

Mejora del rango dinámico en la digitalización de documentos desde una perspectiva patrimonial: evaluación de métodos de alto rango dinámico (HDR) basados en exposiciones múltiples.

Jesús Robledano Arillo¹.

Resumen: uno de los principales problemas de calidad en la digitalización de documentos, especialmente de carácter gráfico, es la falta de rango dinámico en los dispositivos de captura. Una posible vía de trabajo para su evitación es la aplicación de técnicas de alto rango dinámico (HDR) basadas en la fusión de múltiples capturas tomadas a diferentes exposiciones. Si se demuestra la idoneidad de la aplicación de estas técnicas en el contexto del patrimonio documental, podrían obtenerse capturas digitales de gran calidad con el empleo de equipamiento de menor coste y fácilmente asequible para instituciones con pocos recursos económicos. En este trabajo se realiza una aproximación teórica y experimental al concepto y métodos de evaluación de la calidad en la digitalización de documentos, la incidencia en la calidad del rango dinámico, y la viabilidad de aplicación de técnicas HDR en el caso de la digitalización de documentos con valor patrimonial.

Palabras clave: digitalización de documentos, fotografía, rango dinámico, alto rango dinámico (HDR), calidad, evaluación de calidad.

Dynamic range improvement in document digitization from a cultural heritage perspective: assessment of high dynamic range (HDR) methods based on multiple exposures.

Abstract: one of the main quality problems in document digitization, especially in graphic documents, is low dynamic range in the capture devices. A possible way to avoid that problem is applying high dynamic range techniques (HDR) based on multiple exposures. If these techniques were suitable for the digitization of documents from the cultural heritage perspective, it would be possible to obtain high quality digital captures of documents employing lower cost equipment, affordable enough for institutions with limited resources. In this paper we make a theoretical and experimental approach to the concept and methods involved in quality assessment in the digitization of documents, the impact of dynamic range in image quality, and the viability of HDR techniques in the context of cultural heritage.

Keywords: document digitization, photography, dynamic range, high dynamic range (HDR), quality, quality assessment.

¹ Departamento de Biblioteconomía y Documentación. Universidad Carlos III de Madrid. E-mail: jroble@bib.uc3m.es. Dirección/Address: Universidad Carlos III de Madrid. C/ Madrid, 126. 28903 Getafe (Madrid).

Versión 25 de septiembre de 2010.

Tabla de contenidos:

1	Introducción.....	3
2	Estado de la cuestión.	5
3	Metodología.....	13
3.1	Primera fase. Captura digital y procesado HDR y LDR.	13
3.2	Segunda fase. Aplicación de parámetros físicos y subjetivos visuales.	21
4	Resultados y discusión.	22
4.1	Capacidad resolutive: SFR.	22
4.1.1	Cálculo de valores óptimos en el rendimiento objetivo y subjetivo de los parámetros relativos a capacidad resolutive.	22
4.1.2	Resultados de las medidas objetivas de parámetros.	26
4.1.3	Resultados de la evaluación subjetiva de parámetros de capacidad resolutive.	31
4.2	Tono.....	40
4.2.1	Evaluación objetiva.	40
4.2.2	Evaluación subjetiva.....	44
4.3	Color.	54
4.3.1	Evaluación objetiva.	54
4.3.2	Evaluación subjetiva.....	59
4.4	Evaluación visual de artefactos.	63
5	Conclusiones.....	65
6	Bibliografía.....	67

