que conduce a *problemas de exceso de señal*, que son otro factor limitante importante de la capacidad resolutive real de un sistema fotográfico. Estamos hablando del fenómeno del *aliasing*, que tratamos en la siguiente sección.

## 2. Los problemas de *aliasing*.

Las cifras de capacidad resolutive que acabamos de ver son optimistas. La culpa la tiene el *aliasing*, que es el error que se produce cuando se trata de adivinar unos detalles de forma o color a partir de una información demasiado escasa. No es más que un simple error de estimación. Pero, ¿por qué las cámaras digitales tienen que estimar?

Los sensores tienen una gruesa capa de filtros y cristales protectores. Uno de esos filtros provoca por sí mismo un problema de *aliasing*, y es el filtro-mosaico Bayer (->), que permite la fotografía digital en color en la mayor parte de las cámaras actuales. Cada fotocélula tiene sobre sí un cristal de un color primario (verde, rojo o azul) que sólo le permite registrar información sobre intensidad luminosa para ese color. Después la cámara compone la imagen final en función no sólo de la información registrada en cada punto, sino de los colores de los puntos de alrededor. La cámara *estima* los colores definitivos mediante complejos algoritmos (->), lo que puede conducir a problemas de *moiré cromático* (->), que es el efecto que en la fotografía tiene el problema de *aliasing* derivado de la estimación de los colores. Esta interpolación que completa la información que falta no es necesaria en un sensor multicapa como el Foveon (->) (o en sensores monocromo, como el de la [Kodak DCS-760M](#), sin filtro de color alguno), lo que explica que los sensores multicapa no presenten el mencionado problema de *moiré cromático* (aunque tienen otros puntos débiles, ->).

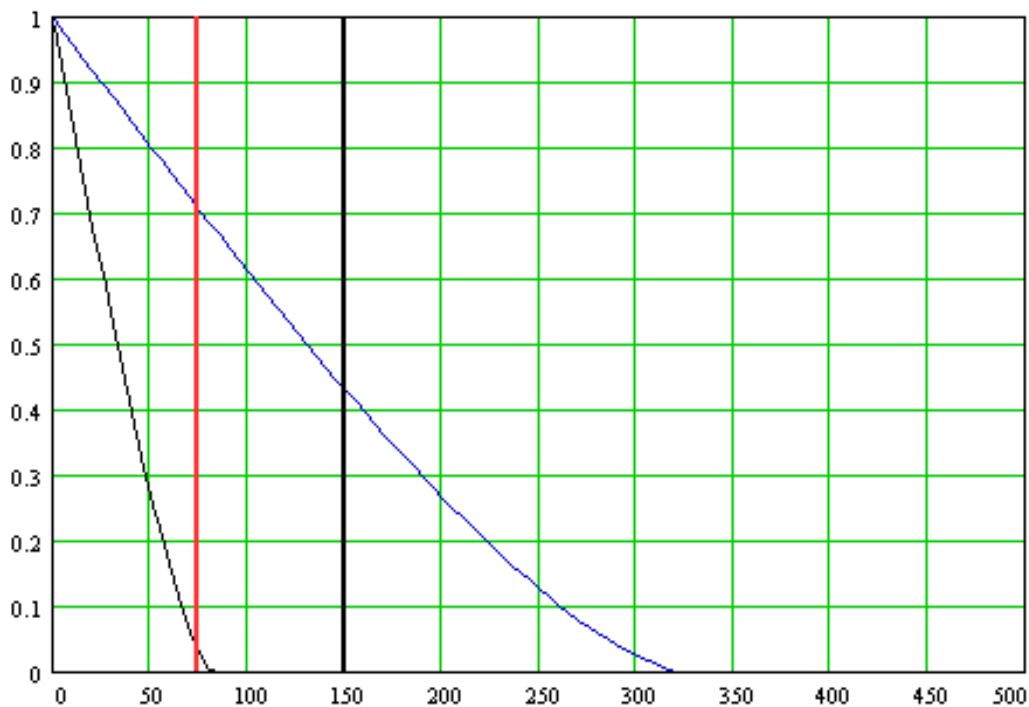
Pero hay más filtros, como el llamado de “paso bajo” o anti-alias, que trata de evitar la aparición de otro problema de *aliasing*, esta vez bajo la forma de una estructura falsa, irreal, que puede presentarse en la imagen en forma de *moiré cromático* o no cromático (->). Esta vez el problema se debe a que la frecuencia de la señal (transmitida por el objetivo) supera a la frecuencia de muestreo. Ahora veremos por qué.

Según el *teorema de Nyquist-Shannon* (->), que se aplica a señales *continuas* y *limitadas en banda*, necesitaremos una frecuencia de muestreo que más que duplique la frecuencia máxima en la señal para reproducir ésta correctamente. Esto no se puede aplicar directamente a señales de naturaleza discreta, como la que transmite el objetivo al fotografiar cartas de resolución compuestas por pares de líneas. En cualquier caso, los motivos fotográficos normales no son así.

Sin embargo, podemos adaptar intuitivamente la lógica del teorema al caso discreto. Éste habla de la necesidad de que la frecuencia de muestreo duplique la frecuencia de la señal, medida la primera en muestreos por milímetro (o por unidad de tiempo en otros casos) y la segunda en ciclos por milímetro. En imagen digital el muestreo viene dado por los píxeles, y los ciclos son equiparables a pares de líneas (dejémoslo ahí). Por tanto, la receta es de dos muestreos por cada ciclo, es decir, dos píxeles por cada par de líneas, como mínimo. Pero esto es sólo cierto si las líneas (señal) están perfectamente alineadas con el dispositivo receptor (el sensor). En otro caso serán necesarios más de dos píxeles (normalmente basta con 3 en sensores monocromáticos, pero pueden ser muchos más de tres con señales discretas  $\rightarrow$ ). En resumen, al menos un píxel por línea (sea blanca o negra).

Así pues, el llamado *límite Nyquist* se define como *la máxima frecuencia de una señal que puede ser reproducida con una determinada frecuencia de muestreo ( $\rightarrow$ )*, es decir, lo que podremos reproducir en el mejor de los casos con esa frecuencia de muestreo. Este máximo teórico posible es de un par de líneas por cada 2 píxeles. Si la frecuencia de la señal supera el *límite Nyquist* el *aliasing* aparecerá.

El siguiente gráfico representa ahora dos curvas MTF para un mismo objetivo de formato 35mm a distintas aberturas. En el eje de ordenadas (vertical) tenemos el nivel de contraste, medido de cero a uno. En el eje de abscisas (horizontal) tenemos la resolución, es decir, el número de pares de líneas por milímetro para el que se da cada nivel de contraste. La curva negra es la MTF a una apertura de  $f/22$ , mientras que la curva azul representa la MTF a  $f/5,6$ . Imaginemos un sensor con una resolución o frecuencia de muestreo de 150 píxeles por milímetro. El límite Nyquist asociado es de 75 pares de líneas. El área bajo cada curva a la *izquierda* de la línea roja, que representa el límite Nyquist, es determinante para la percepción de calidad en la foto. El área situada bajo la curva MTF y a la *derecha* del límite Nyquist (exceso de señal no reproducible con fidelidad) *perjudica* la calidad de la imagen final, debido al *aliasing*. Pero el límite Nyquist es el mejor de los casos posibles (es la frecuencia máxima de señal reproducible para una frecuencia de muestreo dada). Puede ser necesaria una frecuencia de muestreo superior para reproducir una señal determinada. Por ejemplo, para reproducir los 75 pares de líneas del ejemplo podríamos vernos obligados a emplear una frecuencia de muestreo no de 150 píxeles por milímetro, sino de más. Hemos trazado una línea para un hipotético sensor de 300 píxeles por milímetro (150 pares de píxeles, si se quiere). Esa nueva frecuencia lleva asociado un nuevo límite Nyquist de 150 pares de líneas o ciclos por milímetro, pero garantiza al menos que se resuelven bien 75 pares de líneas. No es más que un ejemplo, y la magnitud del "sobremuestreo" necesario dependerá del motivo.



Curvas MTF ([Bob Atkins](#)©).

Para solucionar el problema del *aliasing* por exceso de señal tenemos dos opciones: elevar sustancialmente la frecuencia de muestreo o bien alterar la señal mediante un filtro de paso bajo. En realidad se aplica una combinación de ambas, mediante el uso de filtros que actúan sobre la señal y una frecuencia de muestreo lo más alta posible que reduzca la señal sobrante. Ninguna de las dos vías es capaz de dar hoy día una solución completa al problema por sí misma.

Pero la frecuencia de la señal es demasiado alta en los objetivos de 35mm para conseguir que la frecuencia de muestreo de margen suficiente en todos los casos posibles, lo que además no tendría mucho sentido, *pues para poder captar detalle fino con bajo contraste estaríamos empleando una elevadísima capacidad resolutive en el sensor, que tiene sus costes* (tamaño de la imagen). El nivel óptimo está en algún punto suficientemente alto como para que los excesos de señal ocasionales no supongan un problema serio.

La alternativa del filtro tampoco está exenta de limitaciones. Lo ideal sería disponer de uno que redujera a cero todo el exceso de señal por encima de la capacidad máxima de muestreo del sensor sin alterar el resto de la señal, es decir, truncar la curva MTF a la altura de la frecuencia de muestreo, pero en la práctica los filtros ópticos no son tan eficientes. Hay que elegir entre eliminar una mayor parte del exceso de frecuencia, aun a riesgo de afectar demasiado a la señal que el sensor sí puede captar correctamente, o hacer un tratamiento menos agresivo que no elimine todo el exceso ni evite las consecuencias del *aliasing* en todos los casos. El problema de los filtros es que afectan a la imagen incluso cuando no son necesarios (señal de baja frecuencia), pues no se pueden desactivar. El efecto es una pérdida de resolución efectiva. Puede optarse sin embargo por no añadir un filtro al sensor, pero podría ocurrir lo contrario: cuando las circunstancias lo hagan necesario el exceso de señal puede afectar a la imagen representada, y nada habrá ahí para atenuar el efecto. Pueden verse las consecuencias en la [Kodak DCS Pro SLR/c](#) de casi 14 millones de 'píxeles' (también es el caso del [módulo digital R](#) de Leica, con sensor Kodak).

### 3. La resolución *real* o *efectiva* de una cámara digital. Algunos ejemplos.

Hemos visto que la resolución máxima de un sistema depende de la capacidad resolutoria de cada uno de sus componentes. En el medio digital, además, la capacidad resolutoria del sensor está condicionada por el fenómeno del *aliasing*. Con estas tres variables ya podemos explicar con relativa precisión el rendimiento de una cámara digital.

Veremos a continuación algunos ejemplos concretos de resolución efectiva de cámaras digitales reales. Ese dato dependerá en parte de la capacidad resolutoria del objetivo bajo las condiciones de la toma, de las propiedades del sensor y de los algoritmos de elaboración de la imagen (véase este documento del Dr. Karl Lenhardt, [->](#)).

En las comparativas casi nunca se ofrece información detallada sobre el objetivo que ha participado en la prueba, y se induce a pensar que el resultado de la medición corresponde a la cámara en sí, e incluso se hacen comparaciones entre cámaras distintas sin considerar que los objetivos suelen ser también muy distintos. Por si fuera poco, suelen compararse imágenes procesadas con programas informáticos diferentes. A pesar de todo ello, es conveniente ilustrar el análisis de las secciones precedentes con algunos ejemplos.

Partamos de los datos de una cuestionable comparación ([->](#), [->](#)) entre la Nikon D2X, la Canon 1Ds Mark II y la Kodak DCS Pro SLR/c. Para ver cómo se han hecho los cálculos véanse [estas](#) instrucciones. La resolución efectiva de la Nikon D2X, equipada con el objetivo Nikkor 50mm f/1,8 (a f/8), es de 3600 líneas verticales y 2000 líneas horizontales, una fracción de la capacidad resolutoria teórica del sensor, que es de 4288 líneas verticales y 2848 horizontales. La Canon 1Ds-Mark II, por su parte, equipada con el Canon EF 24-70 mm f/2,8 L (50mm, f/9), resuelve 4200 líneas verticales y 2400 horizontales, cuando la capacidad máxima teórica del sensor es de 4992 verticales y 3328 horizontales. Por su parte, la Kodak DCS Pro SLR/c, con el Canon EF 50mm f/1,4 (a f/11, suponemos), sin filtro anti-alias, tiene una capacidad resolutoria *real* intermedia (3600 líneas verticales y 2200 líneas horizontales). Debería haberse tenido en cuenta que una misma abertura tiene un impacto distinto en cuanto a profundidad de campo y nitidez si el formato es diferente.

En la Nikon D2X se pasa de unos 180 píxeles por milímetro de frecuencia de muestreo (límite Nyquist de 90 lp/mm) a 76 pares por milímetro verticales y 64 pares horizontales de resolución real, una vez considerado el objetivo y el proceso final de la imagen. La Canon 1Ds-Mark II pasa de 70 pares por milímetro de capacidad resolutoria teórica máxima en el sensor a 58 verticales y 50 horizontales reales. El sensor de la cámara Kodak es el que tiene una frecuencia de muestreo más bajo de las tres, de poco más de 60 pares por milímetro, si bien la resolución real es de 46 pares horizontales y 50 verticales. Esto es suficiente para tener una idea aproximada de la diferencia, en la práctica, entre capacidad resolutoria de un sensor y resolución final de un sistema.

Como vemos, la tabla que cruza resoluciones del objetivo y el sensor (o película) predice unas resoluciones máximas razonables para los sistemas basados en el formato de 35mm que, como vemos, se ajustan bastante a la realidad. En cuanto al objetivo, todo dependerá del nivel de contraste que consideremos, es decir, hasta qué punto aceptamos que un conjunto de pares de líneas están resueltas con suficiente nitidez. Hemos visto cómo algunos objetivos de 50mm, para una abertura intermedia y enfocados a infinito, resuelven sobradamente 160 pares por milímetro. Si redondeamos a 200 pares y consideramos un sensor con una frecuencia de muestreo de 160 ó 180 píxeles por milímetro, tendremos una resolución máxima prevista de unos 60 pares, que puede resultar algo afectada por los

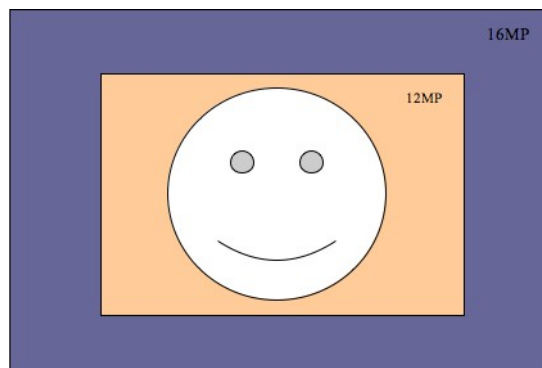
filtros de paso bajo y por la interpolación a partir del mosaico Bayer. Se pueden conseguir resoluciones efectivas algo mayores, pero 60-70 pares parece ser un límite empírico para los sistemas digitales de 35mm o APS-C actuales, bajo condiciones controladas. Dicha capacidad resolutive es suficiente para reproducir visiblemente 5 pares por milímetro en una impresión 8x12 ( $\approx$ A4) desde cualquiera de los dos tipos de sensores. Ampliando el “fotograma” 8 veces necesitaremos resolver 40 pares por milímetro para agotar la capacidad de representar detalle discernible de una impresión A4 ( $8 \times 5 = 40$ ). El formato APS necesitaría un factor de ampliación de 12 ( $= 8 \times 1,5$ ) y ello lleva a unos requerimientos de resolución real en el sensor de 60 pares ( $= 12 \times 5$ ).

Es recomendable leer también estos dos ([1](#), [2](#)) análisis de Erwin Puts, que muestran ejemplos de resolución efectiva de distintos sensores.

*En definitiva, el aliasing, por exceso de señal o interpolación de la información básica de colores y otros factores, no permiten hablar sin más de resolución efectiva de una cámara como la resolución de un sistema compuesto por un sensor y un objetivo. No obstante, a cambio, la imagen captada por un negativo fotoquímico puede sufrir cierta degradación al proyectarse a través del objetivo de la ampliadora. En el medio digital esa transmisión a papel se produce sin pérdidas. Volveremos al tema de la impresión más adelante.*

#### 4. Para conseguir más detalle, ¿más ‘píxeles’ o más densidad de ‘píxeles’?

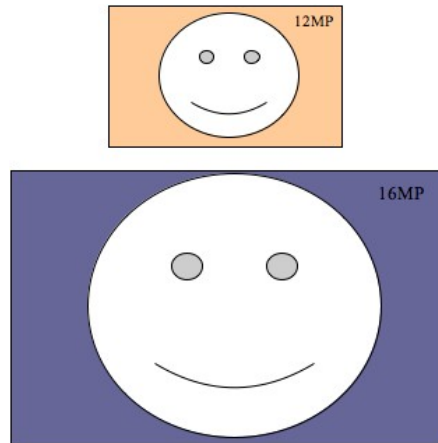
Hay cierta discusión acerca de si da más cantidad de detalle un sensor más grande con más fotocélulas o ‘píxeles’ o un sensor más pequeño con menos ‘píxeles’ pero con más densidad. El siguiente dibujo puede ayudar a aclarar la idea:



Supongamos que hacemos un retrato con dos cámaras, una equipada con un sensor sin recorte (formato completo de 35mm) de 16MP y otra con un sensor APS de 12MP. Si tomamos las dos fotos con el mismo objetivo y los mismos parámetros (focal, abertura, distancia del motivo) obtendremos dos fotografías en las que el motivo tendrá idéntico tamaño absoluto reproducido en uno u otro sensor. La diferencia estará en el área de color azul (pues el sensor APS implica un auténtico recorte de la foto).

Es obvio que si la densidad de fotocélulas o ‘píxeles’ es mayor en el sensor APS el motivo – la cara del retratado – tendrá más detalles que en el sensor de formato completo. Lo que ocurre es que un escenario como este es poco verosímil. Lo normal es que el área azul sobre o no sobre. Si no sobra, el fotógrafo que opera con la cámara APS reencuadrará el motivo para rodearlo de un área proporcionalmente igual al área azul, pero dentro del marco APS. En ese caso el motivo tendrá que reducir su tamaño absoluto y, por tanto, la cantidad

de puntos que describan la cara del retratado tendrá que disminuir también. Al contrario, si el área azul no era necesaria, el fotógrafo que usa la cámara de formato 35mm ajustará el encuadre de manera que la cara del retratado ocupe una parte mayor de la foto, y por consiguiente el número total de píxeles que dibujan el motivo será mayor.



Hay dos formas de reencuadrar. La primera consiste en movernos, acercándonos o alejándonos del sujeto, lo que afectará a la perspectiva (->). La segunda consistiría en cambiar la distancia focal del objetivo empleada en una de las dos cámaras, pero sin movernos del sitio, lo que no afectará a la perspectiva. Si optamos por la segunda posibilidad tendremos que emplear un objetivo de menor distancia focal real en la cámara con sensor más pequeño para poder obtener el mismo ángulo visual.

Usando uno u otro procedimiento, imaginemos que la cara del personaje cubre ahora todo el fotograma en ambas cámaras (segundo dibujo). El tamaño relativo (al fotograma o sensor) de la cara del retratado será el mismo. En ese caso la cámara de formato completo describirá esa cara con unos 16 millones de píxeles y la cámara APS con sólo 12 millones, y en principio, una vez considerada la participación del objetivo, veremos más detalle en la foto de la cámara de formato completo. Es más, si fotografiamos sin movernos del sitio y cambiando el objetivo, la mayor distancia focal real de la cámara con el sensor más grande puede suponer una ventaja adicional. Sin embargo, si se requiere una gran profundidad de campo, la cámara con el sensor más grande y el objetivo de mayor focal puede forzarnos a cerrar más el diafragma, lo que podría afectar a la calidad (en un sentido u otro, dependiendo de las circunstancias). Por último, sabemos que la densidad de fotocélulas es una variable clave para determinar la resolución real de una cámara, pues una frecuencia de muestreo superior reduce los problemas de exceso de señal.

En definitiva, en las mediciones de resolución de sistemas digitales pueden emplearse dos tipos distintos de medidas (->, ->, ->), los pares de líneas por milímetro (lp/mm) y el total de líneas horizontales (*line widths per picture height*, lw/ph). La primera medida tiene sentido cuando los sensores son iguales y comparamos objetivos, por ejemplo, pues sólo tiene en cuenta la densidad de píxeles y no el tamaño del sensor. Pero es obvio que un negativo o sensor más grande, aun resolviendo menos detalle *por milímetro*, puede tener mucha más capacidad de captar detalles *en conjunto*. Es este segundo aspecto el que se mide con el total de líneas horizontales (puede hacerse también con las verticales, multiplicando además por la proporción del formato). Se puede pasar de uno a otro sistema de medida de forma sencilla, pues

$$lw/ph = 2 * lp/mm * altura del sensor en mm$$

Otra forma interesante de medir la capacidad resolutive de un sistema, atendiendo especialmente a su eficiencia, es computar los pares de líneas de detalle *por píxel* (lp/p). La foto final es una matriz de píxeles que el sensor, procesador y objetivo “rellenan” con información más o menos abundante, y podemos tener la misma cantidad de información real en una matriz de menor tamaño. Es fácil calcular esta medida a partir de cualquiera de las anteriores, teniendo en cuenta el número de píxeles en una columna del sensor:

$$lp/p = lw/ph / (2 * \text{píxeles en columna}) = (lp/mm * \text{altura en mm}) / \text{píxeles en columna}$$

Sobre todos estos detalles es muy recomendable el excelente análisis de Steve Hoffmann (1, 2 y 3), esta comparativa (4) de la Nikon D2X y la Canon 1Ds Mark II centrada en las diferencias en profundidad de campo, esta excelente explicación técnica (5) de Lars Kjellberg, que analiza por qué un formato menor puede dar más calidad de imagen cuando una gran profundidad de campo es importante, y esta reflexión (6) de Erwin Puts a partir de una comparación de la Canon 5D y la Canon 20D.

