

Fundamentos de fotografía digital

Efraín García y Rubén Osuna ©

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

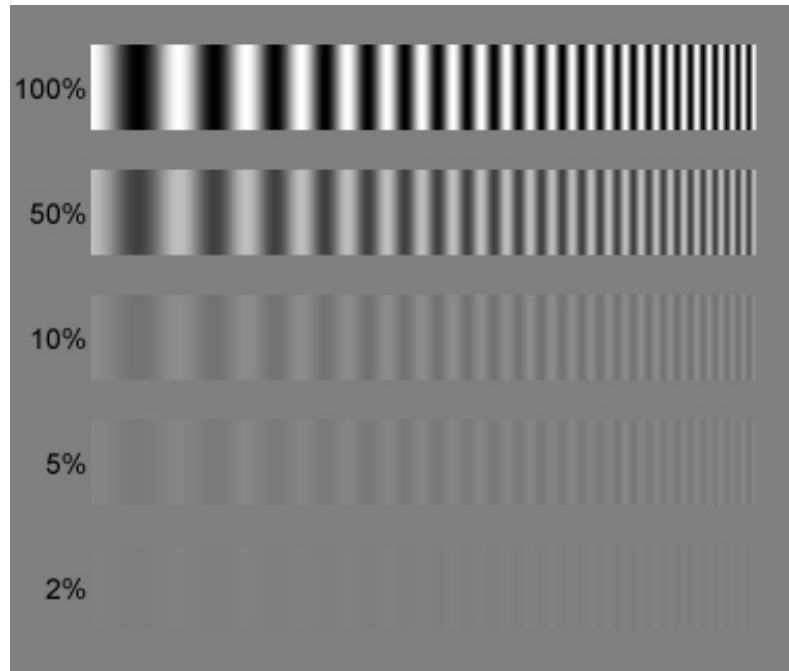
La señal (una imagen en nuestro caso) puede representarse matemáticamente sin pérdidas mediante una *transformación de Fourier* (->) en términos de unas pocas variables (frecuencia, modulación o contraste y fase). Esto permite la captura y el tratamiento digital de las imágenes. Pero antes de disponer 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 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 longitud 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 longitud 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 longitud 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.

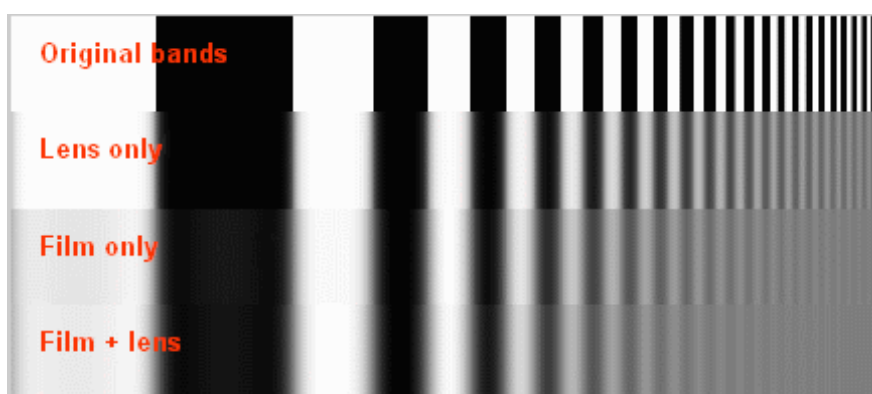
Bajo ciertas condiciones, la capacidad resolutive máxima de un sistema puede *aproximarse empíricamente* mediante la fórmula

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

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 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-aruru* (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