1 Introducción.

Este trabajo trata sobre las técnicas de mejora del rango dinámico en las capturas digitales de documentos que se caracterizan por tener un elevado margen de densidades. En digitalización de documentos, el margen de densidades es una variable que representa el rango de intensidades de luz —valores de radiancia— que se reflejan o transmiten desde las superficies de aquellos, portando la información gráfica del documento. El rango dinámico del dispositivo de captura es un parámetro físico que representa la capacidad del dispositivo para poder registrar correctamente ese rango de intensidades de luz en una imagen digital. El registro correcto de márgenes de densidades altos en una imagen digital requiere el empleo de dispositivos de digitalización que cuenten con un alto rango dinámico; pero los dispositivos de captura digital con rangos dinámicos muy altos son muy costosos, desbordando en muchas ocasiones la capacidad adquisitiva de instituciones que deben hacer frente a la digitalización de determinados tipos de documentos que requerirían este tipo de herramientas. En caso de no poder disponer de ellas, se hace preciso acudir al empleo de técnicas de mejora del rango dinámico como alternativa. Estas técnicas introducen métodos de captura y procesamiento digital que permiten extender el rango dinámico del dispositivo, de forma que se puedan obtener unos niveles de calidad en las imágenes digitales de los documentos similares a los que se obtendrían con los dispositivos de mayor coste. Los dispositivos de captura más asequibles en coste y facilidad —y que por ello suelen ser empleados en muchos proyectos de digitalización de patrimonio documental—, tal como escáneres y cámaras fotográficas digitales orientadas al uso doméstico, amateur o profesional de gama baja o media, tienen unos rendimientos en cuanto a rango dinámico muy alejados de los niveles idóneos requiere la captura de muchos tipos de documentos custodiados en fondos con gran valor patrimonial, especialmente, en lo que respecta a documentos fotográficos u obras de arte. Ante esta situación, creemos que es necesario dar a conocer las técnicas de mejora de rango dinámico dentro del contexto de profesionales de la custodia y difusión del patrimonio documental y artístico, así como proponer pautas para su aplicación que estén amparadas en resultados de investigación rigurosos, de tal manera que muchas de las instituciones que actualmente están digitalizando fondos patrimoniales puedan beneficiarse.

Dentro de las técnicas de mejora del rango dinámico, una vía interesante de trabajo para el campo de la digitalización de patrimonio documental son las técnicas que podemos englobar dentro de lo que se suele denominar como Alto Rango Dinámico o, de forma abreviada, como HDR (*High Dynamic Range*). Estas técnicas se basan en la fusión en una única imagen digital de varias capturas tomadas con diferentes valores de exposición. Mediante HDR se hace posible incrementar el rango dinámico en dispositivos de captura que permiten variar el nivel de exposición óptica —la cantidad de luz que incide sobre el sensor— durante la toma de la imagen. Un aspecto muy interesante de estas técnicas es que se pueden aplicar con equipamientos de bajo coste y fácilmente accesibles en el mercado. A lo largo de este estudio, vamos a denominar de forma abreviada como HDR a las imágenes obtenidas por este procedimiento y LDR (*Low Dynamic Range* - Bajo Rango Dinámico) a las imágenes obtenidas mediante una única exposición aplicando procedimientos de captura y proceso convencionales no HDR.

Las técnicas de HDR aplicadas a la captura y registro de imágenes cuyos márgenes de intensidades de luz desbordan la capacidad de los equipos convencionales se vienen aplicando en los últimos años de forma cada vez más masiva en fotografía digital, tanto en el campo amateur como profesional; también han sido objeto de amplia atención por parte de la comunidad científica. Podemos encontrar descritas técnicas HDR con esta finalidad desde los comienzos de la tecnología de la imagen digital, con una alta producción de trabajos científicos desde mediados de la década de 1990 (Burt y Kolczynski, 1993; Debevec y Malik, 1997; Mann y Picard, 1995); aunque este tipo de intentos en lo que respecta a procedimientos de captura automáticos se iniciaron hacia mediados del siglo XIX, poco años después de la invención y difusión de la fotografía físico-química (McCann, 2008).

A pesar del éxito del HDR basado en la fusión de varias capturas, no hemos detectado planteamientos sistemáticos para su aplicación en el campo de la digitalización de patrimonio documental, ni incluso para la mejora de la captura digital de documentos que debido a sus características intrínsecas gráficas no se capturan correctamente con dispositivos convencionales o de coste asequible. La digitalización del patrimonio documental debe regirse por unos requisitos que garanticen la máxima fidelidad en el registro de información gráfica, por ello, la aplicación de cualquier técnica debe ser minuciosamente estudiada para garantizar el cumplimiento de aquellos. Nos encontramos ya en nuestros días con una tecnología HDR aplicada a la imagen digital lo suficientemente madura y con varios productos comerciales o de uso libre de gran calidad; por ello, consideramos que estamos en un momento propicio para investigar la idoneidad aplicación de este tipo de técnicas a la digitalización del patrimonio documental, en especial, a la captura de aquellos tipos de documentos que presentan más exigencias en cuanto al rendimiento en rango dinámico del dispositivo.