## 5. Resolución e impresión.

La ventaja de tratar con formatos como el DIN A4 es que sus proporciones son muy cercanas a las del fotograma clásico, aunque no exactamente iguales. En efecto, un fotograma o sensor típico tiene unas proporciones de 2:3 (=x:y), mientras que un A4 tiene unas proporciones de 2:2,8 (=1:1,4). Ambas se aproximan bastante a la *proporción áurea* ( $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$ ), que es aproximadamente 2:3,2 (=1:1,6). Dado que las correspondencias no son exactas, al emplear un papel de formato A4 tendremos que elegir entre recortar un poco la foto para rellenar todo el papel o bien dejar unos márgenes de papel en blanco, que es lo usual.

Para dar una idea de las necesidades de número de píxeles de distintas impresiones hemos elaborado la siguiente tabla que ofrece las *superficies máximas* que para determinadas densidades de impresión pueden alcanzar distintos tamaños de foto (en número de píxeles), respetando siempre la proporción 2:3 original de la foto.

MP	300 ppp (5,9 lp/mm)				240 ppp (4,7 lp/mm)				180 ppp (3,5 lp/mm)			
	centímetros		pulgadas		centímetros		pulgadas		centímetros		pulgadas	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
2	9,8	14,7	3,8	5,8	12,2	18,3	4,8	7,2	16,3	24,4	6,4	9,6
3	12,0	18,0	4,7	7,1	15,0	22,5	5,9	8,8	20,0	29,9	7,9	11,8
4	13,8	20,7	5,4	8,2	17,3	25,9	6,8	10,2	23,0	34,6	9,1	13,6
5	15,5	23,2	6,1	9,1	19,3	29,0	7,6	11,4	25,8	38,6	10,1	15,2
6	16,9	25,4	6,7	10,0	21,2	31,8	8,3	12,5	28,2	42,3	11,1	16,7
8	19,6	29,3	7,7	11,5	24,4	36,7	9,6	14,4	32,6	48,9	12,8	19,2
10	21,9	32,8	8,6	12,9	27,3	41,0	10,8	16,1	36,4	54,7	14,3	21,5
12	23,9	35,9	9,4	14,1	29,9	44,9	11,8	17,7	39,9	59,9	15,7	23,6
16	27,7	41,5	10,9	16,3	34,6	51,8	13,6	20,4	46,1	69,1	18,1	27,2
22	32,4	48,6	12,8	19,1	40,5	60,8	16,0	23,9	54,0	81,1	21,3	31,9

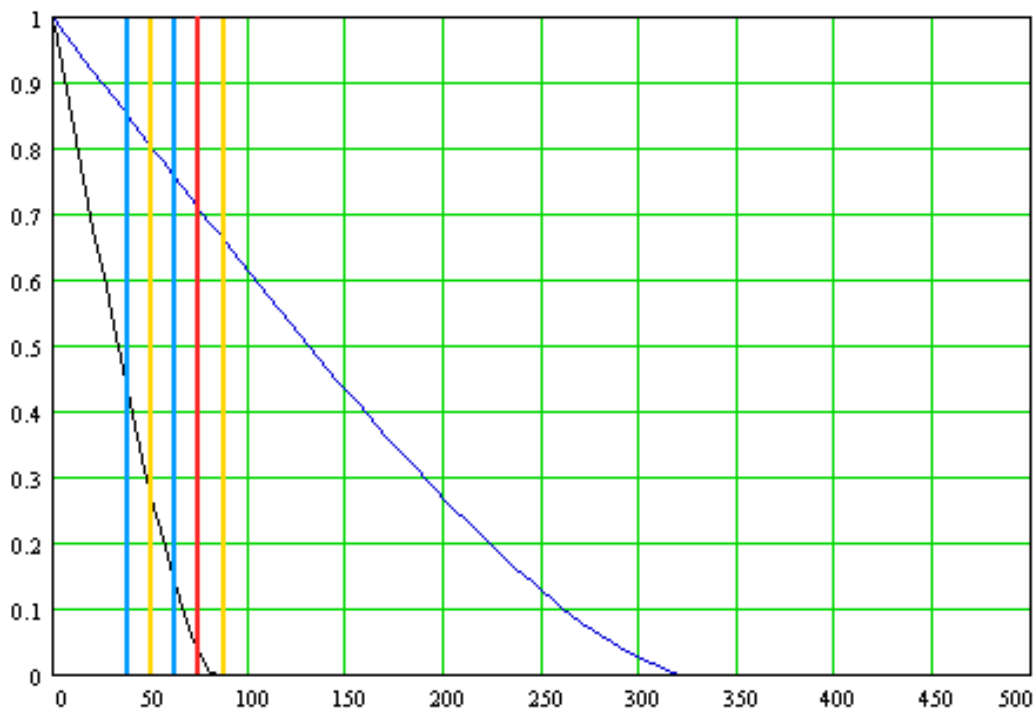
Hemos marcado con negrita el tamaño máximo que cabe en una hoja A4, que tiene unas dimensiones de 21x29,7cm o bien 8,3x11,7 pulgadas. También se ofrecen los límites para un A3, que tiene dimensiones 29,7x42,0cm (11,7x16,5 pulgadas). Se dan las correspondencias en píxeles por pulgada y en pares de píxeles (o líneas) por milímetro.

Si aceptamos 5-6 pares por milímetro como un buen indicador de calidad de imagen a 25 centímetros de observación, para una impresión de proporciones 2:3 que quepa en un A4 no querremos más de 300 píxeles por pulgada, y eso requiere una foto de unos 8 millones de píxeles. Si empleamos papel de tamaño A3 tendremos que ver la foto a más distancia (la diagonal es 1,4 veces mayor que la de un A4), y podremos reducir un poco la resolución, teniendo suficiente con unos 240 píxeles por pulgada (5 pares por milímetro), lo que se logra cómodamente con 10 millones de píxeles. Sin embargo, para algunos trabajos profesionales nos pueden pedir fotos de tamaño A3 a 300 píxeles por pulgada, para lo que necesitaríamos 16 millones de píxeles. Parece por tanto que el rango que va de 10 a 16 millones de píxeles es un *tamaño de foto* confortable para la gran mayoría de aplicaciones (->).

Pero vimos que la resolución *efectiva* (detalle real captado) es inferior a la resolución *teórica* (tamaño de la foto, o de la matriz de píxeles). Si queremos reproducir en el papel 6 pares por milímetro de *detalle real* a un tamaño aproximadamente igual a un A4, necesitaremos *más* de 8 millones de píxeles, para después reducir el tamaño de la foto preservando el detalle real captado en la medida de lo posible. De la misma forma, los requerimientos de 10 y 16 millones de píxeles deberían modificarse al alza. Otro argumento a favor de imágenes de más tamaño es la posibilidad de disponer de un margen para recortes.

Por ejemplo, las Nikon D2X ofrece imágenes de 12 millones de píxeles, más que de sobra para un A4 a 300 píxeles por pulgada, pero su resolución horizontal real está situada en torno a las 2000 líneas, que quedan por debajo de las 2520 que un papel de tamaño A4 impreso a 6 pares por milímetro *puede mostrar*. En cambio, la Canon 1Ds-Mark II no sólo genera imágenes de tamaño suficiente, sino que el detalle real que es capaz de captar excede las posibilidades de mostrar detalle de una impresión A4 a 300 píxeles por pulgada. Por último, la Sigma SD10 resuelve en imágenes de 3,5 millones de píxeles unas 1550 líneas horizontales y 2325 verticales, cifras que no se verán afectadas (->) si *interpolamos* (->) eficientemente para obtener los píxeles que faltan para una impresión A4 a 300 píxeles por pulgada (aunque el papel podría mostrar más detalle). La ventaja del sensor Foveon de la cámara Sigma es que genera imágenes digitales que *almacenan* más detalle real en menos píxeles.





Curvas MTF, requerimientos de impresión, resolución real y frecuencia de muestreo.

En el gráfico que acabamos de presentar mostramos distintas posibilidades que pueden darse en un sensor. La línea amarilla representaría el requerimiento de número de píxeles que una impresión determinada impone al sensor (tamaño de la foto necesario). La línea roja es la frecuencia de muestreo de ese sensor. Las dos líneas azules representan dos posibles resoluciones reales o efectivas. Si la línea amarilla estuviera a la derecha de la roja sería necesario interpolar para obtener la impresión que deseamos. Las líneas azules siempre estarán algo a la izquierda de la línea roja, pero pueden estar a la derecha o a la izquierda de la amarilla. En el primer caso el sensor habrá captado más detalle del que la impresión podrá reproducir (se pueda percibir o no a simple vista). En el segundo caso la impresión tendrá una capacidad de mostrar detalles superior al sensor.

Vimos en la primera sección que la resolución efectiva (línea azul) está ligada a la frecuencia de muestreo (línea roja) y a la capacidad resolutive del objetivo (función de transferencia de contraste, MTF). Lo ideal es situar la línea azul sobre la línea amarilla o a su derecha, para lo cual la línea roja debe estar situada más a la derecha aún. Antes de la impresión puede ajustarse el tamaño de la foto (*downsampling*, que puede presentar nuevos problemas de *aliasing*,  $\rightarrow$ ) montando la línea roja sobre la amarilla (en principio el proceso no debería alterar la posición de la azul). Por tanto,

- Si se cumple que azul < amarilla < roja, tendremos suficientes píxeles para la impresión, pero una cámara con mayor resolución real mostrará más detalle en el papel.
- Si se cumple que amarilla < azul < roja, tendremos suficientes píxeles para la impresión, y ninguna cámara podrá mostrar más detalle en ese tipo de impresión (otra cosa es el contraste, como veremos ahora).

- Si se cumple que  $\text{amarilla} > \text{roja} \geq \text{azul}$ , no tendremos suficientes píxeles para la impresión y será necesario interpolar, y una cámara con mayor resolución real mostrará más detalle.

La calidad de imagen percibida por observación directa del papel impreso depende no de la resolución máxima del sensor, sino del contraste con que el objetivo proporciona los detalles que el sensor puede captar (siempre por debajo de su frecuencia de muestreo, debido al *aliasing*) o que el ojo humano puede percibir.

Eso determina un rango de resoluciones relevantes que el sensor y el objetivo *deben* ofrecer con la mayor calidad (contraste) posibles, dependiendo del tamaño de la copia impresa. Si llevamos una foto al papel, con formato A3 (30x40cm) necesitaremos ampliar el detalle captado por el sensor de formato 24x36mm unas 12 veces (redondeando). Supongamos que el objetivo y la cámara resuelven efectivamente 60 lp/mm con buen nivel de contraste (ese es el límite Nyquist de una Canon 5D o una Nikon D3, de unos 12 millones de píxeles), lo que se traduce en 5 lp/mm en el papel de nuestro ejemplo ( $60/12 = 5$ ).

Pero, como vimos, el rango que va de 0,5 a 2 lp/mm en el papel (->), a una distancia de observación de unos 34 cm, ya es un determinante muy importante de la calidad de imagen percibida en la copia final. Eso supone, para sistema, un rango de resoluciones que va de 6 lp/mm ( $0,5 \cdot 12$ ) a 24 lp/mm ( $12 \cdot 2$  lp/mm) si hablamos de una impresión A3 obtenida a partir de un sensor de formato 35mm sin recorte.

Esos valores parecen poca cosa comparados con lo que, fuera de todo contexto *práctico* razonable, se cree necesitar. En efecto, cuando vemos una imagen de 12 millones de píxeles ampliada al 100% en un monitor con 96 píxeles por pulgada de resolución, ¿estamos viendo el equivalente de una copia en papel de tamaño superior a 1 metro por 70 centímetros! Más y más detalle en un sensor pequeño implica que éste, en combinación con el objetivo, tendrá que resolver más detalle por milímetro, es decir, el mismo detalle en menos superficie que uno más grande, y las exigencias, por irreales que sean, aumentan hasta un punto en que, a la larga, los formatos de menor tamaño quedan lejos de poder satisfacerlas.

La clave está en el nivel de contraste que da el objetivo *para el rango de resoluciones relevante*, sea cual sea, para distintas aberturas, distancias y en distintos puntos del círculo de luz (centro, bordes, esquinas). Muchos objetivos son suficientemente buenos, e incluso muy similares en general, pero siempre se pueden encontrar diferencias en circunstancias difíciles: a aberturas extremas, a distancias muy cortas, en los bordes, etc. Y no hay que olvidar otros aspectos importantes para el fotógrafo (desde el viñeteo, la distorsión, las aberraciones cromáticas, etc.), además de la resolución.

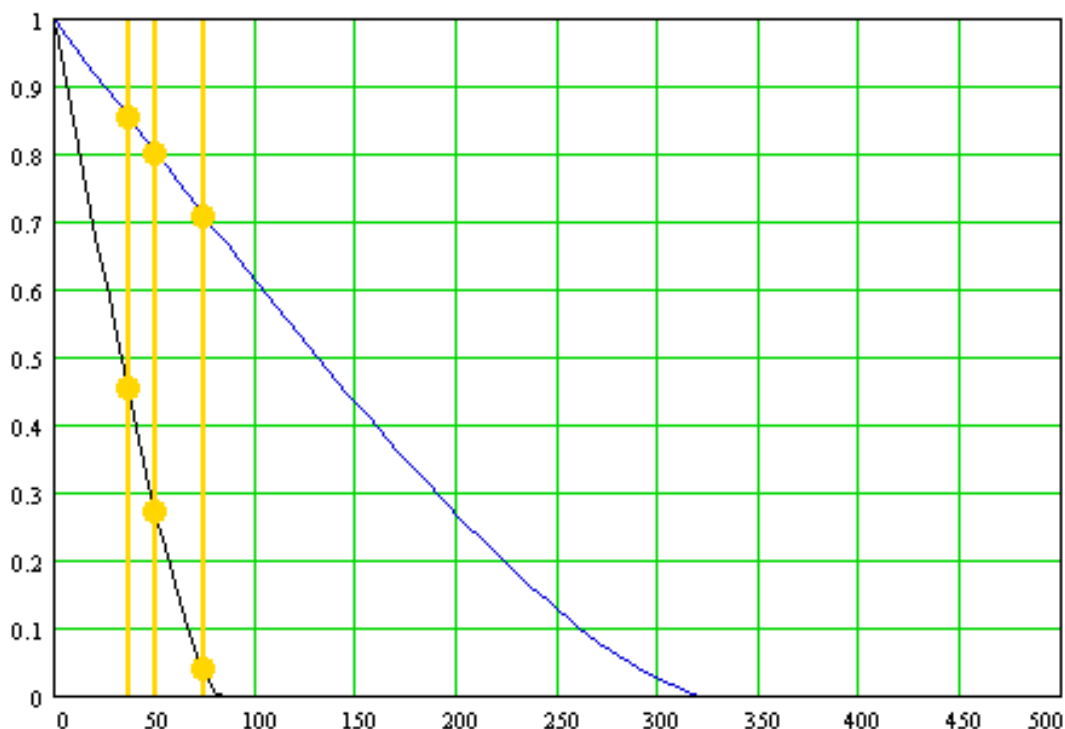
Por tanto, lo relevante no es tanto el número de píxeles que proporciona la cámara (pues siempre se puede interpolar) como la resolución y contraste reales en relación a las posibilidades de mostrar detalle del papel impreso, y *del ojo humano de captarlo*. Entonces, ¿podemos suponer que se detendrá aquí el crecimiento en la resolución nominal de los sensores?

## 6. Determinantes de la evolución de los sensores.

En esta sección veremos por qué el tamaño de los sensores y sus resoluciones tienden inexorablemente a unos valores de equilibrio.

Recordemos que para una impresión A4 ( $\approx 8 \times 12$  pulgadas) con detalle real de 6 pares por milímetro, necesitaremos resolver, redondeando, 50 pares por milímetro en un sensor de  $24 \times 36 \text{ mm}$  ( $\approx 6 \times 8$ ), 75 pares por milímetro en un sensor APS ( $\approx 6 \times 8 \times 1,5$ ), 95 pares en un sensor  $4/3$  ( $\approx 6 \times 8 \times 2$ ), y 35 pares en un sensor  $37 \times 49 \text{ mm}$  ( $\approx 6 \times 8 / 1,4$ ), que es el tamaño típico en los respaldos digitales actuales para cámaras de formato 6x6 ó 645 (la razón de diagonales del formato 35mm y ese sensor es de 1,4). Aplicando el *teorema de Nyquist* sin más correcciones, tendríamos una idea del número de píxeles que requerirían esos sensores. Pero sabemos que estas cifras se quedan algo cortas, pues pueden ser necesarias frecuencias de muestreo algo superiores a los 2 píxeles por ciclo.

Recordemos el gráfico con las dos MTF que utilizamos para discutir el tema de la calidad de imagen. En el gráfico que sigue hemos representado las resoluciones necesarias de los diferentes sensores para una impresión A4 a 6 pares. Puede observarse fácilmente cómo el nivel de contraste que proporciona un objetivo ideal es mayor a 35 pares para cualquier abertura, y progresivamente menor conforme pasamos a 50 y 75 pares por milímetro. Es obvio que la cámara de formato medio proporcionará una imagen impresa de más calidad, lo que se verifica también para el medio químico.

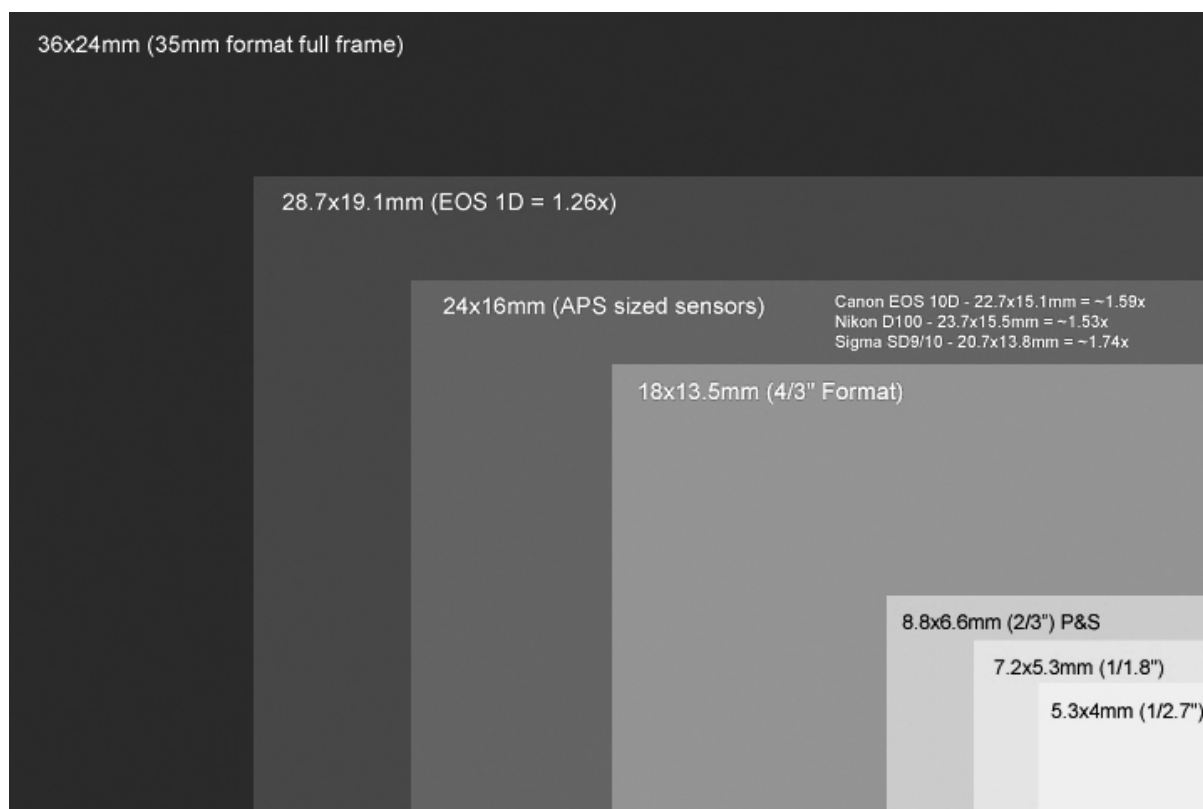


*Curvas MTF, y requerimientos de impresión para distintos tamaños de sensor.*

Si en vez de los 6 pares por milímetro consideramos el rango de 0,5 a 2 pares (que determina la percepción subjetiva de calidad, como señalamos en la sección previa), el

esfuerzo resolutivo exigido al sensor de 35mm estará comprendido entre 4 y 16 pares, el sensor 4/3 tendrá que resolver entre 8 y 33 pares, mientras que para el sensor APS-C la exigencia será de 7,5 y 26 pares aproximadamente y para el sensor de 37x49mm entre 3 y 12 pares por milímetro. El contraste a esas resoluciones proporcionado por objetivo y sensor debe ser el máximo posible, y cuanto menor sea la exigencia que la impresión impone al sensor mayor será el contraste (basta observar una curva MTF).

Hay quien piensa que en la fotografía digital sólo cuenta el número de píxeles, y que el tamaño del sensor sólo tiene importancia en lo referente al tamaño de las fotocélulas, pero no es así como vemos, pues el tamaño del sensor determina la posición de las líneas amarilla y azul.



*Tamaños relativos de los sensores más comunes (formato de 35mm y menores)*

Los sensores APS-C tienen aproximadamente la mitad de superficie que los sensores de formato 35mm sin recorte, por lo que, a igual densidad, el número total de 'píxeles' o fotocélulas debe ser el doble. Dicho de otra forma, doble número de fotocélulas en un sensor de doble superficie no altera la frecuencia de muestreo.

Lo que ha venido ocurriendo hasta ahora en las cámaras réflex, como tendencia, es precisamente que la densidad tiende a ser la misma entre sensores de distintos tamaños, y que la diferencia en número de 'píxeles' acaba respondiendo a diferencias de tamaño de los sensores (aunque los sensores más grandes no necesitan frecuencias de muestreo tan altas).

Si llevamos la densidad actual en sensores APS a los de formato completo, tendremos una estimación del número total de píxeles que podemos esperar ver. La densidad de la Canon 20D o 30D supondría 21 millones de 'píxeles' en un sensor de formato 35mm sin recorte

(24x36mm), mientras que la densidad de la Nikon D2X daría 28,5 millones de píxeles (864 milímetros cuadrados de superficie de un fotograma de 35mm dividido por los 0,00003025 milímetros cuadrados de cada celdilla de esa cámara). En 2008 ya estamos casi ahí, si bien las cámaras de formato APS-C han dado un nuevo salto en resolución.