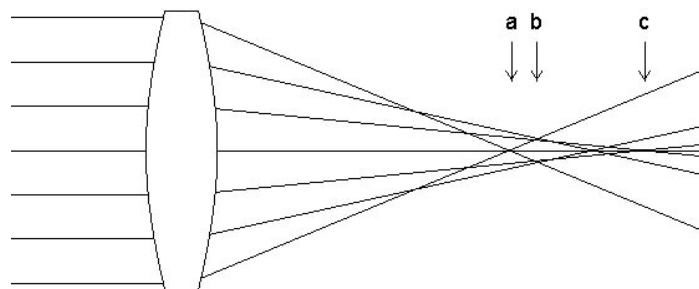
pierde los perfiles), *keikoh* (un *bokeh* muy ligero). Para la calificación se emplean términos como *kirei* (hermoso y limpio), *sunao* (amable), *yoi* (bueno), *konomashii* (bonito, agradable), *odayaka* (suave) o *shizen* (natural).

Nos centraremos a partir de ahora en el análisis de la resolución y el contraste. Las *aberraciones* dependen de la apertura y del ángulo de visión, 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 de visión, = 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 (->).

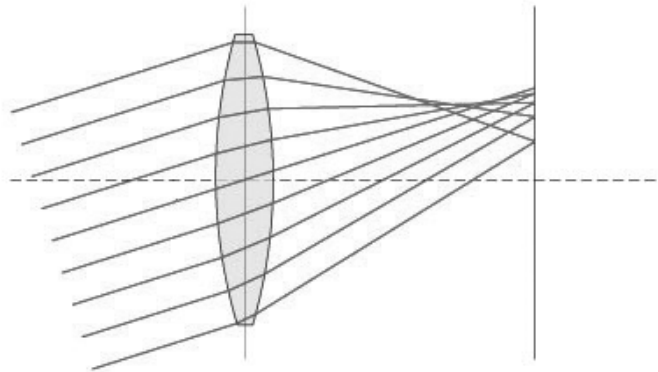
Si el radio del diafragma se duplica, la aberración esférica se multiplica por 8 ($=2^3$). La misma relación hay entre la distorsión y el ángulo de visión (->). Cuanto más luminoso es un objetivo, y menor su longitud focal, más difícil es corregir las aberraciones, que se multiplican. Cuanto mayor es 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 (->).



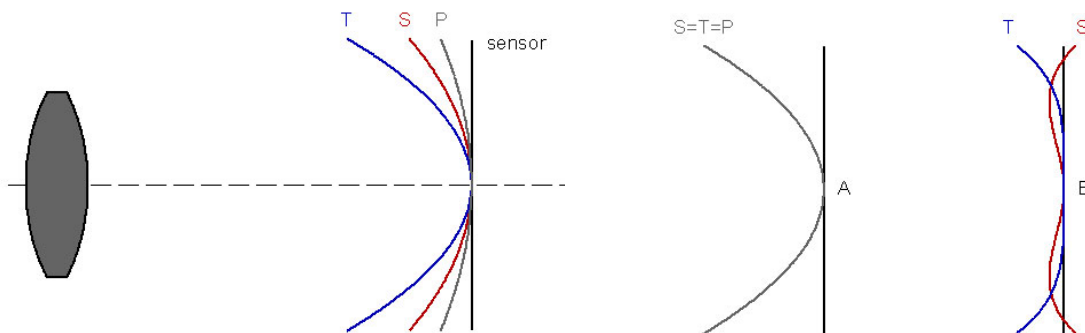
[Paul van Walree ©](#)

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 apertura. 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 aesféricas (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 aesférica es relativamente grande, otras aberraciones pueden verse agravadas.



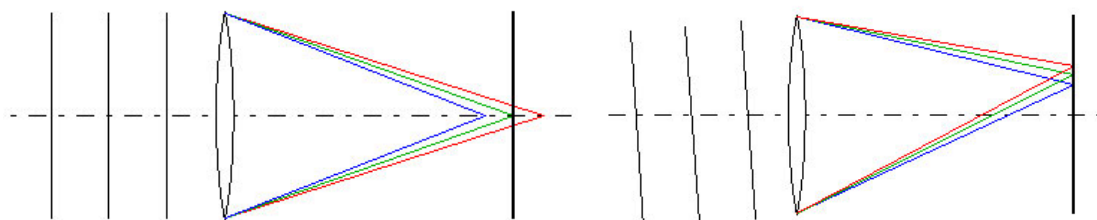
La *aberración de coma* (también conocida como *aberración esférica oblicua*) es de naturaleza similar a la anterior, en el sentido de venir explicada por diferencias en la refracción de los haces de luz en función de su ángulo de incidencia en la superficie curva de la lente. La luz con un mayor ángulo 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.