La finalidad general del estudio que aquí presentamos es tratar de determinar la viabilidad para la digitalización del patrimonio documental de la aplicación de técnicas HDR ante casos de documentos que presentan amplios márgenes de densidades y, en consecuencia, para los que es difícil o muy costoso encontrar dispositivos que permitan conseguir capturas de calidad sin aplicar técnicas HDR. Los objetivos específicos son: presentar y llamar la atención sobre la importancia de un parámetro, el rango dinámico, que es vital para poder hablar de calidad en las digitalizaciones de documentos, insistiendo en la necesidad de aprender a reconocer cómo se presenta este parámetro y a controlar su calidad; presentar técnicas objetivas y subjetivas para la evaluación del rango dinámico y de defectos de rango dinámico en equipamientos de captura y en imágenes; presentar una técnica HDR basada en la fusión de varias capturas tomadas con diferentes valores de exposición para la mejora del rango dinámico cuando se hace uso de equipamientos que no ofrecen el suficiente rango dinámico como para asegurar el registro correcto de la información tonal de los documentos; y la validación de la idoneidad de la técnica HDR anterior para la captura profesional de patrimonio documental, aplicando conjuntamente parámetros de medida y métricas objetivas junto a evaluación visual subjetiva.

Vamos a abordar la aplicación de HDR a documentos con márgenes de densidades no muy altos, no más de 2,6 D. No obstante, estos márgenes de densidades permiten cubrir buena parte del patrimonio documental y artístico custodiado en archivos, bibliotecas y museos, especialmente aquellos documentos de soporte opaco que se capturan mediante

luz reflejada. Hasta 2,6 D nos movemos en márgenes de densidades típicos de copias fotográficas en color o en blanco y negro. Los documentos manuscritos o impresos tienen generalmente márgenes menores a esta cantidad, por lo que este estudio puede ser válido para una amplia tipología de documentos custodiados en fondos patrimoniales. Por consiguiente, las pruebas sólo hablan del rendimiento de HDR para estos márgenes de densidades. No incluimos documentos con mayores márgenes de densidades, para los que las técnicas de HDR empleadas deberían aplicar mayor complejidad en los procesos de mapeo tonal y, por tanto, producir resultados con menor calidad. Por encima de estos márgenes de densidades podemos encontrar diapositivas o negativos en color y blanco y negro. Insistimos en que no vamos a evaluar un dispositivo concreto, sino a hacer una evaluación comparada del rendimiento en calidad visual de versiones de las mismas capturas procesadas de forma habitual en captura de documentos convencional LDR frente a versiones procesadas mediante HDR.

El estudio que aquí presentamos puede ser de utilidad a aquellas instituciones que custodian patrimonio documental con amplios márgenes de densidades y que no cuentan con suficientes recursos para afrontar su digitalización con equipamiento de digitalización de alto coste. A modo de ejemplo, incluimos datos del coste del equipamiento fotográfico y software para la captura y procesado digital de las imágenes de prueba de este estudio, cuya totalidad suma una cantidad que ronda los 6000 euros. Este equipamiento puede ser fácilmente asequible a instituciones con pocos recursos económicos. Un equipamiento profesional de alta calidad con suficiente potencia para sacar sin defectos estos mismos documentos puede rondar actualmente los 20.000 euros.

La propuesta de aplicación de técnicas HDR que realizamos en este estudio no sería necesaria si pudiéramos disponer de buenos dispositivos de captura que aporten un rango dinámico real de 4.0 de densidad óptica (D), con calidad en el registro de toda la información tonal, cromática y de detalle espacial de los documentos, a precios asequibles, y que además cumplan estas otras condiciones: ser completamente inocuos para el patrimonio documental, poder acoplar un amplio rango de tamaños y condiciones de conservación de los documentos, aptos para documentos encuadernados, aptos tanto para documentos que se capturan tanto con luz reflejada como transmitida, y fáciles de adquirir para todo tipo de instituciones. Pero, desgraciadamente, estas circunstancias distan mucho de lo que podemos encontrar actualmente en el mercado aplicable a patrimonio documental.