Obsérvese que en un sensor de formato completo las dos densidades mencionadas permitirían una diferencia entre resolución de impresión (A4, 6 pares) y frecuencia Nyquist (línea amarilla y línea roja) de  $80-50=30$  pares y  $90-50=40$  pares respectivamente. Sin embargo, en un sensor de formato (aproximado) APS-C las dos densidades permiten diferencias de sólo  $80-75=5$  pares y  $90-75=15$  pares respectivamente. En efecto, si llevamos la frecuencia de muestreo a 200 píxeles por milímetro, estaremos hablando de fotocélulas de 5 micras de lado. En un sensor de 24x36mm tendríamos 35 millones de 'píxeles', en las variantes APS unos 17 millones y en un sensor de formato 4/3 casi alcanzaríamos los 10 millones.

Debe tenerse en cuenta que para *duplicar* la capacidad resolutive o frecuencia de muestreo de un sensor hay que *cuadruplicar* el número total de 'píxeles'. Por tanto, si con mucho esfuerzo duplicamos el número de 'píxeles', estaremos elevando la frecuencia de muestreo sólo un 50%, y el incremento en resolución efectiva (considerando el objetivo y los problemas de interpolación y exceso de señal) será incluso menor. Tendemos a caer en el error de pensar que un número doblemente grande de píxeles significa una ganancia doble en algún sentido. Por tanto, hay que tener cuidado cuando uno compara el número total de píxeles que ofrecen dos cámaras diferentes: 16 millones de píxeles supone un incremento de sólo el 15% de capacidad resolutive *teórica* del sensor respecto a 12 millones de píxeles, si ambos tienen el mismo tamaño. Sería el caso de la Canon 1Ds Mark II y la Canon 5D.

Un sensor 4/3 con 10 millones de píxeles (el de la Olympus E-420, E-510 o E-3) representaría un incremento de la frecuencia de muestreo de un 12% aproximadamente si lo comparamos con un sensor del mismo tamaño con 8 millones de píxeles (el de las Olympus E-300, E-330 y E-500). Un sensor APS de casi 17 millones de píxeles supone un incremento de la frecuencia de muestreo del 20% a lo sumo respecto al mismo sensor con 12 millones de píxeles (el de la Nikon D2X o la D300). Esas diferencias pueden ser casi inapreciables en la práctica en lo que respecta al detalle realmente captado (->). En cambio, un sensor de formato completo con 35 millones de píxeles representa un incremento de la frecuencia de muestreo de un 75% con respecto al de un sensor de igual superficie con 12 millones de píxeles y más de un 50% respecto de uno con 16 millones de píxeles (Canon 5D o Nikon D3 y Canon 1Ds Mark II respectivamente). El margen para los sensores más grandes es más amplio.

Incrementos adicionales en la densidad de píxeles pueden resultar imposibles a partir de cierto punto sin serios sacrificios en la calidad de imagen debido al ruido fotónico ('photon noise'). Cuanto mayor es la densidad, más pequeña es el área de captura, e inevitablemente la razón señal-ruido decrece. Se pueden reducir otras causas del ruido, o aplicar tratamientos a la imagen más sofisticados, pero obviamente hay límites a lo que podemos lograr por ese camino. No podemos escapar a las leyes de la Física.

Por otro lado, estos cálculos no suponen otra cosa que aplicar densidades ya existentes en sensores actuales a otros más grandes. El avance tecnológico no se detiene y podremos ir más allá. Otra cosa es que las posibilidades de los objetivos lo aconsejen (volveremos a esto más adelante).

El formato medio permite trabajar con sensores aún mayores. Los objetivos para las cámaras de formato 6x6 ó 645 están diseñados para dar un buen rendimiento a frecuencias

espaciales menores que los objetivos de 35mm, dada la mayor superficie del fotograma y las menores ampliaciones requeridas para las impresiones (véase [esta](#) página de resoluciones de objetivos de formato medio).

Ronald W. Harris (en las referencias citamos su análisis en dos partes), estudiando el caso de la película, encuentra que 13 pares por milímetro es lo máximo que reproduce determinada clase de papel (*Oriental Seagull Glossy*), y 4 pares lo que se suele captar a simple vista normalmente. A partir de ahí hace sus cálculos, que le llevan a unos requerimientos de 30 pares para el negativo de 35mm y 15 pares para el negativo 6x6 (impresión de 8x10 pulgadas a 4 pares), y 95 pares/45 pares respectivamente (impresión a 13 pares). Cualquiera puede hacer sus propios cálculos en función de otros parámetros.

La situación es la misma en el medio digital. Hay que distinguir entre el tamaño de la foto, en número de píxeles, determinado conjuntamente por la frecuencia de muestreo y el tamaño del sensor (línea amarilla), y la resolución real alcanzada por el sistema, que depende de la frecuencia de muestreo, del objetivo, de las interpolaciones para obtener los colores finales y del exceso de señal, entre otras cosas (línea azul). El problema de conseguir una imagen de tamaño suficiente para una impresión (que la línea roja esté sobre la amarilla o a su derecha) es una cosa, y otra es aprovechar al máximo la capacidad de reproducir detalle del medio impreso (que la línea azul esté sobre la amarilla, o a su derecha), que es lo que Harris trata.

Sabemos que para una impresión A4 ( $\approx 8 \times 12$  pulgadas) con detalle real de 300 píxeles por pulgada (casi 6 pares por milímetro), el sensor de 35mm tiene que resolver efectivamente unos 50 pares, y el sensor 37x49mm unos 35 pares (líneas azules). Eso implica frecuencias de muestreo (líneas rojas) aún mayores (puede que hasta un 50%,  $\geq$ ), porque sabemos que la resolución real es siempre menor a la frecuencia de muestreo. Por tanto, de alguna forma, el tamaño de la foto en número de píxeles debe exceder a las necesidades reproductivas reales (para que la línea azul se acerque a la amarilla la roja tiene que estar más a la derecha). Es un resultado poco intuitivo, en principio, pero el hecho es que parte de la matriz de píxeles de una imagen digital *no contiene información relevante*. En el medio químico ocurre algo similar, pues la capacidad resolutoria máxima de la película excede siempre con mucho el detalle finalmente captado.

Si la impresión A4 debe alcanzar los 13 pares por milímetro de los que hablaba Harris, será necesario resolver efectivamente (redondeando) unos 110 pares por milímetro en un sensor 24x36mm ( $\approx 13 \times 8$ ), mientras que un sensor de 37x49mm (algo inferior a los 42x56mm del formato 645) necesitaría resolver sólo 75 pares ( $\approx 13 \times 8 / 1,4$ ). Sabemos que un A4 a 13 pares por milímetro nos lleva a una imagen de 5460x7722 píxeles, es decir, ¡de unos 42 millones de píxeles! Pero eso sería el mínimo teóricamente necesario, pues sabemos que una cámara digital sólo podría reproducir 13 pares en un A4 con una imagen todavía mayor.

Téngase en cuenta que nuestros números difieren ligeramente de los de Harris por el tamaño del papel que hemos supuesto (un A4 son exactamente 8,3x11,7 pulgadas, de proporciones más próximas a las del fotograma, que son 2:3) y por el recorte en el sensor de formato medio.

El respaldo digital P45 de Phase One ( $\geq$ ), con un sensor de 37x49mm, tiene nada menos que 39 millones de 'píxeles' (de 6,8 micras de lado), lo que satisface las exigencias de casi cualquier impresión. En efecto, la frecuencia de muestreo es de 73,5 pares de píxeles por milímetro (línea roja), más del doble de los 35 pares que se necesitan para un A4 a 6 pares (300 píxeles por pulgada) a partir de ese sensor (línea amarilla). En comparación, 22

millones de 'píxeles' en el mismo sensor suponen una frecuencia de muestreo de 55 pares por milímetro ('píxeles' de 9 micras) y 18 millones de 'píxeles' uno de 50 pares ('píxeles' de 10 micras de lado), lo que deja un margen amplio para que la resolución real (línea azul) alcance los 35 pares que es capaz de mostrar un A4 impreso a 6 pares por milímetro.

Veámoslo desde otro punto de vista. Siendo prácticos, tomando como referencia los criterios de Zeiss (véase Kämmerer, J. 1979. When is it advisable to improve the quality of camera lenses? Optics & Photography Symposium, Les Baux, 1979 (->)), que estableció los 40 lp/mm como valor clave para proporcionar una buena sensación de nitidez en el papel a partir del formato de 35mm, y los múltiplos del límite de Nyquist, que nos indica la necesidad de una frecuencia de muestreo *mínima* para obtener una reproducción exacta, podemos calcular qué resoluciones podemos esperar en los sensores de ese formato que, después de casi 80 años, sigue ejerciendo una poderosa influencia. Asumamos la norma de muestrear a la frecuencia Nyquist o ligeramente por encima de ella (2 ó 3 píxeles por ciclo). Es obvio que 80 lp/mm son 160 l/mm, lo que nos lleva a un sensor 24x36mm con 3.840x5.760 "píxeles", es decir, poco más de 22 millones de píxeles en total (x1 Nyquist). Hay que tener también en cuenta la interpolación Bayer, los filtros antialias y demás. Eso supone, para el formato de 35mm, "píxeles" con un espaciado algo mayor de 6 micras. Si concedemos un margen adicional y adoptamos 100 lp/mm, el formato de 35mm nos dará 34,5 millones de "píxeles".

La necesidad de captar más detalle ha venido hasta ahora de la mano de una necesidad de mayores tamaños de imagen (en número de píxeles) y mayores frecuencias de muestreo en los sensores. Pero, alcanzado ya un punto, existen formas mejores de incrementar la resolución real sin seguir aumentando el tamaño de las imágenes. Tenemos un ejemplo en los sensores Foveon, que consiguen reproducir el mismo detalle con menos píxeles (->), o más detalle con los mismos, sólo con evitar la interpolación a partir del mosaico Bayer.

## **7. La razón señal-ruido, el espaciado entre fotocélulas y su tamaño real.**

La siguiente pregunta es si hay alguna diferencia en las calidades de las fotografías obtenidas a partir de dos sensores de diferente tamaño pero igual número de fotocélulas o 'píxeles' (por ejemplo, la Nikon D2X y la Canon 5D). Dejando a un lado las diferencias que acabamos de analizar, el sensor más grande tendrá fotocélulas más grandes, lo que tiene ventajas.

Es sabido que hay una relación entre el tamaño de la superficie realmente sensible a la luz de las celdillas del sensor (->) y la razón señal-ruido (*signal-to-noise ratio*, SNR). El ruido depende de varios factores (->), uno de los cuales, muy importante, viene determinado por el tamaño de dichas celdillas.

Hay que decir aquí que los cálculos de tamaño que solemos dar sólo establecen la correspondencia entre el número de 'píxeles' (o de celdillas con un fotodiodo y otros componentes electrónicos) y la superficie total del sensor. Más que un dato de tamaño se trata de un dato de *espaciado* entre celdillas. La superficie realmente recolectora de luz es menor, pues parte del espacio reservado a cada fotocélula está ocupado por circuitería electrónica. Por ejemplo, los sensores CMOS (*Metal Oxide Semiconductor*) de Panasonic para el formato Cuatro Tercios tiene una superficie sensible a la luz de un 50%, y eso aún después de una revisión del diseño tradicional de este tipo de sensores para incrementarla (->). Las microlentes aumentan también la capacidad recolectora de luz de las fotocélulas redirigiendo hacia ellas luz que, de otra forma, no incidiría en las celdillas sino en la superficie "ciega" que las separa. Todo dependerá en definitiva de cómo esté diseñado cada sensor.

Una de las ventajas tradicionales de los CCD (*Charge Coupled Device*) sobre los CMOS ha sido que ofrecían mayor superficie realmente sensible a la luz (los de tipo “full-frame transfer” al menos). No obstante, el *espaciado* de las celdillas es la mayor restricción a la hora de determinar la superficie realmente fotosensible de un sensor, por lo que se puede establecer una relación aproximada entre ésta y la razón señal-ruido.

Los fotones capturados por un CCD o un CMOS siguen una distribución aleatoria de Poisson (->). Por tanto, la raíz cuadrada del número de fotones captado es ruido, es decir, fotones que han caído en la celda por error. Es lo que se conoce como 'photon noise' o 'shot noise'. El tamaño de la celda determina el número de fotones capturado en un período determinado, y cuantos más fotones atrapemos mayor será la razón señal-ruido. En efecto, si se capturan 400 fotones, 20 serán ruido (5% del total), y la razón señal ruido será de 400/20=20. Pero si la captura es de sólo 16 fotones, 4 serán ruido (el 25%), y la razón señal-ruido será igual a 16/4=4, mucho menor (véase el interesante análisis de Roger N. Clark sobre el tema, ->).

El 'photon noise' no es el único origen del ruido finalmente observado, pero sí impone una fuerte restricción a nuestras posibilidades de preservar la SNR cuando reducimos el tamaño de las fotocélulas. Otras dos causas importantes de ruido están relacionadas con la conversión analógico/digital ('read noise') y con la temperatura del sensor ('thermal noise').

¿Resolución o ausencia de ruido en la foto? Ambas están ligadas mediante una relación inversa, pues el ruido a sensibilidades equivalentes ISO altas llega a destruir detalle que el sensor capta a valores ISO bajos (cosa que ocurría también con la película, aunque en mucha mayor medida), y lo mismo ocurre con la rendición del color, que empeora en presencia de ruido. El progreso técnico va modificando esa frontera de posibilidades tecnológicas, pero hay restricciones puramente físicas.

Para cada estado de la tecnología hay un conjunto de combinaciones posibles de capacidad resolutive y razón señal-ruido, de entre las que podemos elegir. La Nikon D2X, por ejemplo, ofrece una excepcional capacidad de captar detalle (véase la [foto del graderío](#)), si bien el ruido se hace aparente para sensibilidades equivalentes ISO iguales o superiores a 800. Eso es producto de una elección, como otra cualquiera. Por otro lado, hemos conocido cámaras con un amplísimo rango de sensibilidades y muy bajo ruido, pero a cambio de una resolución también muy baja (véase la antigua [Kodak DCS620x](#)). Se viene operando sobre varias de las causas del ruido, aunque este avance se hace cada vez más costoso y más lento.

En definitiva, la presencia de ruido afecta a la percepción de calidad en la fotografía, y existe una medida de la misma que lo tiene en cuenta. La *Capacidad de transmisión de información de Shannon* (*Shannon Channel Capacity*, ->) es una medida de la cantidad de información que se transmite a través de un canal, y que responde a la fórmula

$$C = W * \log_2(S/N + 1)$$

donde *C* es la medida de *capacidad de transmisión de información de Shannon*, *W* es el ancho de banda del canal (capacidad resolutive con un 50% de contraste), *S* es la señal y *N* el ruido (obviamente *S/N* es la razón señal-ruido, difícil de cuantificar en la práctica, ->). Lo que viene a decirnos la función matemática es que la calidad percibida en una imagen (*C*) depende positivamente tanto de la MTF como de la razón señal-ruido.

La señal es mayor en las imágenes o parte de la imagen en las que hay más detalles, y menor allí donde apenas hay detalles (superficies uniformes, como el cielo). Por tanto, allí

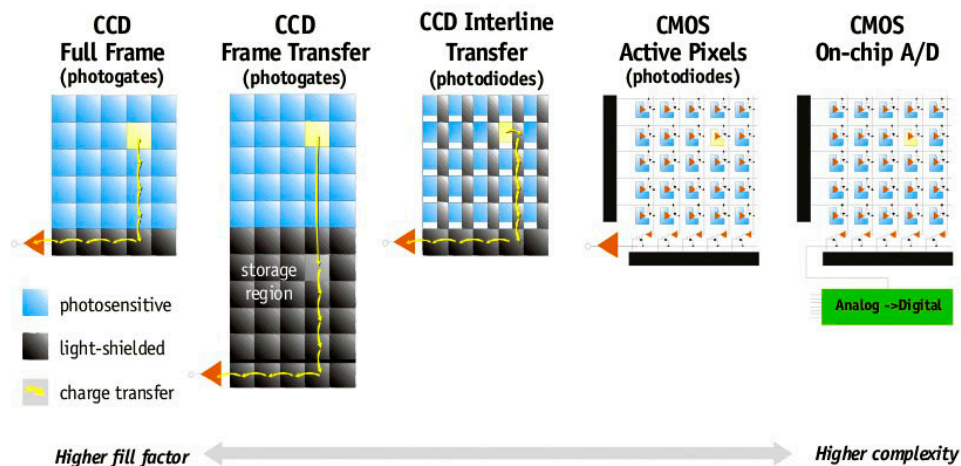


donde  $S$  es grande, la capacidad resolutive  $W$  tiene que ser también grande para alcanzar un valor  $C$  elevado. En cambio, en las imágenes o zonas de una imagen en la que hay menos detalles ( $S$  bajo) es fundamental que el nivel de ruido ( $N$ ) sea también bajo para que el índice de calidad percibida ( $C$ ) no se degrade. De esta forma podemos ponderar la presencia de ruido en las imágenes a la hora de elaborar un indicador de la calidad de una imagen digital.

## 8. Gama tonal e intervalo tonal.

La calidad potencial de una imagen fotográfica digital no sólo depende de variables como la resolución y el contraste. La *gama tonal* y el *intervalo tonal* son también variables determinantes para la calidad de la imagen fotográfica y, aunque hemos ido apuntando su importancia, es verdad que nos hemos concentrado mucho en la pura capacidad de resolver detalle de las cámaras.

Hablamos de *espaciado* entre ‘píxeles’ porque el tamaño real de las celdillas que capturan luz depende de la superficie del sensor que queda ocupada por dispositivos –circuitos– que procesan la señal luminosa y transportan la carga eléctrica resultante hacia los bordes del mismo. El término *fill factor* alude precisamente a la *proporción efectivamente sensible a la luz del sensor*.



Distintos tipos de sensores CMOS (*Metal Oxide Semiconductor*) y CCD (*Charge Coupled Device*) ([Dalsa©](#)).

La proporción entre señal falsa (ruido) y señal real mejora no sólo reduciendo las causas del ruido ( $\rightarrow$ ), sino también mejorando la eficiencia cuántica ( $\rightarrow$ ) y aumentando la cantidad de señal por ‘píxel’ mediante mejores filtros, microlentes y un *fill factor* mayor (celdas más grandes). Es por tanto lógico que, en efecto, se hayan observado mejoras en la razón señal-ruido (*signal-to-noise ratio*, SNR), incluso si el *espaciado* entre los ‘píxeles’ disminuye. Estos avances en la SNR han permitido, entre otras cosas, mejorar la “resolución tonal” (o “gama tonal”) y la “amplitud tonal” (o “intervalo tonal”) de las cámaras digitales, a la vez que se incrementaba la resolución. Este progreso tiene, lógicamente, un límite, pues hay restricciones puramente físicas que no se pueden burlar.

Tradicionalmente han sido los sensores CCD de tipo “full-frame” (o los “frame-transfer”, muy similares, empleados en cámaras de cine digitales) los que ofrecían mayor superficie

sensible a la luz (con un *fill factor* muy cercano al 100%), si bien los sensores CCD de tipo “interline transfer” y los CMOS han experimentado grandes mejoras en este apartado (los CMOS tienen un *fill factor* típico de en torno al 60%, con ayuda de microlentes). El progreso de estos dos tipos de sensores, pero especialmente el de los CMOS, está condicionado por los avances en la tecnología de litografía aplicada en su producción, que determina el tamaño de los circuitos, pero también por límites físicos: una reducción del tamaño de los circuitos plantea problemas de recolección y medición de la carga eléctrica generada por las fotocélulas (->). Los CMOS, con más dificultades para aumentar la superficie de captura, se han especializado en sofisticados tratamientos electrónicos de reducción del ruido (varios transistores en cada píxel, lecturas de señal en el propio sensor), lo que unido a su menor consumo de energía y voltaje de operación, ha permitido conseguir notables rendimientos en cuanto a razón señal-ruido, especialmente cuando reducimos la señal (subimos la sensibilidad equivalente ISO del sensor). Los CCDs, por contra, siguen proporcionando la mejor relación señal-ruido para valores ISOs bajos.

La superficie perdida con circuitos puede tratar de recuperarse mediante el uso de *microlentes*. Las microlentes son microscópicas lupas que corrigen el ángulo de incidencia de la luz, concentrándola en un punto. Permiten recoger luz que caería en las zonas “insensibles” del sensor y redirigirla hacia las zonas sensibles. Además ayudan a resolver otro problema: entre la superficie del sensor y el lugar que ocupa el fotodiodo –que recibe luz y genera una carga eléctrica– hay una distancia (el problema es más serio en los CMOS debido a la presencia de 3, 4 o incluso 5 transistores en cada ‘píxel’). Por decirlo de algún modo, los fotodiodos están en el fondo de un pozo tapado por gruesas capas de filtros translúcidos. La consecuencia es que si la luz incide con un ángulo demasiado inclinado acabará desviándose, perdiéndose entre los filtros o chocando con la pared lateral del pozo. Una forma de aliviar este problema es reducir la gruesa capa de filtros. Pero otra es concentrar y dirigir la luz hacia el fotodiodo.

El problema de las microlentes es que no se adaptan al ángulo de entrada de la luz cuando éste varía, pues son fijas. La abertura y la distancia focal, entre otras cosas, modifican aquel ángulo, por lo que microlentes eficientes bajo ciertas condiciones pueden dejar de serlo en otras. Pero la tecnología de microlentes también ha mejorado, permitiendo una reducción del espacio entre ellas y modificando su orientación en función de la posición que ocupan en el sensor (el caso del sensor [CCD Kodak](#) de la [Leica M8](#)).

El *intervalo tonal* es la razón entre el máximo nivel de luminosidad que el sensor puede medir antes de saturarse y el mínimo nivel descontado el ruido de lectura (->). Fuera de ese rango la cámara percibe un negro o un blanco absolutos. Depende, fundamentalmente, del tamaño real de las celdillas en que se alojan las fotocélulas y de la capacidad de diferenciar matices del conversor analógico-digital. Este *intervalo o amplitud tonal* se mide, en términos fotográficos, en “pasos” (*stops*), en una escala logarítmica en la que cada “paso” implica doblar la cantidad de luz del paso anterior ( $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^n$  donde  $n$  es el número total de pasos). Las mejores cámaras digitales tienen una escala tonal de unos 8 ó 9 pasos (->), y excepcionalmente hasta 10 pasos (->), mientras que los negativos químicos se mueven dentro de un rango similar y las diapositivas en uno más limitado (->). Con rápidos ajustes de la pupila el ojo humano puede abarcar hasta 24 pasos de escala tonal, y con una abertura constante entre 10 y 14 pasos.