[Paul van Walree ©](#)

El *astigmatismo* y la *curvatura de campo* (\rightarrow) 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 longitud 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*

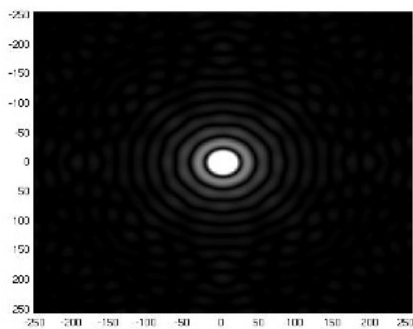
contiene los detalles tangenciales, y la marcada con S los detalles sagitales. P es la *superficie de Petzval*, que puede ser plana incluso en presencia de astigmatismo, y que guarda una relación matemática con las otras dos: $TP = 3xSP$, donde TP es la separación entre T y P , y SP entre S y P . Conforme 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*.



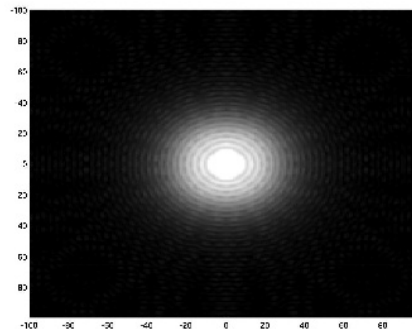
[Paul van Walree ©](#)

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 tiñe de un solo color, ocurre en cualquier parte de la imagen y se reduce cerrando el diafragma; la aberración *lateral*, por el contrario,

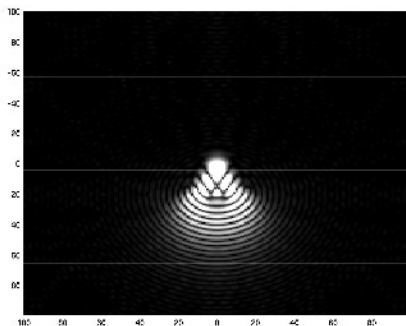
sólo afecta tangencialmente a la imagen, modifica la coloración según el orden de la secuencia oscuro-claro o claro-oscuro, empeora sus efectos al acercarnos a las esquinas y no depende de la apertura. Estas aberraciones se combaten combinando distintos tipos de vidrios exóticos con dispersión baja o anómala. Si los tres colores primarios están libres de esta aberración podemos hablar de objetivo "apocromático". 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 ([->](#)).



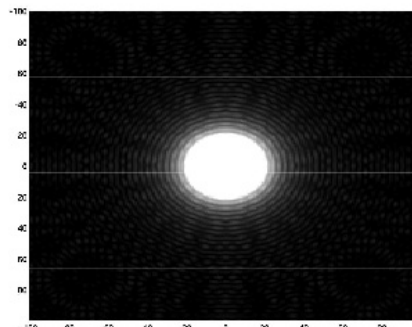
Patrón de Airy sin aberraciones



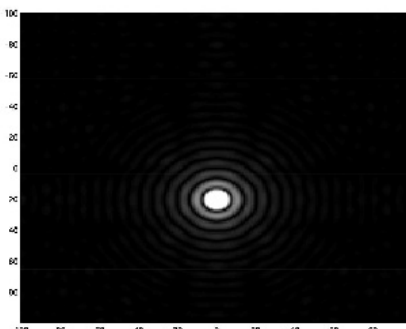
Patrón de Airy con aberración de esfericidad