2 Estado de la cuestión.

En este estudio nos movemos en el contexto de la calidad de las digitalizaciones de documentos. Podemos entender la calidad como ausencia de defectos que pueden provocar que las imágenes digitales resultantes no permitan satisfacer los objetivos del proyecto de digitalización. Cuando no hay suficiente calidad, las imágenes ven mermadas sus posibilidades de uso para la comunidad de usuarios receptora. Un factor de calidad muy importante es el dispositivo de captura, con todos sus elementos críticos: la óptica, el sensor, el sistema de iluminación, los métodos de procesado analógico o digital aplicados, o la calibración y caracterización. Otros factores están relacionados con cómo se trabaja con el dispositivo durante el acto de captura o con el procesado digital posterior a la captura que se aplica a las imágenes recién obtenidas. En los últimos años asistimos a una amplia producción científica en el campo del control de calidad de

dispositivos de captura digitales, que de forma gradual está incorporándose en el contexto de la digitalización de patrimonio documental (Frey y Reilly, 2006; Berns y Frey, 2006; Williams, 2002; Williams, 2003; Kenney y Rieger, 2000; Stelmach, 2010). Un ejemplo de aplicación real en este campo lo tenemos en las especificaciones técnicas de NARA (U.S. National Archives and Records Administration)(Puglia y otros, 2004) o en el *GAP Analysis* (Still Image Working Group, 2010), en los que se han llegado incluso a identificar aquellos aspectos tecnológicos relacionados con el control de calidad en las digitalizaciones de patrimonio documental que deben ser mejorados y recibir más atención por parte de la comunidad científica. Otro trabajo relevante al respecto lo tenemos en el campo de la normalización de métodos y cartas de control, donde es especialmente activo del Grupo ISO/TC42. De este grupo han emanado importantes estándares (ISO, 2000; ISO 2003a; ISO, 2003b; ISO, 2004a; ISO, 2004b; ISO, 2009a; ISO, 2009b; Loebich y Wueller, 2001; Williams, 2003). En este sentido, es importante la iniciativa para la creación de una carta unificada estandarizada a partir de la cual se puedan evaluar todos los parámetros físicos relevantes para medir la calidad de un dispositivo de captura: la *Universal Test Target* (Wueller y otros, 2009). La investigación en métodos de evaluación de rendimiento en equipamiento de captura digital de imágenes se ha visto incrementada significativamente en los últimos años desde los campos de la Ciencia y Tecnología de la Imagen (Wueller, 2006; Loebich y otros, 2007). Todo este trabajo ha dado sus frutos también como implementación y comercialización de paquetes de aplicaciones software y cartas de control normalizadas para poder realizar de forma relativamente sencilla la evaluación, tales como IE Analyzer de Image Engineering², Golden Thread de Image Science Associates³ e Imatest⁴.

La calidad de una imagen digital puede ser controlada y evaluada mediante tres tipos de parámetros, de cuya interrelación podemos derivar una ecuación de calidad técnica: variables tecnológicas, parámetros físicos y parámetros mecánicos. Las variables tecnológicas aluden a los parámetros que configuran la captura digital, tales como los píxeles por pulgada —para configurar el muestreo espacial del dispositivo—, o la profundidad de bits en la conversión analógico-digital —para configurar el rango de valores de cuantización—. No hay que confundir variables tecnológicas con parámetros de calidad. Es frecuente en las directrices de digitalización de muchas instituciones ver erróneamente identificadas variables tecnológicas con calidad técnica. Los tres elementos de la ecuación de calidad actúan de forma interrelacionada. No es de ninguna utilidad aportar valores de variables tecnológicas en unas directrices de digitalización sin correlacionarlos con valores interdependientes en los otros dos tipos de elementos. La calidad no depende sólo de los valores que asignamos a las variables tecnológicas durante el proceso de captura o procesamiento digital tras la captura; sino también del rendimiento del equipo de captura para esos valores. Normalmente, en la digitalización de patrimonio documental elegimos los valores de esas variables de acuerdo a la información que queremos registrar: por ejemplo, si quisiéramos registrar correctamente líneas de 0,1 mm deberíamos digitalizar con una resolución espacial de 600 píxeles por pulgada, de forma que el ancho de detalle más fino sea cubierto al menos por dos píxeles. Pero este valor de muestreo no garantiza que registremos bien esas líneas de

² Sitio Web en http://www.image-engineering.de/index.php?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=50

³ Sitio Web en <http://www.imagescienceassociates.com/>.

⁴ Sitio Web en <http://www.imatest.com/>.

0,1 mm, pues si el dispositivo de captura no tiene suficiente capacidad resolutive no se podrán registrar detalles tan finos, por más que aumentemos la resolución de muestreo.