Surge un problema importante debido al carácter *lineal* del soporte digital que almacena la información fotográfica (los famosos 12, 14 o 16 bits de variantes tonales por ‘píxel’), frente al carácter *logarítmico* de la información luminosa.

Si colocamos una vela delante de una cámara un determinado tiempo, cada 'píxel' del sensor recogerá una determinada cantidad de luz y generará una carga eléctrica. Si colocamos dos velas, la carga eléctrica será doble en el mismo tiempo. Triple si son tres velas. Etcétera. La escala es lineal (1, 2, 3, 4...). Sin embargo, el ojo humano percibe una duplicación de la intensidad luminosa si pasamos de una vela a dos, pero no si pasamos de dos velas a tres. El ojo (o el cerebro) mide las diferencias logarítmicamente, en una escala en la que cada valor duplica al anterior (1, 2, 4, 8, 16, 32...). Con este ajuste logarítmico nos protegemos de una posible sobredosis luminosa (al pasar de 16 velas a 32 el efecto percibido es similar al de pasar de 1 a 2), lo que nos permite percibir una mayor amplitud tonal. La película responde a la luz de forma similar al ojo humano, es decir, no linealmente, y esta es una de las grandes diferencias entre el medio químico y el digital (el único sensor que se aproxima a esta respuesta no lineal es el SuperCCD de Fujifilm).

Cada fotocélula transforma el estímulo luminoso en una carga eléctrica, es decir, responde al impacto de los fotones generando electrones. Los CCDs transportan esta carga eléctrica secuencialmente hacia los bordes del sensor, de 'píxel' a 'píxel', y un colector la transforma en un determinado voltaje. Los CMOS hacen la transformación de la carga eléctrica en voltaje en el propio 'píxel' y la transportan en paralelo (de forma más rápida). El conversor analógico-digital (*A/D converter*) hace una lectura de esos voltajes y genera una secuencia de números digitales, siguiendo una escala lineal (->). Para pasar de una escala lineal a una logarítmica:

$$\text{Pasos} = \log_2(\text{Medida lineal}) = \ln(\text{Medida lineal}) / \ln(2)$$

Donde la medida lineal aparece siempre que expresamos la magnitud del contraste (por ejemplo, 10.000:1, donde 10.000 sería la medida lineal).

Sin embargo, al superponer una escala logarítmica a la escala lineal, el paso más alto de luz se queda con el 50% de esas  $2^{12}$ ,  $2^{14}$  ó  $2^{16}$  variantes tonales en las que el conversor analógico-digital "traduce" su lectura de la carga eléctrica (los famosos 12, 14 o 16 bits). El siguiente paso, más bajo, se queda con la mitad del sobrante ( $0,5 \cdot 0,5 = 0,25$  o el 25% de las tonalidades alternativas), el siguiente paso más bajo se queda con el 50% del sobrante ( $0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,125$  que es el 12,5%), etc. Es obvio que los pasos más bajos apenas se quedan con variantes que describan sus matices (véase la siguiente tabla). Se puede observar cómo 8 bits de variantes tonales limitan la máxima amplitud tonal teóricamente posible (sin considerar las limitaciones del ruido) a 8 pasos, 12 bits a 12 pasos, 14 bits a 14 pasos, etc. A partir de ese punto, las variantes tonales se agotan. Por tanto, la precisión del conversor analógico-digital limita la amplitud tonal máxima teóricamente reproducible. Hay que tener en cuenta además que el ruido inutiliza o degrada apreciablemente un buen número de variantes tonales en las sombras, ya que ahí la señal por 'píxel' es lógicamente pequeña. Por ello la amplitud tonal es siempre inferior al máximo que teóricamente puede manejar el conversor analógico-digital (una regla orientativa es restar al menos dos pasos).

En general, los sensores CCDs de tipo "full-frame" y "frame-transfer" tienen una razón señal-ruido más alta que los CMOS, y eso les permite "salvar" más pasos de luz y ofrecer una mayor amplitud tonal. Una forma muy común de reducir el ruido que el usuario ve en la imagen final obtenida consiste en, simplemente, sacrificar amplitud tonal, descartando las zonas de sombras altamente "contaminadas". Una conclusión interesante es que *una mayor amplitud tonal tiene que estar acompañada de una mayor profundidad de bits, aunque ésta no garantiza aquélla*, debido en parte al ruido. Por otro lado, la reducción del ruido mediante avances en electrónica permite "rescatar" información en las sombras y ganar amplitud tonal. Esto es lo que hace Canon en sus CMOS, mediante la incorporación transistores

especializados en cada 'píxel' que consiguen reducir una de las fuentes de ruido (el 'reset noise'), aunque por otro lado afecten al *fill factor*.

La amplitud tonal es como la longitud total de una escalera, donde la profundidad de bits viene a ser el número de escalones. No obstante, la altura de estos escalones no es la misma en todo el recorrido. En la parte baja de la escalera (sombras) los escalones son escasos en número y muy altos, y conforme vamos subiendo (luces altas) estos se hacen más numerosos y más bajos. Si queremos una escalera más alta tendremos que añadir escalones. Pero no es posible incrementarlos sólo en la parte baja, donde se agradecería un mayor número de ellos. Los nuevos escalones tienen que distribuirse desigualmente a lo largo de toda la escalera, acumulándose preferentemente en la parte alta, ¡donde menos falta hacen!

%	paso	Lineales				No lineales	
		8 bits, $2^8 = 256$	12 bits, $2^{12} = 4.096$	14 bits, $2^{14} = 16.384$	16 bits, $2^{16} = 65.536$	16bits, Gamma 2.2	Leica DNG 8 bits
		variantes tonales	variantes tonales	variantes tonales	variantes tonales	variantes tonales	variantes tonales
50,0	n	128	2.048	8.192	32.768	17.712	74
25,0	n-1	64	1.024	4.096	16.384	12.925	54
12,5	n-2	32	512	2.048	8.192	9.415	37
6,25	n-3	16	256	1.024	4.096	6.883	27
3,13	n-4	8	128	512	2.048	5.023	18
1,57	n-5	4	64	256	1.024	3.665	14
0,78	n-6	2	32	128	512	2.675	9
0,39	n-7	1	16	64	256	1.952	7
0,20	n-8	-	8	32	128	1.425	4
0,10	n-9	-	4	16	64	1.039	4
0,05	n-10	-	2	8	32	758	7
0,025	n-11	-	1	4	16	379	-
0,0125	n-12	-	-	2	8	189,2	-

*Variantes tonales y su distribución por pasos. Las zonas sombreadas están más afectadas por el ruido.*

Debe distinguirse entre las variantes que maneja el convertor analógico-digital de las empleadas finalmente para el "almacenaje" de la información en el archivo final, que pueden comprimirse a 8 bits por canal o quedar sin comprimir a 16 bits. Sin embargo, también es posible aplicar un algoritmo de compresión no lineal que reduzca el número de "escalones", uniendo muchos de los pequeños (que captan pequeñísimas variaciones allí donde el ojo humano no diferencia muy bien, en las luces altas) y dejando intactos los grandes. Es lo que hace Leica con los archivos DNG de la M8 (a 256 variantes tonales) o Nikon con los NEF (a 683 variantes). Veamos a título de ejemplo cómo redistribuye la información luminosa la Leica M8. El convertor analógico-digital es de 16-bits, pero se descartan dos pasos de información, afectada por el ruido. El *output* es por tanto de 14-bits. Estas 16.384 variantes tonales *posibles* (no necesariamente hay información relevante para todas) se reducen a 255 empleando un algoritmo sencillo: el valor registrado en cada píxel se multiplica por 4 y al resultante se le calcula la raíz cuadrada [ $\text{SQRT}((14\text{-bit data}) \cdot 4)$ ]. En verdad, más que calcular raíces cuadradas, se aplica una tabla de correspondencias a la matriz de datos original, conocida como *Lookup Table* (incluyéndose la inversa en el archivo DNG). Esto reduce las 16.384 variantes originales a 255 (->). En el fondo estamos aplicando una

sencilla curva de contraste ( $y = 2x^{1/2}$ , donde  $y$  son los valores transformados y  $x$  los valores originales, que es aproximadamente una gama 2,0), que preserva las variantes tonales en las zonas de sombra (o las reduce muy poco) y reduce el número de variantes reservadas a las luces altas, donde el ojo humano apenas percibe diferencias (el planteamiento de Nikon es similar, aunque más holgado,  $\rightarrow$ ,  $\rightarrow$ ). El número de variantes reservado a cada paso de luz por la Leica M8 se muestra en la tabla anterior.

Esta compresión no lineal sólo es posible en el almacenamiento de la información. Todos los programas informáticos trabajan linealmente, por lo que al “leer” el archivo hay que pasar de nuevo a un espacio lineal donde, una vez más, las luces altas tendrán reservada en principio una cantidad desproporcionada del total de variantes tonales posibles. En la Leica M8 el algoritmo de descompresión es justo el inverso (algo así como dividir por 4 y elevar al cuadrado, mediante la aplicación de la tabla inversa mencionada). Es obvio que no se obtiene como resultado la diferenciación tonal original, y que el proceso implica pérdidas de información. Sin embargo, la distribución de variantes tonales entre los distintos pasos de luz es mucho más eficiente que en los 8 bits lineales de los archivos JPG y TIFF, por lo que no son comparables.

Durante el tratamiento de la imagen es conveniente trabajar *siempre* en el mayor espacio posible, de 16 bits o superior. Podemos pensar que cada variante tonal que es capaz de separar un conversor A/D es un “cajón”, y la información luminosa captada serían “documentos”. Cuando alteramos una imagen digital, tocando los niveles o la curva de contraste, movemos esos documentos de un cajón a otro, uniéndolos a los que allí se encontraban originalmente. Una vez hecho esto ya no hay vuelta atrás. No hay manera de saber de qué cajón vienen originalmente los documentos que nos encontramos en cualquiera de ellos en un momento dado. Cuantos más movimientos de documentos hacemos, más tienden a mezclarse y agruparse éstos en unos pocos cajones, especialmente en las luces bajas. Esto provoca una acumulación de información indiferenciada dentro de una estrecha escala tonal, que se muestra como desagradables empastes o apelmazamientos en la imagen (*posterización*). No hay que olvidar que cuando se “lee” un archivo RAW *siempre* se aplica una curva de contraste que corrige la distribución excesivamente desigual de variantes tonales entre pasos. Hemos mostrado en la tabla el resultado de un ajuste a una gama 2,2 ( $\rightarrow$ ), donde  $VTR = VT^{(1/G)}$ , siendo VTR las variantes tonales resultantes, VT las variantes tonales originales y G la gama.

## 9. Profundidad de campo y perspectiva.

La profundidad de campo es *el rango de distancias reproducidas en una fotografía impresa dentro del cual la imagen no resulta inaceptablemente menos nítida que la parte más nítida de la imagen*. Depende de cuatro factores: el círculo de confusión (y por tanto el formato y el tamaño de la impresión, además de la distancia de observación y de la capacidad resolutive de cada observador), la distancia focal, la abertura y la distancia al motivo.

Hay expresiones matemáticas alternativas para estimar la profundidad de campo. Todas las fórmulas permiten sólo aproximaciones a dicha variable, en general más exactas para distancias de enfoque de al menos diez veces la distancia focal e inferiores a la distancia hiperfocal (la distancia de enfoque que maximiza la profundidad de campo en la foto). Para distancias más cortas o más cercanas a la distancia hiperfocal las aproximaciones son peores ( $\rightarrow$ ).

La profundidad de campo (*depth of field*, DoF) puede aproximarse mediante la fórmula ( $\rightarrow$ ):

$$DoF = (2 * H * s^2) / (H^2 - s^2) \quad \text{para } H > s$$

donde  $s$  es la distancia a la que enfocamos y  $H$  es la distancia hiperfocal, que viene dada por la fórmula

$$H = L^2 / (f * CoC)$$

siendo  $L$  la distancia focal en milímetros,  $f$  la abertura y  $CoC$  el círculo de confusión para un formato determinado (que asume cierto tamaño de impresión). Dada la distancia de enfoque  $s$ , la profundidad de campo guarda una relación inversa con la distancia hiperfocal  $H$ . Por otro lado, conforme  $s$  tiende a  $H$ ,  $DoF$  tiende a infinito, y algo similar ocurre, aunque de forma menos acusada, cuando  $s$  adopta un valor muy cercano a  $L$  (macrofotografía).

Como vemos, la profundidad de campo depende de la distancia focal, de manera que, a igual distancia al motivo ( $s$ ), un objetivo gran angular a una determinada abertura ofrecerá más profundidad de campo que un teleobjetivo con esa misma abertura, si bien el motivo tendrá menor tamaño en el fotograma y el encuadre será más amplio en el primer caso. Pero si corregimos la distancia al motivo para uno de los dos objetivos, de manera que el encuadre sea el mismo, alejándonos con el teleobjetivo o acercándonos con el gran angular, la profundidad de campo será muy similar, si no igual (->). Con objetivos de focal fija, si queremos conseguir un determinado encuadre, tenemos que movernos, pero con los objetivos de focal variable solemos alterar la distancia focal reduciendo los movimientos.

Podemos decir que la profundidad de campo, *como porcentaje de la distancia al sujeto* ( $DoF * 100 / s$ ), depende *inversamente* de la distancia focal (->): si las distancias son las mismas, a *mayor* distancia focal *menor* profundidad de campo. En efecto, si hacemos  $DoF / s = G$  y mantenemos constante  $s (= s^*)$ , dado que  $G$  depende inversamente de la focal  $L$ , tendremos que si  $L_1 > L_2$ ,  $G_1 < G_2$  y por consiguiente  $DoF_1 < DoF_2$  ( $s_1 = s_2 = s^*$ ).

De igual forma, es fácil ver que hay una relación inversa entre el formato y la profundidad de campo, *si igualamos el ángulo visual*. En efecto, la profundidad de campo y la distancia hiperfocal (las variables  $DoF$  y  $H$ ) mantienen una relación inversa entre sí, por lo que, si sustituimos el círculo de confusión por otro menor (dividiendo por un factor de recorte  $q$ ), y hacemos lo propio con la distancia focal ( $L$ ), tendremos una nueva distancia hiperfocal menor que la original. En efecto,  $H_1 = L^2 / (f * CoC_1) > H_2 = (L/q)^2 / (f * CoC_2)$ , donde  $CoC_2 = CoC_1 / q$ . Obsérvese que hemos dividido el numerador de  $H_2$  por  $q^2$  pero el denominador sólo por  $q$ . Dada la relación inversa antes mencionada, un formato menor, con un círculo de confusión menor, tendrá, para el mismo ángulo visual, abertura y distancia de enfoque, mayor profundidad de campo.

Para cuantificar la relación entre profundidad de campo y formato vamos a acudir a una regla sencilla (->), que se cumple para unos valores fijos de la distancia de enfoque ( $s$ ), ángulo visual y abertura ( $f$ ), y según la cual

$$DoF \propto CoC / L^2$$

Es decir, la profundidad de campo es *proporcional* a la razón entre el círculo de confusión y el cuadrado de la distancia focal. Una vez más, la fórmula no funciona bien si la distancia de enfoque ( $s$ ) está cerca de la distancia focal ( $L$ ) o de la distancia hiperfocal ( $H$ ). Si adoptamos el ángulo visual que corresponde a un objetivo de 50mm en el formato de 35mm (47 grados de ángulo de cobertura diagonal), y una distancia de enfoque y aberturas determinadas, obtendríamos la siguiente tabla con ayuda de la fórmula anterior para tres formatos distintos. Como puede verse, las diferencias en profundidades de campo se corresponden,

aproximadamente, con los factores de recorte que relacionan los distintos formatos, de manera que la profundidad de campo es inversamente proporcional al tamaño del formato.

Formato	Factor de recorte	CoC (micras)	Distancia focal para 47 grados	CoC / L <sup>2</sup>	Profundidad de campo relativa
4/3	2	15	25	0,024	2
APS	1,5	20	33	0,018	1,5
35mm	1	30	50	0,012	1

Por tanto, en términos de factor de recorte ( $q$ ) la regla quedaría como

$$DoF \propto 1 / (q * L^2)$$

Como se ve, la distancia focal tiene un efecto más poderoso sobre la profundidad de campo (al entrar al cuadrado) que el factor de recorte, y al emplear una distancia focal menor en la cámara de formato menor (para conseguir el mismo ángulo visual) compensamos de sobra la pérdida inicial de profundidad de campo del formato menor por reducción del círculo de confusión.

A diferencia de lo que ocurre con la profundidad de campo, a igual distancia de enfoque la distancia focal *no* tiene efectos sobre la perspectiva. Ésta cambia sólo si nos movemos, como apuntamos en la cuarta sección de este documento. Si empleamos distintas longitudes focales desde el mismo punto para fotografiar un motivo la perspectiva captada será la misma (->). Sin embargo, ocurre que la distancia al motivo suele estar correlacionada positivamente con la distancia focal, de manera que a más distancia solemos emplear mayores longitudes focales, lo que nos puede llevar a pensar (erróneamente) que es la distancia focal lo que está condicionando nuestra experiencia con la perspectiva.

Recordamos que la impresión visual que tenemos de la perspectiva en una foto impresa no se verá alterada si respetamos ciertas reglas al mirarla. La distancia de observación de una foto que nos proporciona una perspectiva natural viene dada por la fórmula

$$e = L * v$$

donde  $e$  es la distancia a la que se debe contemplar la foto,  $L$  es la distancia focal y  $v (=D/d)$  son las veces que hemos ampliado el fotograma para alcanzar el tamaño de la foto impresa. A esa distancia podremos ver la foto completa sin necesidad de mover los ojos.

Si usamos un objetivo de 50mm y observamos el negativo directamente, necesitamos 50mm de distancia para evitar distorsiones en nuestra observación. Pero a menos de 250mm (25 centímetros) el ojo humano no es capaz de captar todo el detalle, por lo que habría que imprimir la foto a un tamaño al menos 5 veces superior al fotograma, es decir, a 12x18cm ó 5x7 pulgadas.

Si la distancia de observación de 25 centímetros es incómoda por demasiado próxima (peor con la edad), y queremos ver la foto a más distancia, *un tamaño de impresión mayor será necesario* para tener una perspectiva natural que no distorsione nuestra percepción de la imagen. Pero si queremos mantener el tamaño de impresión original y una perspectiva natural observando a más distancia, necesitaremos un objetivo de mayor distancia focal, siguiendo la fórmula.

Un retrato con un objetivo de 100mm hecho a dos metros del sujeto nos permite ver una foto impresa de 5 veces el tamaño del negativo a 50 centímetros. El mismo retrato con objetivo de 50mm (hecho a un metro del retratado para tener la misma foto) nos exigiría ver el resultado ampliado a sólo 25 centímetros, una distancia suficiente pero menos cómoda. Por esto, entre otras cosas, son ideales los teleobjetivos cortos para retratos.

Recordemos que un A4 requiere, redondeando, una ampliación de unas 8 veces el fotograma de 35 milímetros (24x36mm). Para mirar un A4 a una distancia de 25 centímetros con una perspectiva natural la distancia focal debería ser de unos 30mm ( $\approx 250/8$ ), mientras que para una distancia de observación de 50 centímetros la focal ideal es de unos 60mm ( $\approx 500/8$ ).

Hay un aspecto más a considerar. Es sabido que muchos objetivos tienen marcas que indican la profundidad de campo para cada abertura. ¿Cómo se ven afectadas esas marcas cuando empleamos uno de esos objetivos diseñados para el formato de 35mm sobre un sensor más pequeño?

Las marcas de profundidad de campo dependen de unos supuestos que se establecieron en los años 30, y que eran aceptables para las costumbres y limitaciones técnicas de la época (también se basan en una estimación errónea de la capacidad de discernir detalle del ojo humano). Se asume un formato de 35mm y una ampliación máxima del negativo de unas 8 veces, es decir, aproximadamente un A4, lo que determina un círculo de confusión de unas 30 micras (aunque cada fabricante asumía un valor ligeramente distinto). Sin embargo hoy se emplean frecuentemente tamaños de papel mucho mayores, y el A3 es una referencia posiblemente más razonable. Por otro lado es verdad que los objetivos, películas y sensores actuales son capaces de resolver mucho más detalle que hace 80 años, y las fotografías a mayor tamaño requieren una mayor distancia de observación. Por tanto, como indicadores aproximados esas marcas de profundidad de campo siguen siendo válidas (aunque no todo el mundo estaría de acuerdo con esto, [->](#)).

Si asumimos que las convenciones sobre el círculo de confusión son útiles en la práctica, cuando el formato del medio de captura cambia el círculo de confusión cambia también, debido a la alteración en el factor de multiplicación que hay que aplicar al detalle captado para llevarlo al papel. Con un sensor más pequeño, el detalle se amplía más. Pensemos en el caso de la Leica M8 ([->](#)), que tiene un sensor con una diagonal 1,33 veces más pequeña que la del formato de 35mm. En ese caso tenemos que  $CoC_f = CoC_d * 1,33$ , donde  $f$  indica *película* (formato 35mm) y  $d$  indica *digital* (recorte 1,33). El círculo de confusión de la Leica M8 ( $CoC_d$ ) es 1,33 veces más pequeño que el círculo de confusión de una Leica M equipada con película fotosensible ( $CoC_f$ ). Obviamente, esto afecta a la distancia hiperfocal ( $H_d = H_f * 1,33$ ) y a la profundidad de campo, dada su relación inversa con  $H$  (por tanto,  $DoF_d < DoF_f$ ). En resumen, si las demás variables son iguales, las impresiones obtenidas a partir de imágenes de la M8 mostrarán una profundidad de campo *menor* que las impresiones que proceden de película fotográfica debido al menor círculo de confusión. Una conclusión interesante es esta: cuando se recorta una fotografía digital siempre estaremos perdiendo profundidad de campo en la imagen impresa.