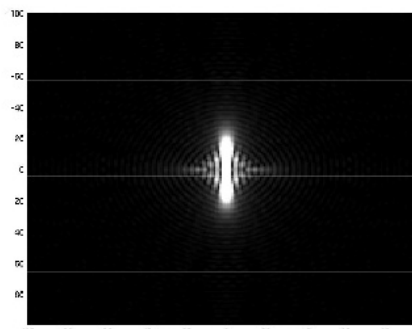
Patrón de Airy con curvatura de campo



Patrón de Airy afectado por un problema de distorsión

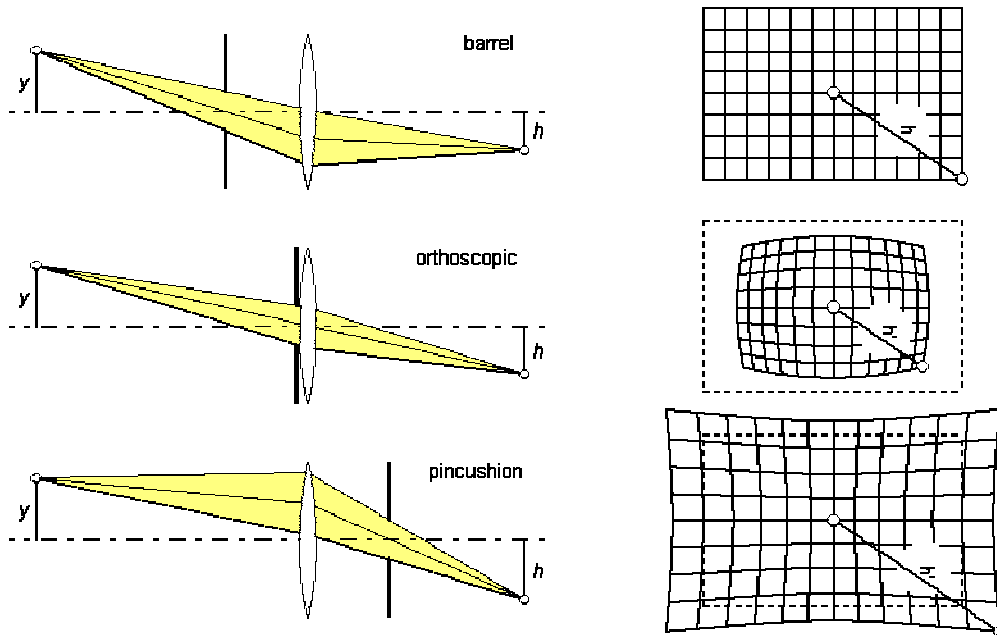


Patrón de Airy afectado por un problema de coma



Patrón de Airy con astigmatismo

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



Paul van Walree ©

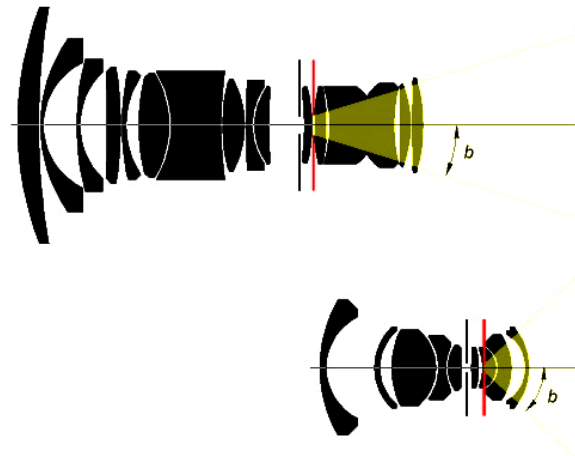
La *distorsión óptica* (\Rightarrow) es una aberración de Seidel, si bien no se puede ver su huella en el perfil de las curvas MTF. Distorsiona las líneas rectas, que se curvan, adoptando forma de *barril* ($y > h$) o de *acerico* (*pincushion*, $y < h$). El objetivo que no distorsiona la imagen se llama *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*) (\rightarrow) 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%, \rightarrow), y el uso de *parasoles* adecuados evita que el problema se agrave (\rightarrow). 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* (\rightarrow) 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 (\rightarrow). En los diseños de objetivos de tipo *simétrico* la distancia entre la *pupila de salida* y el plano focal coincide con la longitud focal y la luz incide en las esquinas del fotograma que encaja en el círculo de luz con el mismo ángulo que el *ángulo de visión* (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 longitud 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 longitud 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).