Los parámetros físicos permiten evaluar el rendimiento de los equipos de captura con respecto a los valores de las variables tecnológicas elegidos; siguiendo con el ejemplo anterior, para evaluar la capacidad resolutive a una resolución espacial de captura dada, podemos aplicar una función MTF cuyo valor nos indicará la calidad del registro a ese valor de muestreo. Otros parámetros físicos que se suelen emplear en la evaluación de calidad de los dispositivos digitales de captura son: OECF (Función de Conversión Opto-Electrónica), rango dinámico, error en el registro del color, aberración cromática, distorsión óptica, uniformidad y ruido. Es preciso evaluar tanto dispositivos como procedimientos de procesamiento digital en cuanto al rendimiento de los diferentes parámetros físicos con distintas configuraciones de variables tecnológicas. Esto nos permite conocer los límites de los dispositivos y procesamientos digitales que vamos a aplicar y saber cómo proceder: desechar el dispositivo o aplicar funciones de edición digital que aminoren los problemas que han sido detectados.

Los parámetros mecánicos se usan en la evaluación de la incidencia en la calidad final de la imagen de las operaciones de manipulación física del dispositivo y documentos durante la captura. Los parámetros mecánicos que suelen ser más considerados en el control de calidad son: la curvatura del documento, su grado de inclinación, la presencia de elementos extraños al documento, la presencia de reflejos, dobleces, suciedad, la corrección en la orientación, o la omisión de fragmentos del propio documento.

Nos vamos a centrar en uno de los parámetros físicos más importantes en la captura digital de patrimonio documental: el rango dinámico. Como indicamos más atrás, este parámetro alude a la capacidad de registro de los niveles de intensidad de luz reflejados, transmitidos o emitidos por el documento o los diferentes elementos de una escena a capturar. En el ámbito de la Ingeniería de la Imagen podemos encontrar estudios que analizan con rigor todos los factores que determinan el rango dinámico en dispositivos de captura digital. Un estudio en profundidad de los factores que determinan el rango dinámico en la captura digital y las ecuaciones que lo modelan lo podemos encontrar en el trabajo de Xiao y DiCarlos (Xiao y otros, 2002). La complejidad para controlar estos factores y el alto costo de los elementos ópticos y de procesado electrónico requeridos para su optimización explican el alto costo de equipos eficientes en rango dinámico. Hemos de considerar que en los casos en que el dispositivo permite variar la exposición durante la captura —variando el diámetro de abertura del diafragma del objetivo, el tiempo de exposición o la intensidad de luz—, lo relevante con respecto al rango dinámico son los niveles de intensidad de luz relativos, es decir, la razón entre la máxima y mínima intensidad de luz que debe ser registrada, pues los niveles absolutos variarán en función de cómo se ajuste la exposición durante la toma de la imagen. Cuando hablamos de la captura digital de documentos, el rango dinámico se correlaciona con los niveles máximo y mínimo de densidad óptica presentes en el documento a capturar, expresándose en unidades de densidad óptica. El rango dinámico es resultado de restar las densidades óptica máxima y mínima que el dispositivo puede registrar con calidad. La densidad óptica alude a la capacidad de una superficie para retener parte de la luz que incide sobre ella; por ello, este parámetro es un buen indicativo del rango de niveles de intensidad de luz relativos que puede desprender un documento al ser iluminado durante la captura, aportándonos una referencia objetiva que nos informa sobre del rango dinámico que necesita tener el dispositivo de captura

para el correcto registro de toda la información gráfica del documento. La densidad óptica se expresa como:

$$\text{Densidad Óptica} = -\log_{10} \text{ del factor de transmisión o de reflexión,}$$

siendo el factor de transmisión el cociente entre el flujo luminoso que transmite un cuerpo transparente y el flujo incidente, y el factor de reflexión el cociente entre el flujo luminoso reflejado por un cuerpo opaco y el flujo incidente.

En general, el rango dinámico de un dispositivo de captura idóneo para la digitalización de la superficie de un documento debe ser igual o mayor que el rango de densidades de esa superficie. El rango de densidades es comúnmente denominado como margen de densidades, siendo el resultado de restar la máxima y mínima densidad óptica de la superficie a capturar.