Pero ocurre que, por otra parte, debido al recorte en el tamaño del sensor, no todas las variables pueden ser iguales. El ángulo visual para cada distancia focal será diferente en uno y otro caso (película y sensor), y si modificamos la distancia al sujeto o la distancia focal para tener el mismo ángulo, la profundidad de campo se verá afectada una vez más.

Centrémonos en las marcas que hay en los objetivos y en su uso para pre-enfocar. La distancia hiperfocal cambia por un factor igual a 1,33 en la Leica M8, y la consecuencia es



que deben usarse las marcas de la abertura con un número inmediatamente inferior al que estamos usando. Por ejemplo, si estamos trabajando con una abertura  $f/11$ , hay que usar las marcas de  $f/8$  para seleccionar la distancia hiperfocal. El recorte de 1,33 en el sensor se corresponde con una diferencia de un paso casi exacto en cuando a profundidad de campo para cada abertura.

Veamos un ejemplo con un objetivo 35/2 M de Leica (una versión anterior a la actual, con una lente esférica). Se ha seleccionado una abertura de  $f/11$  y se está enfocando a la distancia hiperfocal, apuntando la marca derecha de  $f/11$  a infinito. En este caso la distancia hiperfocal es de 3,3 metros (para un círculo de confusión típico de 33 micras, [->](#)). La profundidad de campo iría de infinito a unos 1,7 metros en impresiones de tamaño A4 (8x12 pulgadas).



Ahora aplicamos la regla de usar las marcas del número  $f$  inmediatamente inferior para un sensor con un recorte de 1,33 y el mismo objetivo. El círculo de confusión se verá reducido a 25 micras. La abertura seguirá siendo  $f/11$ , pero las marcas empleadas para seleccionar la distancia hiperfocal serán las de  $f/8$ . La marca derecha (según la vemos en la foto) de ese número  $f$  apunta ahora a infinito, siendo la distancia hiperfocal de 4,4 metros, y abarcando la profundidad de campo de infinito a 2,2 metros.



La razón de las dos distancias hiperfocales es  $4,4/3,3 = 1,33 (= 1/0,75)$ . Por tanto, las diferencias en las distancias hiperfocales dependen de las diferencias en las diagonales de los distintos formatos.

Un recorte de 1,33 permite aplicar una regla sencilla: usar las marcas del número  $f$  inmediatamente inferior a aquel con el que estamos trabajando. Si el recorte es el típico de las cámaras Canon de formato reducido, igual a 1,6, hay que seleccionar una apertura un paso y un tercio mayor (un número  $f$  menor) ( $\rightarrow$ ,  $\rightarrow$ ). Es fácil hacer los cálculos para cámaras con otros recortes en sus formatos de captura (relativos al formato de cobertura del objetivo).

## 10. Consideraciones adicionales sobre las diferencias entre formatos.

Olympus ha propuesto un nuevo formato, llamado Cuatro Tercios ( $\rightarrow$ ), relativamente pequeño pero aprovechado al límite, basado en objetivos con unas excelentes prestaciones gracias a un diseño de gran calidad (de tipo *telecéntrico* en el plano de la imagen, que supone situar la pupila *de salida* en el infinito,  $\rightarrow$ ,  $\rightarrow$ ,  $\rightarrow$ ). La telecentricidad depende de tres factores: un diseño óptico que favorece un tránsito paralelo de los haces de luz; la distancia de la última lente al plano focal (que varía en los objetivos de distancia focal variable); y el diámetro de esa última lente (limitado por el de la montura).

El concepto de Olympus hace posible proporcionar un nivel de resolución y contraste similar al de formatos mayores *en impresiones de tamaño moderado* (A4 o menores). Olympus tomó en 1999 ( $\rightarrow$ ) como punto de referencia la calidad de imagen potencial del formato APS-C –que en aquel momento casi todos consideraban el nuevo estándar– o de la película de 35mm. Probablemente tenían también en mente los equipos cinematográficos para formato 35mm como modelo, en el sentido de hacer del sistema óptico el eslabón fuerte de la cadena. El tamaño del sensor es de 13,5x18mm (de proporciones  $2:2,7 = 1:1,35$ ), que tiene

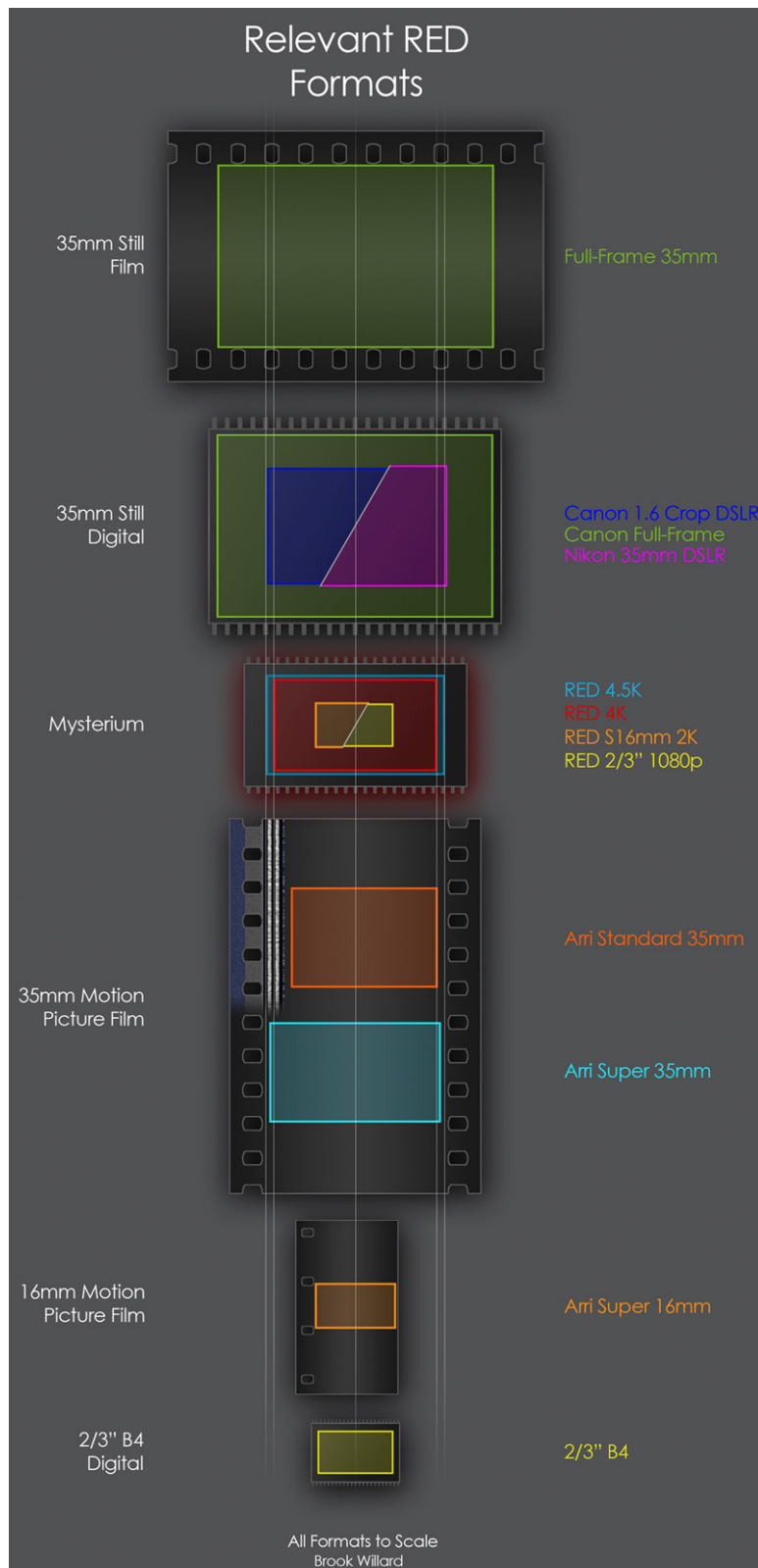
3,6 veces menos superficie que el sensor de formato 35mm sin recorte y una diagonal de 22,5mm.

Aunque el soporte filmico para el formato fotográfico de 35mm y para el formato cinematográfico de filmación es el mismo, el tamaño del negativo es distinto, ya que el recorrido de la película es horizontal en el primer caso y vertical en el segundo (salvo excepciones como el *VistaVision*, que se sigue usando hoy día para rodar escenas con efectos especiales). Los formatos cercanos al APS-C y al Cuatro Tercios, curiosamente, acercan el cine y la fotografía en este aspecto. Las distintas variantes cercanas al formato APS-C son en cierto sentido más *cinematográficas*, en el sentido de más cercanas en tamaño al *35mm Academy Aperture* (16x21,95mm, de proporciones 1:1,37 y diagonal 27,2mm), y los cineastas se sentirán cómodos con los parámetros asociados al mismo (por ejemplo, con la relación entre distancia focal y ángulo visual de los objetivos). En cambio, el Cuatro Tercios tiene *proporciones* más parecidas al *35mm Academy*, pero el tamaño del formato de captura es algo menor.

El formato *35mm Academy Aperture* es de captura, y proviene de una especificación de Thomas Edison (24,89x18,67mm, proporciones 1:1,33 y diagonal de 31,1mm) empleada en el cine mudo, que después (en 1932) se corrigió para incluir una banda de sonido, reduciéndose el tamaño y alterándose ligeramente las proporciones. Otra cosa son las proporciones de salida (o de proyección), muy distintas, y variadas. Van desde el 3:4 (o 1:1,33) para televisión a los rectangulares para salas de cine, de proporciones 1:1,66 (usual en Europa), 1:1,78 (nuevo estándar para cine y televisión, también conocido como 16:9), 1:1,85 (más usual en Estados Unidos) o incluso 1:2,35 (CinemaScope) (->). Esas proporciones se pueden conseguir de dos formas: enmascarando el negativo en el momento de proyectar (->), o enmascarándolo en el momento de filmar. Lo primero ha sido más usual en Estados Unidos, y lo segundo en Europa. Para colmo, hay formatos que emplean procedimientos más complicados, como el *Super 35mm*, que recupera el formato de Edison para ganar superficie (un 32%) y lo recorta después para ganar rectangularidad (24,4 x 13,7mm), llegando incluso a unas proporciones 1:2,39 (con lo que queda un área de captura de sólo 10x24mm, diagonal de 26mm), lo que permite comprimir lateralmente la imagen en el laboratorio y conseguir un resultado similar al que permiten los objetivos anamórficos, pero evitándolos (eso sí, a cambio de un área de captura menor). Este formato *Super 35mm* (S35mm) está muy extendido en las modernas cámaras cinematográficas digitales, como las [RED](#). Por tanto, ni las proporciones ni el tamaño del *35mm Academy* son el único punto de referencia a tener en cuenta.

	Proporciones	X	Y
Academy Aperture (captura)	1,37:1	22.0mm (0.827")	16.0mm (0.600")
Widescreen Academy (proyección)	1,85:1	21.0mm (0.825")	11.3mm (0.446")
Super 35 (captura)	1,33:1	24.92mm (0.981")	18.67mm (0.735")
Cinemascope (captura)	2,39:1	20.95mm (0.827")	17.53mm (0.689")

Visualmente:



Los sensores de 12 millones de fotocélulas de las cámaras Olympus tienen la frecuencia de muestreo más elevada conocida en cámaras réflex (superando los 100 pares de píxeles por milímetro). Olympus [considera](#) que esta resolución es suficiente, lo que coincide con el antiguo gráfico de Kodak para el sistema Cuatro Tercios (véase más abajo). 12MP en un sensor 4/3 implica una altísima densidad, que llevada a superficies más grandes daría...

APS-C (recorte 1.6x, Canon): 17.5MP  
APS-C (recorte 1.5x, Nikon, Pentax, Sony): 19.8MP  
APS-H (recorte 1.3x, Canon, Leica): 29.2MP  
35mm (sin recorte): 46.1MP[QUOTE]

El sistema está basado en la idea de una montura de gran diámetro y distancia respecto al sensor, en proporción a la diagonal de éste. La distancia entre la montura y el plano focal (*lens to flange distance*, LTF) es, en el estándar 4/3, de 38,7 milímetros, mientras que el diámetro del círculo de luz (diagonal del sensor) es de 22,6 milímetros, siendo la proporción igual a 1,71 ( $= 38,7/22,6$ ). El diámetro de la montura es *el doble* del diámetro del círculo de luz, y no ligeramente mayor, como en los sistemas convencionales, con lo que se relaja una restricción que afecta al diámetro de la última lente de los objetivos. La montura 4/3 es mecánicamente una copia de la montura OM, con una distancia montura-plano focal más corta. Por ello el adaptador 4/3-OM es un simple tubo de extensión (->).

Como sabemos, en el formato de 35mm el diámetro del círculo de luz es de 43 milímetros, mientras que la distancia de la montura al plano focal depende de cada fabricante, siendo de 47 milímetros en el sistema R de Leica (proporción igual a 1,09), de 28 milímetros en el sistema M de Leica (cámaras telemétricas, sin espejo, proporción igual a 0,65), de 44 milímetros en el sistema EOS de Canon (proporción igual a 1,02) y de 46,5 en el sistema réflex de Nikon con montura F (proporción de 1,08) (->).

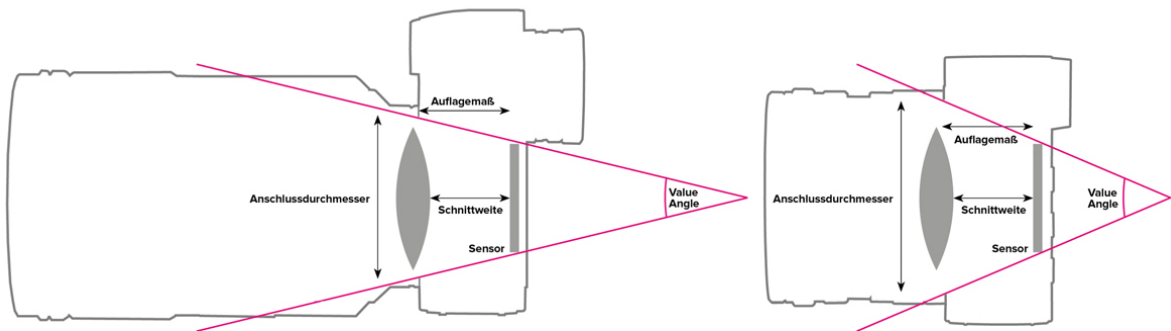
Los parámetros del estándar 4/3 garantizan una escasa inclinación de los haces de luz, que inciden perpendicularmente sobre la superficie del sensor. Es exactamente la misma idea que lleva a Nikon a defender un formato reducido (llamado DX, una variante de APS de dimensiones 23,6x15,8mm) para sus réflex digitales, conservando la montura (el diámetro del círculo de cobertura pasa a ser de 28,4mm, y la proporción 1,64). Los recortes en el tamaño de los sensores incrementan esa proporción, que puede considerarse un *factor de telecentricidad* potencial del sistema. Sin embargo, esa mayor distancia relativa de la montura respecto al plano focal obliga a adoptar diseños *retrofoco* (como sabemos, un teleobjetivo vuelto del revés, por explicarlo de forma simple y gráfica) para todos los objetivos gran angulares. Dichos diseños son complejos, requieren más lentes e implican objetivos de más tamaño y peso, resultando más difícil conseguir luminosidades altas (números *f* bajos), aunque facilitan la telecentricidad. Como vemos, la valoración de la conveniencia de ésta depende de cada fabricante. Con su formato de 35mm sin recorte Canon considera suficiente una proporción igual a 1 y Leica ha encontrado la forma de cumplir con sus criterios de calidad en la M8 (factor de recorte  $q = 1,33$ ) con una proporción de 0,86 ( $= 0,65 * 1,33$ ). En cambio, en su día Nikon y Olympus la elevaron por encima de 1,5, sacrificando las dimensiones de sus formatos (factores de recorte de 1,5 y 2 respectivamente), aunque Kodak ha fabricado cámaras réflex con la montura F de Nikon y sensores de formato 35mm sin recorte. La siguiente tabla resume estos datos:

Montura y formato	Distancia montura-sensor (mm)	Diagonal del sensor (mm)	Coefficiente de telecentricidad
	A	B	C = A/B
Nikon F/35mm	46,50	43,3	1,07
Nikon F/DX	46,50	28,4	1,64
Canon EOS/35mm	44,00	43,3	1,02
Canon EOS/APS-C	44,00	27,0	1,63
Contax N/35mm	48,00	43,3	1,11
Pentax K/35mm	45,46	43,3	1,05
Pentax K/APS-C	45,46	28,3	1,61
Minolta AF/35mm	44,50	43,3	1,03
Minolta AF/APS	44,50	28,4	1,57
Olympus OM/35mm	46,00	43,3	1,06
Olympus 4/3	38,67	22,5	1,72
Leica R/35mm	47,00	43,3	1,09
Leica R/1.37 crop	47,00	31,7	1,48
Leica M/35mm	27,95	43,3	0,65
Leica M/1.33 crop	27,95	32,4	0,86

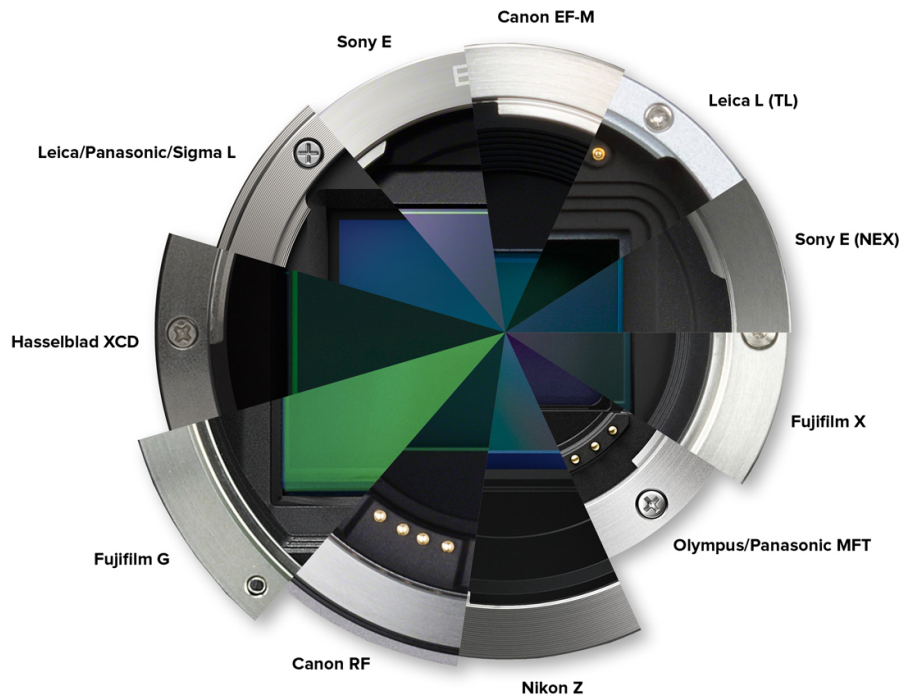
El volumen de un objetivo relativo al diámetro de su círculo de luz es una restricción muy poderosa con la que el diseñador óptico tiene que trabajar. Los Zuiko de Olympus son pequeños comparados con objetivos equivalentes diseñados para el formato de 35mm, pero muy voluminosos comparados con la diagonal del sensor que cubren. A continuación puede verse un Canon 28-70mm f/2,8 L comparado con un Zuiko 14-54mm (equiv. 28-100mm) f/2,8-3,5. Como puede apreciarse, la diferencia de tamaños es notable, pero en proporción al sensor que cubre con su círculo de luz, el Zuiko de Olympus es un objetivo enorme. No podía ser de otra forma, si tenemos en cuenta que, para ser competitivo, el formato 4/3 tiene que resolver el mismo detalle que formatos más grandes en menos espacio (mayor capacidad resolutive), y ello con un rango de aberturas más limitado (no es aconsejable cerrar más allá de f/11), lo que obliga a alcanzar un alto grado de corrección de las aberraciones. Esta es otra de las causas por las que resulta complicado desarrollar objetivos muy luminosos de focal corta para este formato.