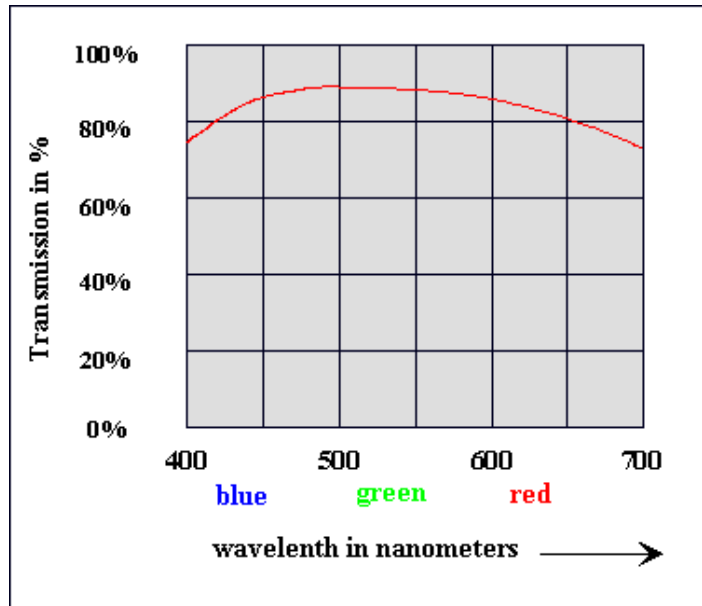
Los dos objetivos del dibujo que sigue a este párrafo son Zeiss de 21mm de longitud focal, el primero un diseño *Distagon* de tipo retrofoco para cámaras réflex Contax y el segundo un *Biogon* de tipo simétrico para cámaras telemétricas Contax G. Las líneas verticales negras señalan la posición del diafragma, 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 longitud 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 longitud focal del objetivo y el número f , como mostramos en la siguiente tabla (->) construida para un objetivo de 50mm:

Abertura	Diámetro de la abertura (mm) = 50mm / f/#	Radio de la abertura (mm) = Diámetro/2	Superficie total de la abertura (mm ²) = $\pi \cdot \text{radio}^2$	Cantidad de luz transmitida por unidad de tiempo (f/5,6 = 1)
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 de visión (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 longitud focal y *m* es la magnificación. Ésta se puede calcular mediante la expresión:

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

donde *d_f* es la distancia a la que estamos enfocando, y *L* la longitud focal, como siempre.

Ocurre pues que el ángulo de visión 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 de visión 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:

Longitud 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

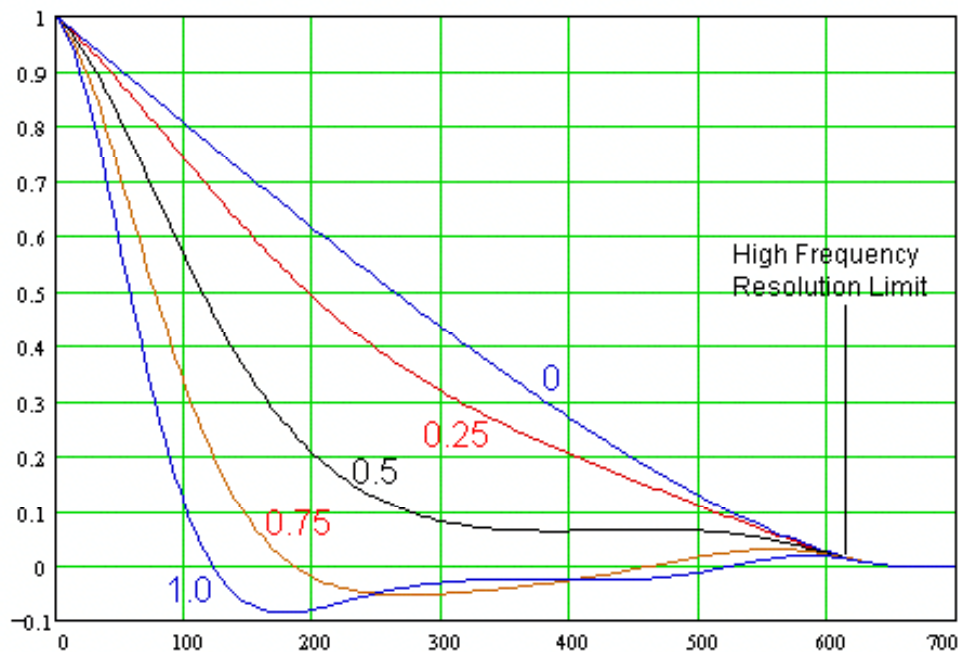
El ángulo de visión binocular horizontal y vertical de un ser humano es de unos 180 y 90 grados respectivamente, con un ángulo monocular de 140 y 90 grados (ángulos de aceptación de luz), siendo de 120 grados el campo en que se produce una superposición "estéreo". No obstante, percibimos detalles de 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 de visión humano "con detalle" (ángulo de visión 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 de visión 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 resolutivo 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.

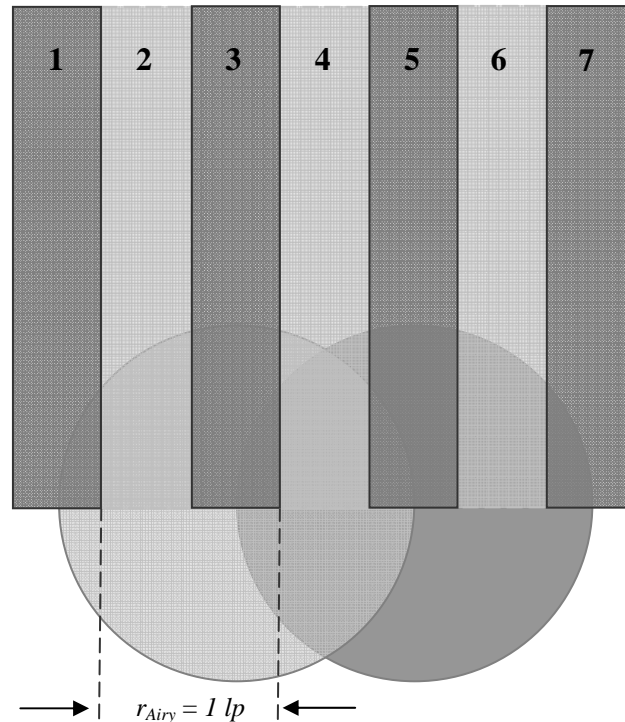
Si adoptamos el *criterio de Rayleigh* (por el físico británico *John William Strutt, Lord Rayleigh*, 1842-1919, ->), según el cual dos puntos se distinguen como tales cuando el primer anillo de oscuridad (primer mínimo) del *grupo de círculos concéntricos* de uno coincide con el centro del *disco de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

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 $R_0 = 2/d_{Airy}$, 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, \geq*) 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 resolutoria respecto a un punto con la capacidad resolutoria 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 longitud 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 longitud 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 resolutoria 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 ($\approx 6*366/43$).