En 2019 Fuji presenta el *valor angular* (Value Angle) como indicador del grado de dificultad al que se enfrenta un diseñador óptico para cámaras digitales de un determinado sistema. El *valor angular* es función de la diagonal del sensor, del diámetro de la montura y de la distancia entre ambos elementos. Dos haces deben unir el borde del sensor con el borde interior de la montura y converger en un punto tras el sensor. En ángulo que forman es el valor angular, y cuanto mayor es este La siguiente tabla presenta los valores para distintas monturas actuales:

	Hersteller	Value Angle	Format	Durchmesser	Auflagemaß	Sensordiagonale	Anschluss
1	Canon	<b>55,12</b>	APS-C	47,0	18,0	28,2	EF-M
2	Leica	<b>54,47</b>	APS-C	48,8	20,0	28,2	L (TL)
3	Sony	<b>52,85</b>	APS-C	46,1	18,0	28,2	E (NEX)
4	Fujifilm	<b>48,08</b>	APS-C	44,0	17,7	28,2	X
5	Olympus/Panasonic	<b>46,15</b>	FourThirds	38,0	19,3	21,6	MFT
6	Nikon	<b>40,26</b>	Kleinbild	55,0	16,0	43,3	Z
7	Canon	<b>30,03</b>	Kleinbild	54,0	20,0	43,3	RF
8	Fujifilm	<b>21,67</b>	44 x 33 mm	65,0	26,7	54,8	G
9	Hasselblad	<b>17,68</b>	44 x 33 mm	61,0	20,0	54,8	XCD
10	Leica/Panasonic/Sigma	<b>15,74</b>	Kleinbild	48,8	20,0	43,3	L
11	Sony	<b>8,99</b>	Kleinbild	46,1	18,0	43,3	E



Die Formel, die Entwicklerherzen schneller schlagen lässt: 
$$\text{Value Angle} = 2 \times \arctan \left( \frac{2 \times \text{Auflagemaß}}{\text{Anschlussdurchmesser} - \text{Sensordiagonale}} \right)$$

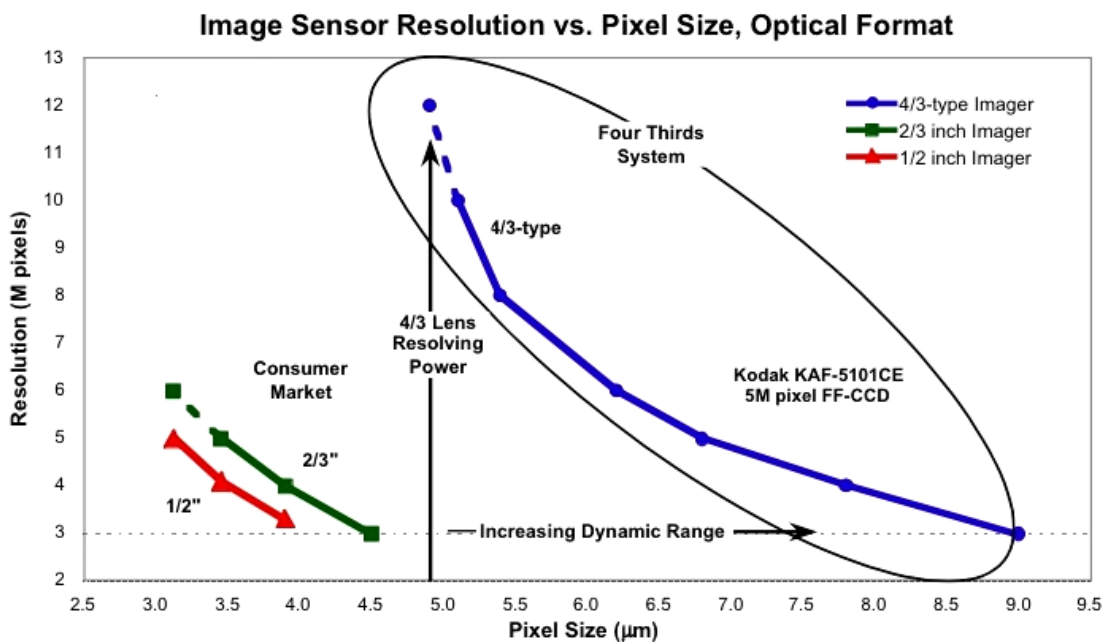




*Canon 28-70mm f/2,8 L vs. Zuiko 14-54mm (equiv. 28-108mm) f/2,8-3,5 ([Valentín Sama](#))*

Las restricciones en cuanto a número de ‘píxeles’ admisibles por los sensores y el rendimiento a altas sensibilidades (valores ISO) son las mayores limitaciones del formato. Lo mismo podría decirse de otras cámaras con sensores más pequeños que el fotograma de 35mm equipadas con objetivos diseñados específicamente para ellos. Por tanto, es posible compensar un menor tamaño de sensor con una buena óptica, pero sólo hasta cierto punto, dependiendo de la diferencia de tamaño entre sensores y del tamaño de la impresión. Recomendamos una interesante reflexión de Lars Kjellberg sobre comparación de formatos ([->](#)), y un análisis de Erwin Puts sobre la importancia relativa de los objetivos en el medio digital ([->](#)).

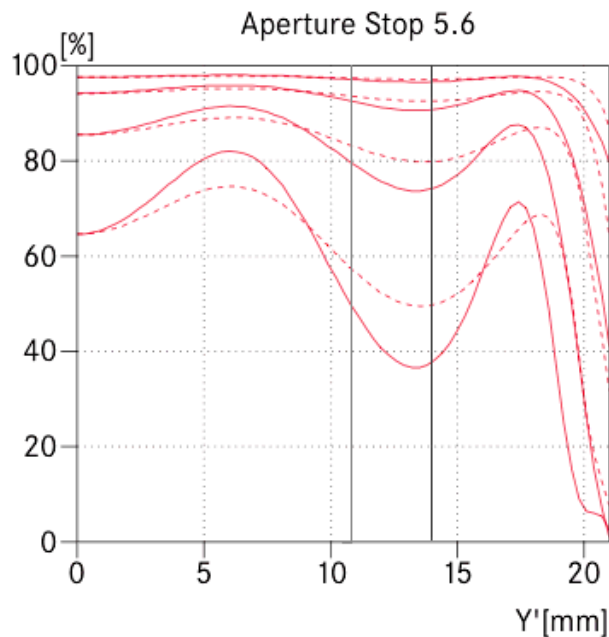




Los límites previstos del sistema Cuatro Tercios de Olympus ([Kodak©](#)).

Por otro lado, supeditar el diseño de un sistema al objetivo de conseguir una escasa inclinación de los haces de luz que inciden en el sensor podría tener sentido al principio de la revolución digital, pero la tecnología ha avanzado y las microlentes permiten incluso el desarrollo de cámaras telemétricas digitales, por no hablar de cámaras con sensores de 24x36mm que ofrecen un rendimiento igual o mejor que la película química en lo que a viñeteo se refiere. Véase [esta](#) prueba de una Canon 1Ds con un 16-35mm f/2,8L a 16mm, o [esta](#) que compara los resultados de la Canon 5D y la Canon 20D con un zoom EF 24-70mm f/2,8L y EF 50mm f/1,4.

Nos detendremos un poco más en este tema de la diferencia entre formatos para tratar de profundizar un poco más en él. Observemos el siguiente gráfico, que representa unas curvas MTF clásicas, radiales y tangenciales para cuatro resoluciones básicas (5, 10, 20 y 40 pares por milímetro), con el nivel de contraste en el eje de ordenadas (vertical) y la distancia respecto al centro del círculo de imagen en el eje de abscisas (horizontal). El objetivo es un Noctilux-M 50mm f/1 de Leica, que cubre con su círculo de luz un fotograma de paso universal, cuyo radio es de 21,6 milímetros. Puede observarse cómo, incluso para una abertura moderada de f/5,6, el nivel de contraste se deteriora sensiblemente hacia las esquinas. Si empleáramos una película o sensor de tamaño menor ese deterioro se evitaría (->). Hemos trazado dos líneas verticales, una situada aproximadamente a los 11,3 milímetros, que es el radio del círculo de luz de un objetivo de formato 4/3, y otra a 14,4 milímetros, el radio de un círculo de luz adaptado a un sensor de formato APS (16x24 mm). Puede observarse cómo el nivel de contraste transmitido por el objetivo en las esquinas de esos sensores es muy superior al nivel de contraste en las esquinas del sensor sin recorte. Con algunas aberraciones ocurre exactamente lo mismo.

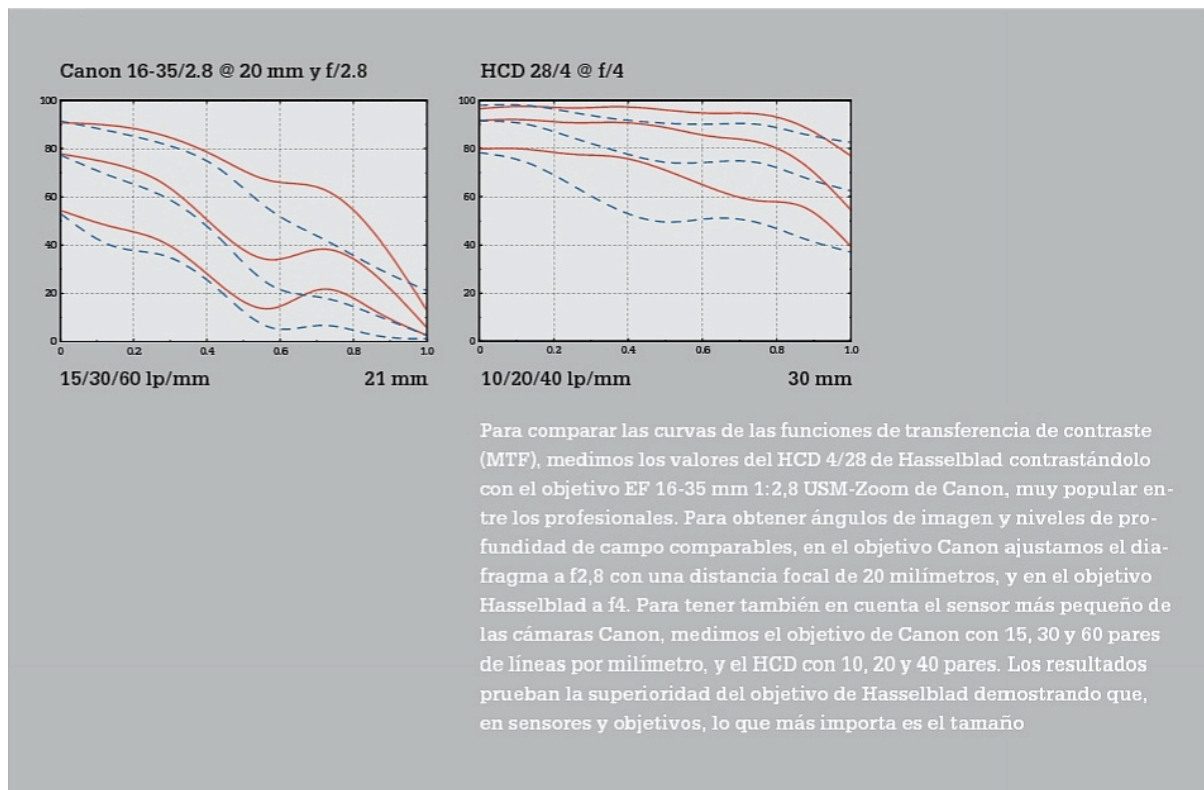


Curvas MTF de una Leica Noctilux 50mm f/1 a una abertura de f/5,6 ([Leica Camera AG](#)©).

El argumento es válido, pero incompleto, pues la otra forma de representación de las MTF, con la resolución en el eje horizontal en vez de la distancia al centro del fotograma, nos cuenta la otra mitad de la historia: un formato mayor necesita resolver *menos* detalle en el sensor (o la película) para alcanzar un determinado nivel de detalle en la impresión, como hemos explicado ya. Dicho de otro modo, para poder comparar con un formato más pequeño habría que trazar para éstas curvas de transferencia de contraste *equivalentes* que tengan en cuenta la mayor ampliación a que se somete la imagen de un formato menor para una impresión dada (->). Lo usual es encontrarse con curvas de transferencia de contraste para 5, 10, 20, 30 y 40 pares por milímetro o cualquier selección de esos números en el caso de objetivos para el formato 35mm. Obsérvese que 40 dividido por 8 (factor de ampliación) nos da 5 pares por milímetro en una impresión 8x12, que es más de lo que el ojo humano puede resolver a simple vista.

Para poder comparar esas curvas con las de un objetivo APS hay que tener en cuenta el factor de recorte ( $q = 1,5$ ) de manera que las correspondencias serían 7,5, 15, 30, 45 y 60 pares por milímetro. Los objetivos de formato 4/3 ( $q = 2$ ) pueden ver comparadas sus curvas MTF con las del formato de 35mm si se trazan para 10, 20, 40, 60 y 80 pares por milímetro. Sin embargo, Nikon sólo presenta curvas para 10 y 30 pares en su documentación de los objetivos DX (->), que corresponderían a curvas para 7 y 20 pares en formato 35mm. Por su parte, Olympus sólo las ofrece a 20 y 60 pares por milímetro (->) para sus objetivos Zuiko, que serían comparables sólo con curvas trazadas para 10 y 30 pares en formato 35mm.

Hasselblad lo explica así al comparar su objetivo 28mm f/4 con un Canon 16-35mm f/2,8 (a 20mm) en la revista Víctor (1/2008):



En principio, las curvas *equivalentes* de los formatos más pequeños estarán situadas *por debajo* de las correspondientes al formato más grande, pues se miden o calculan para resoluciones superiores. Un ejemplo extremo serían los objetivos de las cámaras compactas, que deben alcanzar altísimas resoluciones, y ello con aberturas relativamente grandes, pues no es posible dotarlos de números *f* muy altos (aberturas muy cerradas), por lo que el grado de corrección de aberraciones debe ser también muy elevado.

Si hablamos de un objetivo diseñado para un formato mayor y empleado en un formato menor, *dos* son los efectos del recorte a tener en cuenta. Primero, los bordes del círculo de luz se descartan, con lo que nos quedamos con un círculo de luz más pequeño, donde el rendimiento del objetivo es mayor. Segundo, por otro lado, las curvas relevantes para resolver determinado nivel de detalle son otras, trazadas para resoluciones superiores y situada bajo las curvas originales, como hemos visto. El efecto conjunto, que es el rendimiento del objetivo sobre el formato recortado, es *muy diferente* del rendimiento sobre el formato original, como explica detalladamente Erwin Puts (->).

Podemos volver a una fórmula, presentada ya en la primera sección, según la cual la resolución del sensor, vendrá dada por la resolución que queremos en el papel multiplicada por la razón de las diagonales de la impresión y el formato de captura, sólo que esta vez fijamos un formato de referencia e introducimos un factor de recorte

$$R_s = r_f * (D/d_1) * q$$

donde  $R_s$  es la resolución que debe alcanzar el sistema (objetivo y sensor) en pares por milímetro,  $r_f$  es la resolución final en el papel en pares por milímetro,  $D$  es la diagonal de la fotografía impresa,  $d_1$  la diagonal del fotograma o sensor de referencia (que puede ser 43mm) y  $q (= d_1/d_2)$  el factor de recorte del formato en que estemos interesados respecto del

formato de referencia. Es obvio que cuanto mayor sea  $q$  mayor tendrá que ser también  $R_s$  dados unos valores cualesquiera para las otras dos variables. Ese menor esfuerzo resolutivo de los formatos más grandes se traduce generalmente en mayores niveles de contraste para una resolución cualquiera en el papel impreso, o en resoluciones superiores para un nivel de contraste dado.

No obstante, se dice que los formatos pequeños pueden presumir de una ventaja interesante en teleobjetivos respecto de los formatos mayores, aunque, como todo, es una verdad a medias que hay que matizar.

En efecto, dado que la abertura regula no sólo la cantidad de luz que puede acceder al sensor por unidad de tiempo, sino también la profundidad de campo, la proclamada ventaja sería esta: para conseguir un mismo ángulo visual y una misma profundidad de campo, el formato menor requiere una focal menor y una mayor abertura que el formato mayor, y por tanto consigue la profundidad de campo deseada con un tiempo de exposición menor (o con una sensibilidad equivalente ISO menor).

En general, podemos decir que hay que *dividir la abertura por el factor de recorte* para hallar la 'abertura equivalente' (en términos de 'profundidad de campo'), de la misma forma que se hace con la 'distancia focal equivalente' (en términos de 'ángulo visual').

Las fórmulas para la profundidad de campo introducidas en la sección 6 muestran esto con toda claridad. Allí vimos que la profundidad de campo dependía de la distancia a la que enfocamos ( $s$ ) y de la distancia hiperfocal ( $H$ ), que venía dada por  $H = L^2 / (f * CoC)$ . Imaginemos dos formatos cualesquiera para los que  $CoC_2 = CoC_1 / q$ , donde  $q (=d_1/d_2 > 1)$  es el factor de recorte. Es obvio que las distancias hiperfocales se igualarán si dividimos la distancia focal y la abertura por  $q$  para el formato menor, de manera que  $H = L^2 / (f * CoC_1) = (L/q)^2 / [(f/q) * CoC_2]$ . Por consiguiente, igualando el ángulo visual y tomando una abertura proporcional al factor de recorte, *las dos cosas*, dada una distancia de enfoque, igualamos las profundidades de campo.

Tenemos pues que una abertura  $f/2$  en un objetivo para el formato 4/3 de Olympus ( $q = 2$ ) *equivale en términos de profundidad de campo* a una abertura  $f/4$  en un objetivo de 35mm sobre un sensor de ese formato sin recorte, dado un mismo *ángulo visual*. Para conseguir el control sobre la profundidad de campo que da una abertura  $f/2$  en el formato de 35mm, un objetivo 4/3 con ángulo visual equivalente necesitaría una abertura  $f/1$ . Por ejemplo, un 28mm  $f/2$  en formato de 35mm equivaldría, en cuanto a ángulo visual y profundidad de campo, a un 14mm  $f/1$  en formato 4/3; pero también un 200mm  $f/2,8$  en paso universal equivaldría a 100mm  $f/1,4$  en 4/3.

Por tanto, la única ventaja de los formatos menores, en cuanto a profundidad de campo, es que si necesitas más, el formato menor te la puede brindar con una abertura mayor, lo que posibilita reducir el tiempo de exposición o utilizar una sensibilidad equivalente ISO menor en el sensor. Esta parte de la historia, por tanto, es cierta. Sin embargo, si bien los formatos más pequeños ofrecen menores ángulos de visión con mayor luminosidad, también es verdad que no pueden igualar esa oferta para los grandes angulares, como muestra la siguiente tabla de objetivos *actualmente en producción*:

	Canon	Nikon DX	Olympus 4/3
Formato:	24 x 36mm	15,8 x 23,6mm	13,5 x 18mm
Recorte respecto al formato de 35mm	$q = 1$	$q = 1,5$	$q = 2$
Distancia focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos rectilíneos	12mm (Sigma 12-24/4,5-5,6) (->) 14mm (Canon 14/2,8L) (->)	18mm (Sigma 12-24/4,5-5,6) (->) 18mm (Nikon 12-24/4,0) (->)	14mm (Zuiko ED 7-14/4,0) (->)
Distancia focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos f/1,4	24mm (Canon 24/1,4L) (->) 35mm (Canon 35/1,4L) (->)	42mm (Nikon 28/1.4) (->)	50mm (Leica D 25/1,4) (->) 60mm (Sigma 30/1,4) (->)
Distancia focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos f/2	28mm (Canon 28/1,8) (->) 35mm (Canon 35/2,0) (->)	52,5mm (Nikon 35/2) (->)	70mm (Zuiko 35-100/2,0) (->) 48mm (Sigma 24/1,8) (->)
Distancia focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos descentrables	24mm (Canon 24/3,5L Tilt and Shift) (->)	157,5mm (Nikon 105/2 DC) (->)	-
Distancia focal más larga en términos del formato de 35mm	1.200mm (Canon f/5,6L) (->)	900mm (Nikon 600/4,0) (->)	600mm (Zuiko 300/2,8) (->) 1.600 mm (Sigma 300-800/5,6) (->)
Distancia focal más larga en términos del formato de 35mm para objetivos f/2	135mm (Canon 135/2,0L) (->)	300mm (Nikon 200/2,0) (->)	300mm (Zuiko 150/2,0) (->)
Distancia focal más larga en términos del formato de 35mm para objetivos f/2,8	400mm (Canon 400/2,8L) (->)	600mm (Nikon 400/2,8) (->)	600mm (Zuiko 300/2,8) (->)

Además, no hay que precipitarse y suponer que una mayor luminosidad del objetivo implica necesariamente una mayor razón señal-ruido (->). Recordemos que los valores para una exposición correcta son los mismos independientemente del formato. Por tanto, si el exposímetro nos da un par de valores (apertura-tiempo de exposición), éstos serán válidos para cualquier cámara.

A igual apertura, bajo el supuesto de una *transmisión lumínica* igual (ver 1.1), la cantidad relativa de luz que alcanza el sensor en formatos diferentes por unidad de tiempo viene determinada por el factor de recorte  $q$ , es decir, en un segundo y a una apertura de f/2 un sensor de formato 4/3 recogerá  $1/q^2 = 4$  veces menos luz que un sensor de formato 35mm sin recorte, donde  $q$  es la razón entre las diagonales de los sensores en este caso ( $q = 2$ ). Así pues, si el número de píxeles es el mismo, los formatos más pequeños construyen una imagen final *de igual tamaño* a partir de mucha menos información. Ningún avance en electrónica puede cambiar esto. La fórmula sería

$$SNR_2 = SNR_1 / q^2 = SNR_1 / (d_1/d_2)^2$$

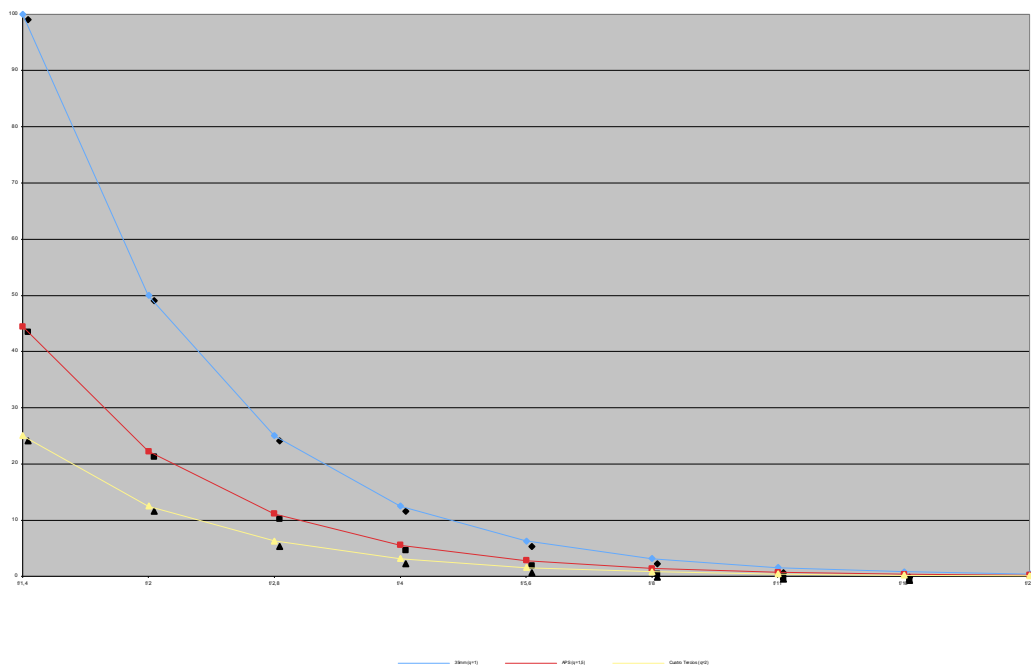
donde  $SNR$  es la razón señal-ruido,  $q$  es el factor de recorte, igual a la razón de las diagonales de los formatos ( $d_1$  y  $d_2$ , donde  $d_1 > d_2$ ), suponiendo que el número de píxeles es el mismo y que todos los factores que afectan a la razón señal-ruido distintos del ruido fotónico (*photon noise*) no cambian con el formato. Es obvio que el deterioro de la razón

señal-ruido por píxel se agrava aún más cuando se emplean mayores sensibilidades (valores ISO superiores, [->](#)) en los formatos más pequeños.

Por consiguiente, la única forma de igualar, para cada abertura, la cantidad de luz que llega a cada 'píxel' sería reducir el número de estos en los formatos menores por un factor de  $1/q^2$ . Por ejemplo, un sensor de tipo 4/3 debería tener *cuatro veces menos 'píxeles'* –es decir, ¡la misma frecuencia de muestreo!– que un sensor de formato 35mm sin recorte, para de esa forma garantizar la misma cantidad de señal en cada celdilla.

Volviendo a un ejemplo previo, una cámara con un sensor de formato 4/3 y un objetivo 100mm f/1,4 sería equivalente a otra con un sensor de formato 35mm y un objetivo de 200mm f/2,8 en términos de ángulo visual, profundidad de campo y razón señal-ruido sólo si además el número de 'píxeles' de la primera es cuatro veces menor al de la segunda, aunque en ese caso la resolución no sería ya la misma. *Una equivalencia completa entre formatos es imposible.*

Hay que señalar algo más: conforme se cierra el diafragma la cantidad de luz recogida se reduce rápidamente en todos los formatos y las diferencias relativas entre formatos *tienden* a desaparecer, es decir, con aberturas de f/16 en adelante las diferencias entre los formatos se hacen muy pequeñas, en lo relativo a profundidad de campo y *señal recibida en cada píxel*. El siguiente gráfico muestra cómo la cantidad total de luz transmitida al sensor por unidad de tiempo cae al cerrar el diafragma, pero también, lógicamente, con el tamaño del sensor (suponemos la misma *transmisión lumínica* para cada objetivo, concepto que vimos en 1.1). Hemos comparado tres formatos.



Índices del total de luz transmitida (100 es la cantidad correspondiente al formato de 35mm a f/1,4) ([Leica Fotografie International©, LFI, 3/2006](#)).

La siguiente tabla muestra los cálculos, para los que hemos aplicado la sencilla regla de multiplicar los valores para el formato de 35mm por  $1/q^2$  para pasar a un formato menor, donde  $q$  es el factor de recorte o razón entre las diagonales de los formatos. Hemos supuesto una misma distancia focal equivalente (la que sea). Los valores de la columna dedicada al formato de 35mm están normalizados, pues se le ha asignado un valor 100 a la primera casilla, dividiendo cada valor por 2 para obtener el siguiente (cada paso de diafragma reduce la cantidad de luz por unidad de tiempo y superficie en la mitad, como vimos en su momento). Obsérvese que la diferencia en términos absolutos entre formatos se reduce conforme cerramos el diafragma y que el valor absoluto para los formatos más pequeños tiende a cero rápidamente (y esta es *otra* de las causas, además del tamaño del círculo de confusión, por las que éstos no alcanzan números  $f$  muy altos).

	(1)	(2)	(3)	
Abertura	35mm ( $q=1$ )	APS ( $q=1,5$ )	Cuatro Tercios ( $q=2$ )	Diferencia (1) - (3)
f/1,4	100	44,4	25	75,0
f/2	50,0	22,2	12,5	37,5
f/2,8	25,0	11,1	6,3	18,8
f/4	12,5	5,6	3,1	9,4
f/5,6	6,3	2,8	1,6	4,7
f/8	3,1	1,4	0,8	2,3
f/11	1,6	0,7	0,4	1,2
f/16	0,8	0,3	0,2	0,6
f/22	0,4	0,2	0,1	0,3

*Alteración del índice de cantidad de luz transmitida (formato 35mm, f/1,4) en función de los distintos formatos y las aberturas.*

La profundidad de campo está estrechamente relacionada con estos valores de transmisión efectiva de luz. Obsérvese que un sensor de formato Cuatro Tercios recibe por unidad de tiempo a f/2 la misma cantidad de luz que un sensor 24x36mm a f/4. Las profundidades de campo se igualan para los pares de formato y apertura en los que esos índices de transmisión lumínica son también iguales.

Para más detalles puede consultarse el excelente artículo de Peter Karbe, citado al final, o una referencia indispensable de R. N. Clark (->).

Para resumir, diremos que hay cuatro parámetros básicos en la comparación de dos formatos: *ángulo visual*, determinado por la focal real relativa a la diagonal del sensor; *luminosidad*, determinada por la apertura máxima; *profundidad de campo*, que depende de apertura, distancia al motivo, focal, formato y tamaño de impresión; y *razón señal-ruido*, que depende (simplificando) del número de fotones capturado en cada 'píxel'. Estos dos últimos factores están íntimamente ligados a la variable 'transmisión de luz', que es la cantidad de luz que el objetivo transmite al conjunto del sensor por unidad de tiempo. Una equivalencia *total* entre formatos es imposible.

Volvamos a tomar ahora, y para cerrar, el tema de la resolución. Se ha considerado, a partir de estudios empíricos de Zeiss, que 40 lp/mm de detalle real era un valor clave para la percepción de calidad en una imagen fotográfica, para el formato de 35mm e incluso el formato medio (->). Podríamos emplear el argumento del círculo de confusión para fundamentar los cálculos, como se suele hacer normalmente (->), y como vimos ya en la primera sección. El teorema de Nyquist obliga a sobremuestrear, pero no sabemos cuánto. Depende del motivo, de la interpolación Bayer, y de muchos factores más. R. N. Clark habla

en su ejercicio de triplicar la frecuencia Nyquist (x3) al escanear un patrón de pares de líneas, nada menos (el teorema de Nyquist *no* se aplica tal cual a estos casos). Normalmente, en motivos típicos fotográficos, es suficiente con aplicar un factor x1,5. Nosotros hemos elaborado una tabla comparativa de formatos con distintos casos, bajo el supuesto de un sensor monocromático: la resolución necesaria para resolver esos 40 lp/mm (o equivalentes) bajo el supuesto de que la frecuencia Nyquist es suficiente (2 píxeles para un par de líneas), con 1,5 veces la frecuencia Nyquist (3 píxeles para un par de líneas) y con el doble de la frecuencia Nyquist (4 píxeles para un par de líneas) como caso extremo; y también hemos considerado que una buena razón señal-ruido sea la prioridad; o que lo sea un determinado número de píxeles para una impresión directa con determinado tamaño y resolución. Cada formato multiplica o divide el requerimiento de resolución con su factor de recorte respecto al formato de 35mm. La siguiente tabla presenta los resultados de la comparativa.

Prioridad	Objetivo	Cuatro Tercios (13,5x18)			APS-C (16x24)			35mm (24x36)			MF (36x48)		
		p/mm	$\mu$	MP	p/mm	$\mu$	MP	p/mm	$\mu$	MP	p/mm	$\mu$	MP
40 lp/mm de detalle real	x1 Nyquist ratio	<b>160</b>	6,3	6,2	<b>120</b>	8,3	5,5	<b>80</b>	12,5	5,5	<b>60</b>	16,7	6,2
	x1.5 Nyquist ratio	<b>240</b>	4,2	14	<b>180</b>	5,6	12,4	<b>120</b>	8,3	12,4	<b>90</b>	11,1	14
	x2 Nyquist ratio	<b>320</b>	3,1	25	<b>240</b>	4,2	22	<b>160</b>	6,3	22	<b>120</b>	8,3	25
Buena razón señal / ruido	6 $\mu$ de espaciado	166,6	<b>6</b>	6,75	166,6	<b>6</b>	10	166,6	<b>6</b>	22	166,6	<b>6</b>	48
	5 $\mu$ de espaciado	200	<b>5</b>	9,7	200	<b>5</b>	15,4	200	<b>5</b>	34,6	200	<b>5</b>	69
Tamaño de foto	Suficiente para un A4 a 300ppp	190	5,3	<b>8,7</b>	150,8	6,6	<b>8,7</b>	100,6	9,9	<b>8,7</b>	71,4	14	<b>8,7</b>
	Suficiente para un A3 a 300ppp	267,4	3,7	<b>17,4</b>	212,8	4,7	<b>17,4</b>	142	7,1	<b>17,4</b>	100	10	<b>17,4</b>

Se argumenta que el valor empírico de los 40 pares por milímetro, o el cálculo basado en el círculo de confusión de cada formato, no es una aproximación razonable cuando se trata de tener en cuenta *la capacidad límite de un sistema*. Además, como explicamos en su momento, los valores aceptados para el círculo de confusión son muy discutibles, como lo son los valores de agudeza visual que los soportan, por no hablar del cambio de costumbres en lo que toca al tamaño de impresión usual (que ha aumentado, generalizándose el A3 o la inspección en pantalla). Por todo ello hay que ir más allá, y tratar de estimar el límite resolutivo de un sistema fotográfico digital, considerando los distintos formatos. Podemos considerar, si se quiere, que el círculo de confusión es el píxel.

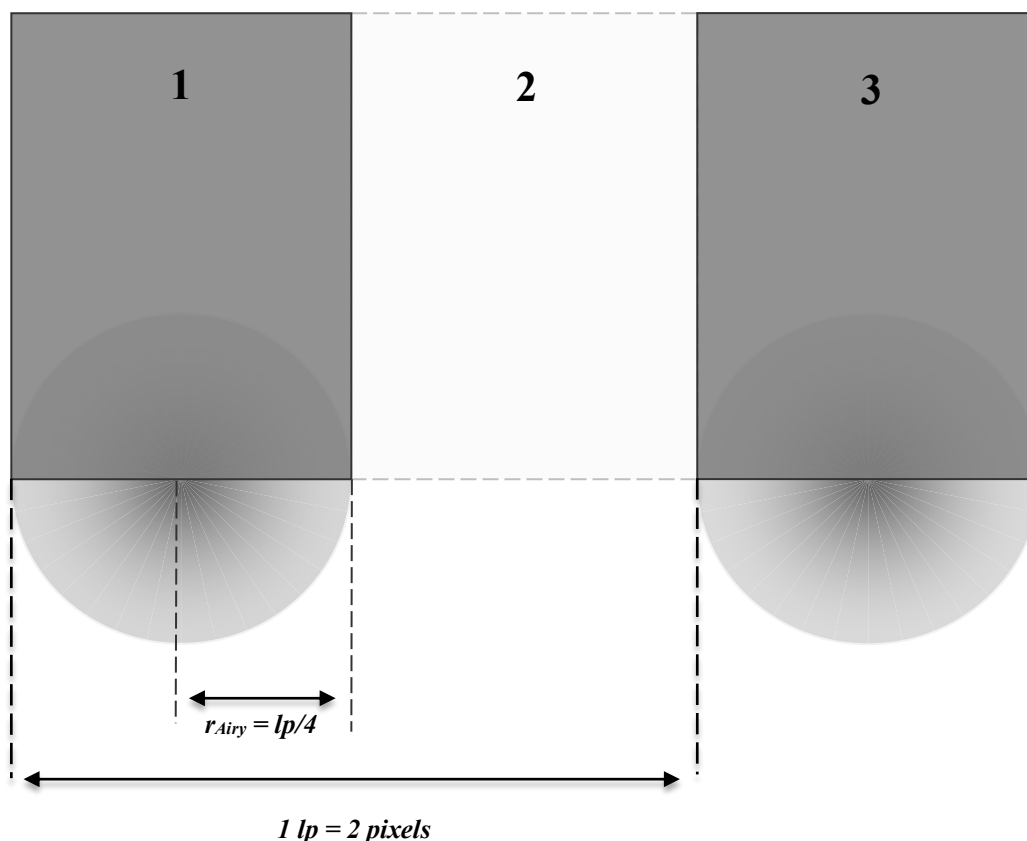
Para ello asumiremos un sistema óptico perfecto, es decir, un objetivo sólo limitado por la difracción, sin aberraciones. Calcularemos entonces la máxima resolución ofrecida por un objetivo de ese tipo y la frecuencia de muestreo necesaria para reproducirla. El espectro visible va de los 0,00038 a los 0,0007 milímetros, pero tomaremos el ya conocido valor de 0,000555 (verde-amarillo para el que el ojo es más sensible), 0,0004 (azul) y 0,0007 (rojo). La resolución máxima y el diámetro del círculo de Airy depende de la longitud de onda de la luz.



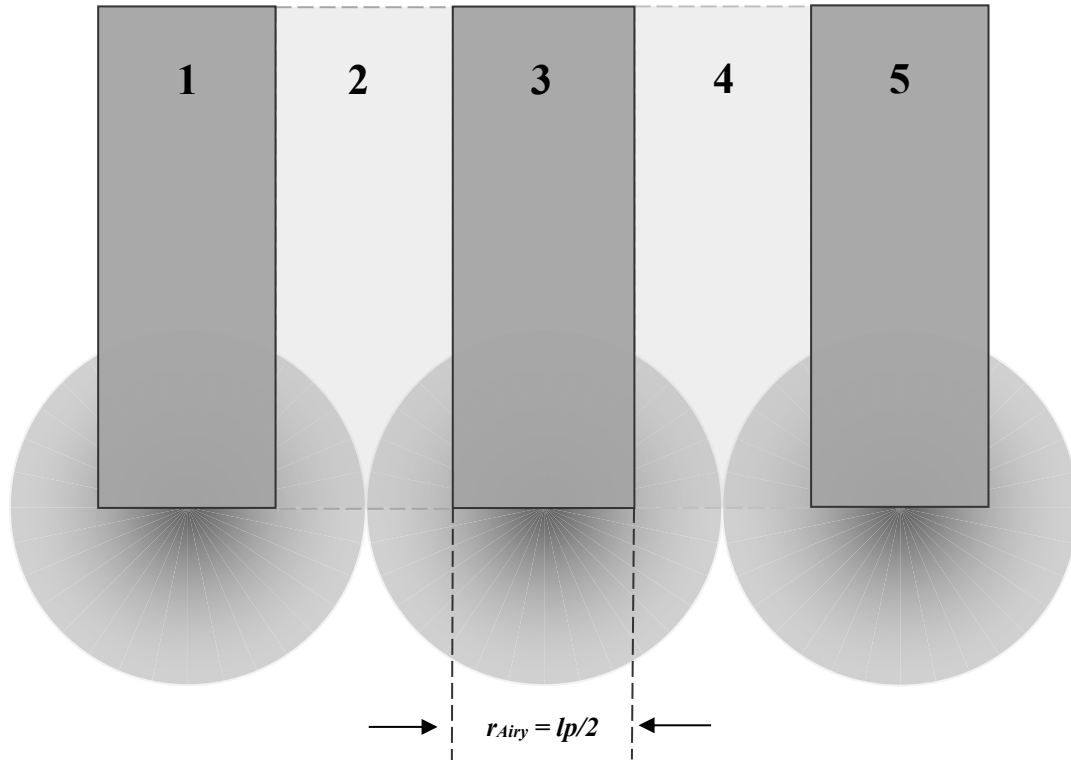
Aquí hay que introducir ahora un tema delicado. El *criterio de Rayleigh*, que permite estimar una resolución asociada a unos discos de Airy con determinada separación entre ellos, no es un criterio adecuado para los sensores digitales. El *criterio de Rayleigh* es adecuado para la percepción visual en telescopios, con motivos brillantes sobre fondo oscuro (estrellas, planetas). Para los sensores digitales hay que adoptar un criterio mucho más exigente (->). Los píxeles no son como los conos de la fovea, que reaccionan de forma distinta a los puntos y las líneas.

El diámetro de los discos de Airy sólo depende de la abertura y la longitud de onda de la luz. La resolución para un objetivo sólo limitado por la difracción depende de la separación y el diámetro de los discos de Airy. El criterio de Rayleigh es sólo un criterio sobre la mínima separación aceptable entre discos de Airy (los centros de los discos deben estar separados por el radio del disco). El criterio se aplica independientemente del diámetro, que depende de la longitud de onda de la luz y la abertura del objetivo. Se resolvían 2 líneas con cada radio al 9% de contraste tomando estas separaciones.

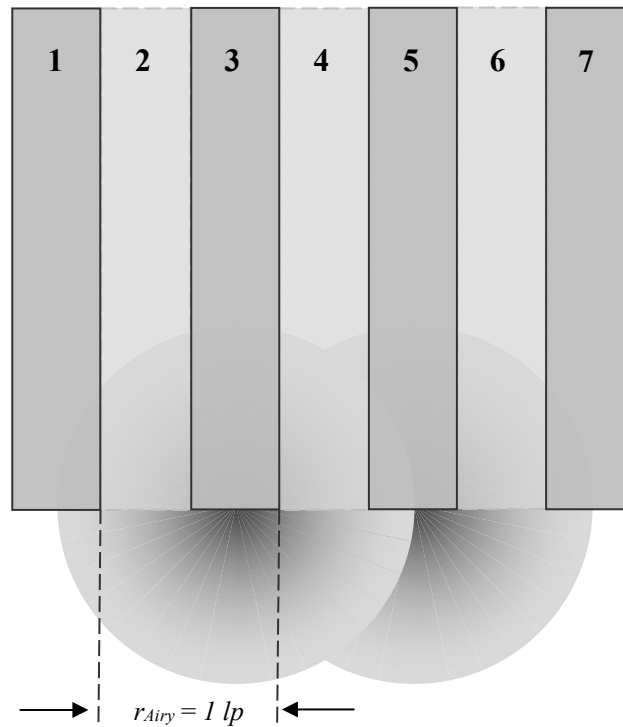
Otros criterios de resolución, es decir, de separación, ofrecían valores distintos de contraste, resultando resoluciones superiores (en el caso del criterio de Dawes, con 0% de contraste) e inferiores (cuando exigíamos valores de contraste superiores, como 10%, 50%, 80%). Si elevamos la exigencia de contraste estaremos exigiendo también más separación entre discos. Ésta se puede estimar a partir de las resoluciones presentadas en aquella tabla de la sección primera de este trabajo. En el caso del criterio de Dawes los discos están más juntos aún, y cada diámetro separaría 5 líneas. Con un contraste del 80% cada disco completo resuelve una línea, por lo que debe haber una separación entre discos de al menos un diámetro. Como es obvio, los "píxeles" deben estar lo suficientemente separados para poder captar una diferencia relevante en la intensidad de la señal. Es (aproximadamente) el caso del gráfico:



Con un contraste del 50% cada disco completo resuelve dos líneas, con una separación nula, pero sin superposición. Resolver ese detalle exige “píxeles” más pequeños. Es el caso del siguiente gráfico:



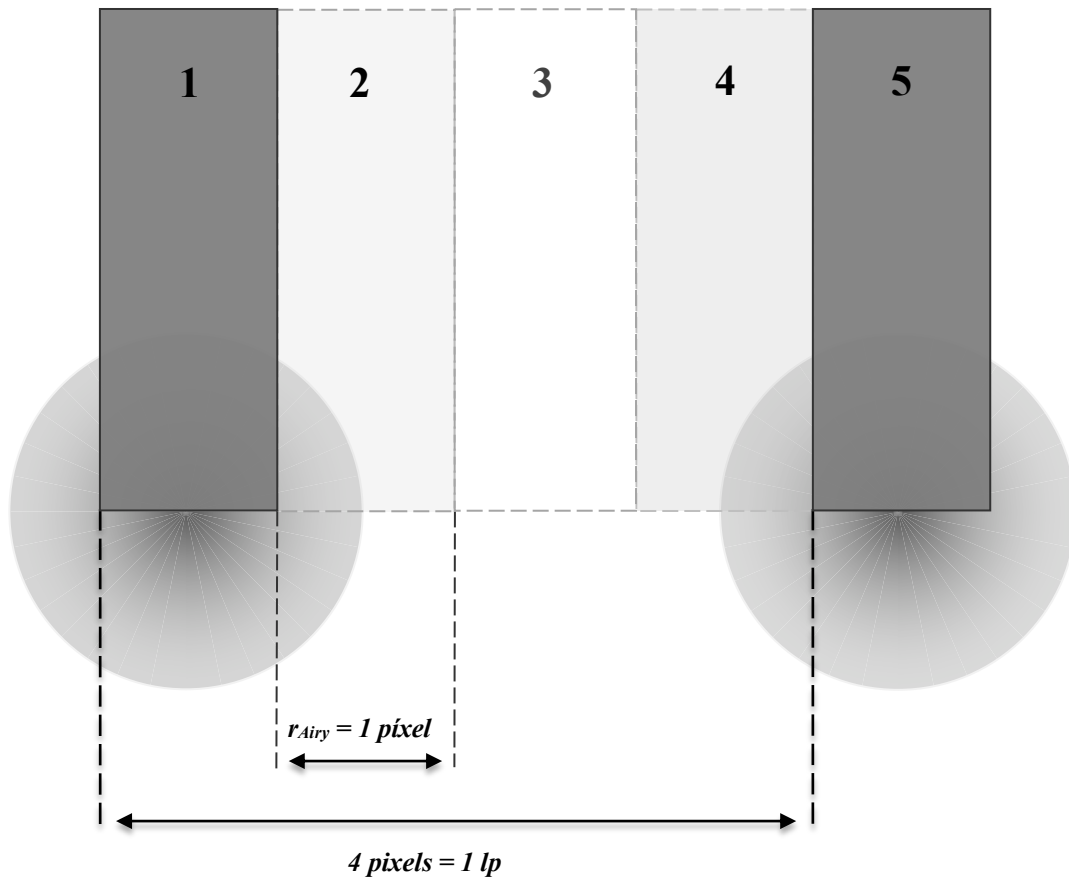
En el siguiente gráfico volvemos a presentar el caso de Rayleigh. En teoría se podría resolver hasta 1 par por radio, lo que requeriría “píxeles” mucho más pequeños aún. No obstante, el nivel de contraste es tal que esa frecuencia de muestreo adicional apenas resuelve nada.



Cuanto más próximos están los discos de Airy, mayor es la resolución espacial del objetivo y menor el contraste. Si los “píxeles” son demasiado grandes, esa resolución extra por proximidad entre discos se perdería, y el sistema estaría limitado por la frecuencia de muestreo, o por el tamaño de los “píxeles”. Pero si el “píxel” es menor que el diámetro del disco de Airy, las posibles ganancias de resolución se pierden rápidamente debido a las pérdidas de contraste asociadas a la menor separación entre discos (->, ->).