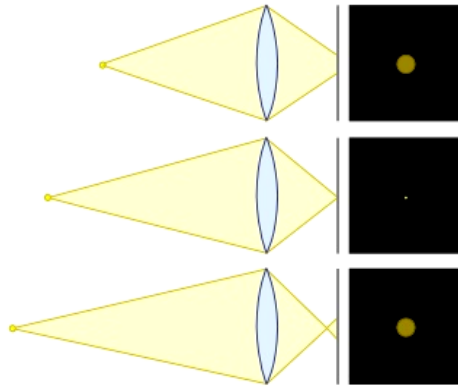
El círculo de confusión no es más que la inversa de R multiplicada por dos, para pasar a milímetros, es decir,

$$CoC = 2/R$$

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 apertura 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 apertura 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 asférica 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 resolutoria 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 de visión, 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.

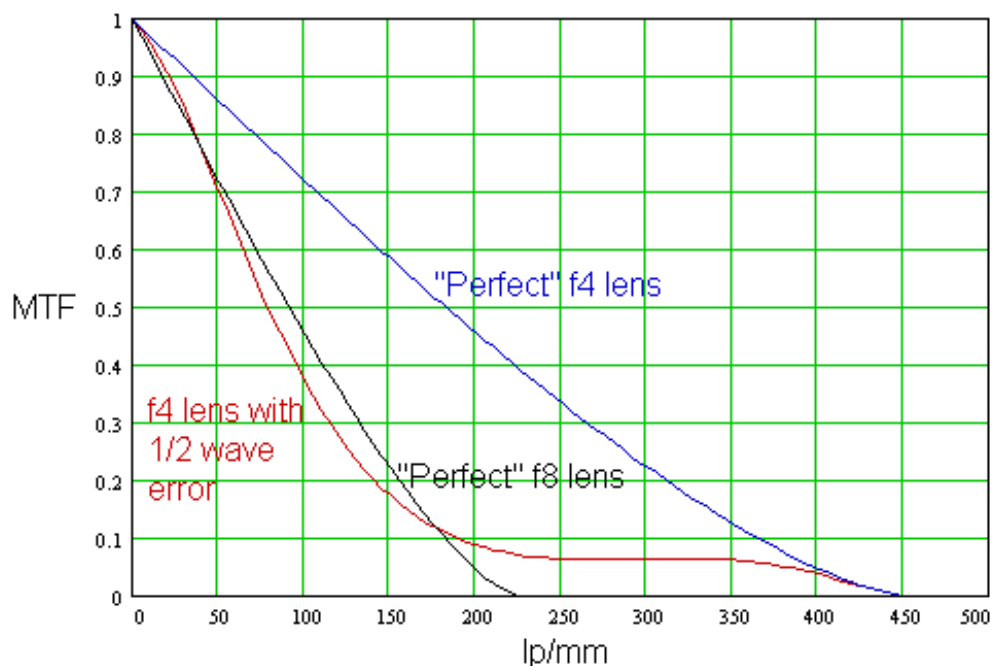
Vamos a combinar ahora los dos elementos que acabamos de estudiar en detalle, objetivo y sensor (o película). En la siguiente tabla hemos calculado las resoluciones *máximas* de un sistema (R) para distintas combinaciones de capacidad resolutive máxima en el objetivo (r_1) y película o sensor (r_2) para 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.

lp/mm	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	17	23	29	33	38	41	44	47	50	52	55	57	58	60
200	18	26	33	40	46	52	57	62	67	71	75	79	82	86
300	19	27	35	43	50	57	63	69	75	80	86	91	95	100
400	19	28	36	44	52	60	67	73	80	86	92	98	104	109
500	19	28	37	45	54	61	69	76	83	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	67	63	59	56	53	50	48	45	43	42	40
200	91	87	83	80	77	74	71	69	67	65	63	61	59	57
300	94	91	88	86	83	81	79	77	75	73	71	70	68	67
400	95	93	91	89	87	85	83	82	80	78	77	75	74	73
500	96	94	93	91	89	88	86	85	83	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 (\rightarrow) creado por el movimiento depende, entre otras cosas, de la magnificación del objetivo, y por tanto de la longitud 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.

[Efraín García](#) y [Rubén Osuna](#) ©