¿Dónde está el tamaño óptimo de “píxel” a efectos de resolución? Dependerá de la longitud de onda de la luz y la abertura, además de las propiedades del objetivo (control de las aberraciones). Sólo objetivos muy luminosos con un alto grado de corrección de las aberraciones se podrán beneficiar de “píxeles” más pequeños. En principio el “píxel” debe ser aproximadamente igual al tamaño al disco de Airy o algo menor (los primeros casos que hemos visto).

Como señalan Catrysse y Wandell (2005, página 6), un sensor monocromo necesitaría, para evitar el *aliasing*, dos muestreos por cada diámetro del disco de Airy, es decir, el espaciado de los “píxeles” debe ser como mucho igual al radio del disco de Airy (la mitad de lo que indicaría el criterio de Rayleigh).



Esto debe cumplirse al menos para la longitud de onda más exigente, por lo que los dos pares por disco de Airy deben adaptarse a la luz azul, que tiene los discos de menor diámetro. Esto determina un tamaño de píxel. Catrysse y Wandell (2005, página 7) calculan que para un objetivo sólo limitado por la difracción a una apertura de  $f/2.8$ , evitar el *aliasing* en todas las longitudes de onda requiere píxeles de 1,36 micras de espaciado, o menores, dados los discos de Airy de 2,7 micras de diámetro (véase la tabla); mientras que para una apertura  $f/8$ , para la que es más verosímil encontrar un objetivo limitado por la difracción, se requerirían píxeles de 3,9 micras (discos de 7,8 micras para esa longitud de onda).

Catrysse y Wandell (2005, página 7) o Rhodes et al. (2004, página 9), explican que en los sensores con mosaico Bayer los píxeles se agrupan en matrices de  $2 \times 2$  de tipo RGBG que forman una unidad en el siguiente sentido: se usa la información de los cuatro píxeles para calcular el color definitivo en cada uno de ellos, lo que implica asumir implícitamente que esa pequeña matriz mide un punto de la escena. Por tanto, la frecuencia de muestreo efectiva es la que tiene a esa matriz Bayer como unidad de muestreo. En resumen, para evitar el moiré cromático hay que multiplicar la frecuencia de muestreo por dos (dos píxeles donde en el caso monocromo había uno). Lo que nos llevaría a multiplicar por dos los requerimientos de resolución espacial.

F/#	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Luz azul de 0,0004 milímetros de longitud de onda					Luz verde-amarillo de 0,000555 milímetros de longitud de onda					Luz roja de 0,0007 milímetros de longitud de onda				
f/1	2049	4098	1,0	2049	4098	1490	2981	1,3	1490	2981	1171	2342	1,7	1171	2342
f/1,4	1464	2927	1,4	1464	2927	1065	2129	1,9	1065	2129	836	1673	2,4	836	1673
f/2	1025	2049	2,0	1025	2049	745	1490	2,7	745	1490	585	1171	3,4	585	1171
f/2,8	732	1464	<b>2,7</b>	732	1464	532	1065	3,8	532	1065	418	836	4,8	418	836
f/4	512	1025	3,9	512	1025	373	745	5,4	373	745	293	585	6,8	293	585
f/5,6	366	732	5,5	366	732	266	532	7,5	266	532	209	418	9,6	209	418
f/8	256	512	<b>7,8</b>	256	512	186	373	10,7	186	373	146	293	13,7	146	293
f/11	186	373	10,7	186	373	135	271	14,8	135	271	106	213	18,8	106	213
f/16	128	256	15,6	128	256	93	186	21,5	93	186	73	146	27,3	73	146
f/22	93	186	21,5	93	186	68	135	29,5	68	135	53	106	37,6	53	106

(1) Máxima resolución teórica según el criterio de Rayleigh (lp/mm) MTF 9%, 4 lp/mm por disco de Airy

(2) Frecuencia de muestreo asociada a la máxima resolución según Rayleigh, a 2 píxeles por ciclo, 4 por disco, en píxeles por milímetro

(3) Diámetro del disco de Airy en micras

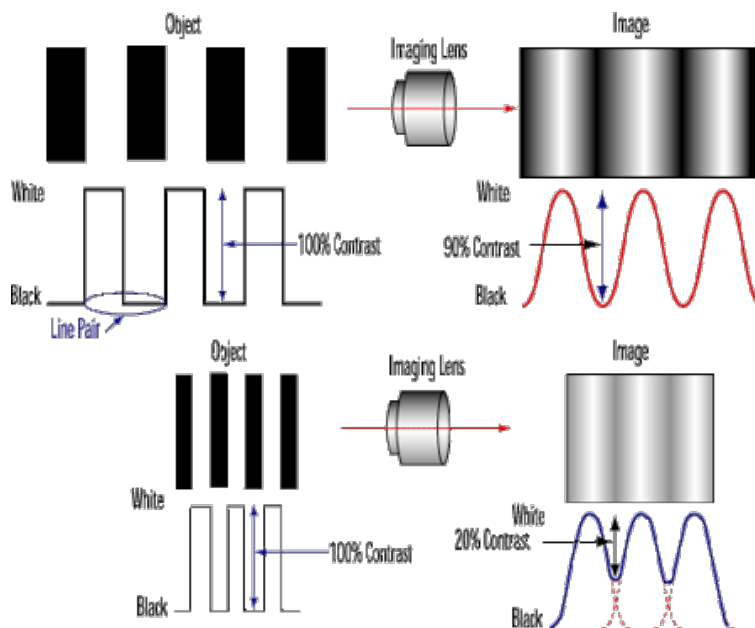
(4) Frecuencia de muestreo a 2 píxeles por disco de Airy en píxeles por milímetro. Ideal para sensores monocromáticos.

(5) Frecuencia de muestreo a 4 píxeles por disco de Airy en píxeles por milímetro. Necesario para sensores Bayer.

Ahora nos queda tan sólo calcular el número de “píxeles” para un sistema limitado por la difracción, considerando una frecuencia de muestreo suficiente para no tener problemas de moiré siempre que haya un filtro de paso bajo. De no haberlo sería necesario aumentar más aún la frecuencia de muestreo. El filtro de paso bajo tiene un efecto similar al incremento de la frecuencia de muestreo en lo que toca al aliasing. Tiene sentido usarlos porque a altas frecuencias el aliasing se evita, pero sin apenas ganancias de resolución adicional. El cálculo se hace a partir del diámetro del disco de Airy para cada longitud de onda, y aplicando 2 píxeles por diámetro.

Millones de “píxeles”	Cuatro Tercios (13,5x18)			APS-C (16x24)			35mm (24x36)			MF (36x48)		
	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ
f/1	1020	530	333	1612	838	527	3628	1885	1185	7256	3769	2369
f/1,4	521	270	170	823	427	269	1851	962	604	3702	1923	1209
f/2	255	133	83	403	209	132	907	471	296	1814	942	592
f/2,8	130	68	42	206	107	67	463	240	151	926	481	302
f/4	64	33	21	101	52	33	227	118	74	454	236	148
f/5,6	33	17	11	51	27	17	116	60	38	231	120	76
f/8	16	<b>8</b>	5	25	<b>13</b>	8	57	<b>29</b>	19	113	<b>59</b>	37
f/11	8	4	3	13	7	4	30	16	10	60	31	20
f/16	4	2	1	6	3	2	14	7	5	28	15	9
f/22	2	1	1	3	2	1	7	4	2	15	8	5

Algunos números son extremadamente altos, pero no son muy relevantes. Es difícil encontrar en fotografía objetivos limitados por la difracción. Lo es por el ejemplo el Leica APO-Telyt-R 280mm f/4 a todas las aberturas (->), o el APO-Summicron-R 180mm f/2 (->), pero sólo a partir de f/5,6. Hemos sombreado en la tabla la zona con implicaciones prácticas, y eso sólo sería válido para objetivos muy especiales. Otro factor que debe tenerse en cuenta es la longitud de onda de la luz. Tomando la luz verde-amarilla como representativa de la luz-día tenemos unos valores intermedios, pero a veces tenemos escenas con luz azulada o rojiza, y eso nos lleva a valores distintos.

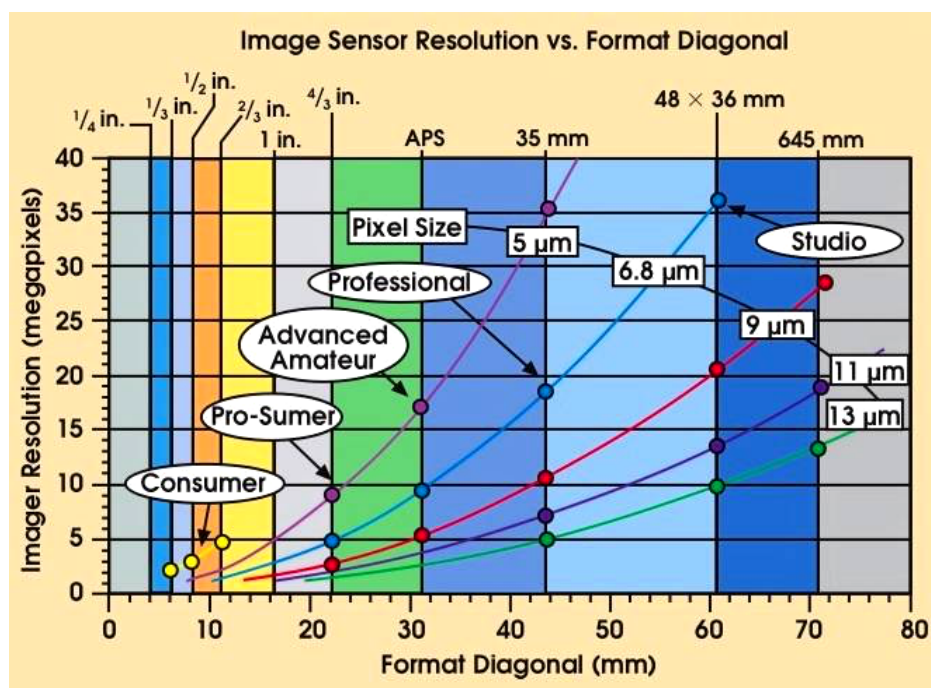


Aquí la difracción afecta negativamente más al formato más pequeño. Si teníamos que con unos 22-25 millones de “píxeles” conseguimos un factor x2 de frecuencia Nyquist en todos los formatos, la difracción limita la resolución de los más pequeños a mucho menos. Esto es así cuando cerramos el diafragma, pero también cuando lo abrimos, pues son las aberraciones las que se encargan entonces de limitar.

Podemos asumir que la difracción limita la resolución efectiva de los formatos de manera que en ningún caso resultarían rentables más de 60 millones de píxeles en un sistema de 36x48mm, 30 millones en un 24x36mm, 13 millones en un formato APS-C y 8 millones en un formato 4/3. Visto de otra forma, si quieres más resolución, no queda otra posibilidad que saltar a un formato mayor, o bien optar por un formato menor ópticamente más perfeccionado (->), vía alternativa ésta que tiene sus límites en el medio digital (por la razón señal-ruido).

## 11. Conclusiones.

Se conoce perfectamente desde hace tiempo la evolución de la tecnología digital, al menos en esta primera fase de ajuste y sustitución del paradigma anterior basado en soporte químico, como demuestran las predicciones de Kodak:



Previsiones de la evolución de las resoluciones en sensores digitales (Kodak®).

Decíamos que una cámara de 35mm podía resolver en el negativo, bajo condiciones muy controladas, con película blanco y negro de alta resolución, unos 80-90 pares, pero mucho menos en condiciones normales. Ese negativo tiene que ampliarse (o escanearse) para que podamos obtener una copia en papel de la fotografía, lo que supone una pérdida de resolución o detalle y contraste. Esa pérdida de *transmisión* no se da con la tecnología digital. Los sensores digitales, por tanto, permiten ofrecer idealmente más calidad en la imagen impresa resolviendo menos detalle, y especialmente si comparamos con películas de mayor sensibilidad y menor resolución. Además, hay límites al detalle que el ojo humano puede percibir en impresiones de tamaño moderado. Por tanto, no es necesario obtener una resolución real de 80-90 pares por milímetro en un sensor de 35mm ni siquiera para igualar la calidad de la foto impresa proporcionada por la película de alta resolución, lo que explica que sensores más pequeños con alta densidad o sensores de 35mm con densidad más baja ya proporcionen imágenes impresas que superan en calidad a las obtenidas a partir de emulsiones de alta resolución, especialmente en color y a sensibilidades altas.

Se ha comprobado (->) que la película de grano fino (sensibilidad equivalente ISO 50 a 100) escaneada equivale a fotografías digitales de entre 8 y 16 millones de píxeles, mientras que la película de más sensibilidad (ISO 400) equivaldría a fotos de 4 millones de píxeles. A pesar de esos resultados ya superiores, podemos esperar mejoras adicionales en la calidad de las fotografías tomadas digitalmente.

La evolución reciente de la tecnología fotográfica ha venido explicada por los condicionantes de la calidad de la fotografía impresa, pero en un sentido más complejo del que muchos entienden. El tamaño de la impresión, con un detalle al límite de lo que el ser humano puede distinguir a simple vista, determina una exigencia de resolución para el objetivo y el sensor. Un mayor sensor facilita al objetivo la tarea de servir esa resolución con el mayor nivel de contraste posible. Sin embargo, controlar las aberraciones para un círculo de luz mayor es mucho más complicado, para una focal y abertura dadas. Por otro lado, llevar el sistema al límite de sus posibilidades choca con la difracción, que afecta a todos los objetivos por igual. Si bien una mayor frecuencia de muestreo reduce las degradaciones causadas por el exceso de señal, y aumenta la transferencia de contraste del sensor, también hay que tener en cuenta que la razón señal-ruido se deteriora, y que hay un límite a la mejora de resolución que se puede conseguir. Dado un tamaño de sensor la frecuencia de muestreo determina el tamaño, en píxeles, de la fotografía digital. Dicho tamaño ha venido experimentando un incremento continuo en las cámaras digitales (la llamada *carrera de los megapíxeles*), lo que no ha sido en modo alguno producto del marketing o del capricho, sino de los mismos principios técnicos que gobernaron la evolución de la fotografía fotoquímica durante más de 100 años.

Esa tendencia empieza a agotarse en estos momentos (año 2008) en algunos segmentos del mercado. Por un lado, el tamaño de las imágenes plantea problemas (almacenamiento, procesado) y, por otro, sólo se aprovecha una parte de la capacidad de contener información que tiene una matriz de píxeles (debido al carácter multiplicativo de la MTF combinada de objetivo y sensor, a los problemas de exceso de señal y a las interpolaciones de los colores). Por tanto, los incrementos *adicionales* en el tamaño de dicha matriz tienen costes marginales que empiezan a superar las ganancias marginales esperables, una vez explotadas buena parte de las ventajas potenciales iniciales. Aumentar la cantidad y calidad de la información realmente contenida en la matriz de píxeles (detalle real y su definición, escala tonal, gama tonal, precisión y gama de colores), que supone una mejora en la *eficiencia*, será el siguiente paso en la evolución de los sensores y objetivos.

## 12. Referencias.

Son absolutamente recomendables tres referencias básicas para entender el tema de la resolución y la calidad de imagen en general, reforzando el razonamiento que hemos presentado en este mismo artículo: el contraste es tan importante como la resolución para la calidad percibida en una imagen; a menores resoluciones los objetivos proporcionan mayor nivel de contraste, y los sensores más grandes tienen que hacer menores esfuerzos resolutivos para cualquier impresión; y por último, la capacidad resolutiva de un sensor (frecuencia de muestreo) debe ser lo más alta posible, para de esa forma eliminar los efectos degradantes del exceso de señal, *si bien hay una relación inversa con la razón señal-ruido y con el porcentaje de aprovechamiento real de la capacidad resolutiva del sensor.*

- Primero, un famoso [artículo](#) de Erich Heynacher y Fritz Köber (1969), y [otro](#) de Kämmerer (1979), ingenieros de Carl Zeiss, que trata de forma muy accesible la importancia del contraste en la percepción de la calidad de una fotografía. Véase Heynacher, E. y Köber, F. 1969. Resolving Power and Contrast, Zeiss Information, 51; y Kämmerer, J. 1979. When is it advisable to improve the quality of camera lenses? Optics & Photography Symposium, Les Baux, 1979. Habría que añadir la consideración del ruido en dicha percepción, tema [tratado](#) por Norman Koren.



- En segundo lugar debería consultarse el [análisis](#) de Bob Atkins sobre la importancia del tamaño del sensor, por su relación con el nivel de contraste de la imagen impresa (otro tema es el de la calidad relativa de la imagen en los bordes del fotograma, que también hay que [considerar](#)). Erwin Puts ha publicado sus reflexiones ([1](#), [2](#), y especialmente [3](#)) sobre el tema, en última instancia coincidentes con las apreciaciones de Atkins.
- En tercer lugar, un importante [documento](#) del Dr. Karl Lenhardt, de la firma Schneider-Kreuznach, que añade consideraciones sobre el exceso de señal, en relación con el número de píxeles requeridos para la impresión y la frecuencia de muestreo.

Hay referencias adicionales muy instructivas, y que no deberían dejar de estudiarse para conseguir una buena comprensión de los temas tratados, aunque son técnicamente más difíciles.

Los dos artículos de Ronald W. Harris dedicados al tema de la resolución, pero no referidos al medio digital específicamente (Parte I, sitio [a](#) o [b](#); Parte II, sitio [a](#) o [b](#)), son fantásticos. Las referencias exactas son Ronald W. Harris. (1991): Understanding Resolution. Lens, Flim and Paper. Darkroom & Creative Camera Techniques, Mar-Apr., pp. 26-66; y Ronald W. Harris. (1991): Understanding Resolution. Using Modulation Transfer Function. Darkroom & Creative Camera Techniques, May-Jun., pp. 55-57.

Es recomendable también la [serie explicativa](#) dedicada al tema de la resolución por Bob Atkins ([1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#) y [6](#)), a la que habría que añadir dos breves comentarios muy instructivos ([1](#), [2](#)) y un interesante análisis adicional ([3](#)). Atkins ha resumido sus planteamientos en un análisis que cierra muy bien sus puntos de vista sobre el tema ([1](#) y [2](#) con ejemplos en [3a](#), [3b](#)). Los cálculos de resolución de Makoto Honda son muy interesantes, junto con sus comentarios, y es recomendable consultar sus artículos ([1](#)). Excelente el [curso de fotografía](#) de Luis Monje Arenas.

Para acabar, son imprescindibles los estudios, muy técnicos, de Roger N. Clark ([1](#)) y Norman Koren ([2](#)), este último aporta interesantes referencias adicionales, y el [documento de Zeiss](#) "How to read MTF curves", de H. H. Nasse.

La Tesis doctoral de Charles Dickinson, "An Evaluation of the Current State of Digital Photography", de 1999, es otra fuente importante, y se puede acceder a ella libremente ([->](#)). Otra Tesis Doctoral: Garrett M. Johnson, "Measuring Images: Differences, Quality And Appearance", de 1998 ([->](#)). El artículo "How Small Should Pixel Size Be?" de Chen, Catrysse, El Gamal y Wandell, de 2000, es otra referencia de gran interés ([->](#)), así como "CMOS Imager Technology Shrinks and Image Performance", de Rhodes et all (2004) ([->](#)) y "Roadmap for CMOS image sensors: Moore meets Planck and Sommerfeld", de Catrysse y Wandell (2005) ([->](#)), para el tema de difracción y tamaño óptimo de "píxel".

Para el tema de la interpolación de colores en sensores de cámaras digitales es muy recomendable consultar "A Study of Spatial Color Interpolation Algorithms for Single-Detector Digital Cameras", también de Ting Chen, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Stanford ([->](#)), que repasa los distintos tipos de algoritmos y compara los resultados.

Peter Karbe, actual jefe del departamento óptico de Leica, ha publicado en la revista LFI, número de marzo de 2006, el artículo "Form Follows Format", que aporta claves muy

interesantes para entender las diferencias entre formatos, explicado de forma sencilla e intuitiva. Igualmente, en el número de febrero de 2007, Michael J. Hussmann publica el artículo "The Nuts and Bolts" que resulta de gran interés para entender el concepto de profundidad de bits.

Un excelente libro es "Leica Lens Compendium", de Erwin Puts (Hove Books, 2003), que trata con mucho detalle temas genéricos de óptica y fotografía, además de ofrecer un apasionante análisis de los objetivos Leica. Muy asequible para un lector medio, aunque en inglés, son los temas de óptica fotográfica tratados por [Paul van Walree](#). Por último, son muy recomendables los libros de óptica de Rudolf Kingslake, durante muchos años jefe del departamento de diseño óptico de Kodak y profesor en la Universidad de Rochester, especialmente "A History of the Photographic Lens" (Academic Press, 1989), para la historia de la óptica fotográfica, y "Lens Design Fundamentals" (Academic Press, 1978), para los principios del diseño de objetivos fotográficos.

La Tesis Doctoral del que fuera director del departamento de diseño de Leica en Canadá, Walter Mandler, de 1980, dedicada a la optimización de los objetivos de tipo Doble Gauss, es una referencia aún hoy día. Se publicaron a partir de ella dos artículos en alemán en la revista científica *Optik*, y uno en inglés, de título "Design of basic double Gauss lenses", en el *International Optical Design Conference, Fisher ed., Proceedings SPIE 0237*, pp. 222-232. Mandler publica "Leica lenses and early computers" en dos partes, en 1989, en *Viewfinder, Leica Historical Society of America* 22(1) y 22(2). Otro interesante artículo sobre la filosofía de diseño de Mandler, de Reginald P. Jonas y Michael D. Thorpe, se ha publicado en 2006 (*Proceedings SPIE 6342*) con el título "Double Gauss lens design: a review of some classics". Por último, hay un libro, difícil de encontrar, que es una absoluta referencia sobre estos temas. Se trata de "Image Clarity: High-Resolution Photography", de John B. Williams (Focal Press, 1990).

Agradecemos a [Norman Koren](#) (programador de la aplicación [Imatest](#)), [Erwin Puts](#) (conocido experto en óptica fotográfica, analista y consultor), Peter D. Burns (ingeniero de Kodak, *Imaging Research and Development Labs*) y [Valentín Sama](#) (óptico y profesor de la Universidad Complutense) por atender a las consultas puntuales que les hemos planteado en algún momento de la elaboración de este trabajo.

[Rubén Osuna](#) ©