Los problemas de calidad en las imágenes debidos a escasez de rango dinámico pueden ser realmente graves: o bien no se captura toda la información gráfica del documento, o parte de esta información queda registrada de forma defectuosa, limitándose en gran medida las posibilidades de uso posterior de las imágenes digitales. Este problema es especialmente grave cuando se digitalizan documentos gráficos, fotográficos u obras de arte. Cuando falta rango dinámico podemos considerar que las digitalizaciones son erróneas. El problema de rango dinámico suele pasar desapercibido cuando no se tiene suficiente formación; pero lastrará las posibilidades presentes y futuras de uso de un fondo digital. Los principales defectos que muestran las imágenes capturadas con poco rango dinámico son la posterización y el recorte tonal de luces o sombras; ambos suelen presentarse de forma conjunta. La posterización es también usualmente denominada como artefactos de cuantización; el recorte tonal como *clipping*. Evitar estos dos problemas es el objetivo principal del empleo del HDR.

La posterización se produce cuando un conjunto determinado de valores tonales diferenciados —intensidades de luz— adyacentes o cercanos, tomados de una escena o documento a capturar digitalmente, se intenta representar mediante un número más reducido de valores digitales en la imagen resultante de su captura; esto es, la entrada de valores tonales en el dispositivo de captura es mayor que su salida en la imagen digital. Como resultado de la posterización, las gradaciones tonales sutiles de una imagen se ven sustituidas por zonas de tono uniforme a modo de bandas o manchas de extensión variable, que se pueden hacer bien visibles al ojo humano si su incidencia es alta. La posterización no es algo que afecta sólo a capturas digitales a bajas profundidades de bits (8 bits o menos por canal de color); desgraciadamente, es frecuente incluso que se produzca en las capturas digitales a altas profundidades de bits, como es el caso de las imágenes de prueba realizadas para este estudio, que han sido capturadas a 16 bits por cada canal de color RGB. En este tipo de capturas la posterización se produce cuando zonas importantes de información gráfica de la imagen original se capturan con valores tonales excesivamente oscuros para el límite de rango dinámico concreto del dispositivo de captura que se está usando. El sensor del dispositivo de captura recibe de esas zonas menos luz y las registra, consiguientemente, subexpuestas. Estas zonas tonales más oscuras coinciden con las zonas más densas de los documentos a digitalizar. Si el dispositivo de captura no cuenta con suficiente rango dinámico esas zonas oscuras del documento son llevadas cerca del extremo de tonos de sombras durante la captura, en los casos en que se haga una exposición normal, esto es, que no se sobreexponga la

captura. Al ser llevadas a ese extremo se posterizan. La posterización de las zonas tonales más oscuras se produce en los dispositivos digitales debido a la asignación lineal de bits a los diferentes rangos de intensidad de luz que se aplican durante el momento de la conversión analógica digital, a pesar de que la información luminosa decrece de forma logarítmica con la exposición —si bajamos un paso la exposición que aplicamos al documento (un diafragma o valor de exposición), todos los tonos ven reducido su intensidad al 50%; si volvemos a bajar otro paso al anterior, la reducción es un 50% con respecto a la intensidad del paso que le precede, pero, consecuentemente un 25% con respecto al primer valor de exposición de partida, es decir, la reducción ha sido cuatro veces mayor—. Esto provoca que un rango tonal determinado, a medida que se va llevando a las zonas de sombra durante la captura, se vaya comprimiendo con respecto a la escala lineal de asignación de bits y, consecuentemente, recibiendo menor número de bits para su descripción, y, por tanto, una menor posibilidad de que se le asignen valores tonales en la imagen digital final. El resultado es que si la información correspondiente a las zonas más oscuras presenta una cierta gradación tonal y se ha llevado cerca del límite del rango dinámico del sensor, se verá sustituida por bandas o zonas de color sólido uniforme, perdiéndose el detalle y degradándose en gran medida su calidad visual.

En dispositivos con bajo rango dinámico este problema puede ser muy crítico cuando se trata de documentos con amplios márgenes de densidades, como pueden ser las imágenes fotográficas muy contrastadas, pues muchas zonas del documento pueden quedar posterizadas. Además, al efecto de la posterización hay que sumar el recorte tonal provocado por la escasez de rango dinámico, que se produce en los tonos de sombra cuya escasa intensidad de luz desborda la capacidad de detección del sensor: la información gráfica correspondiente a esos tonos desaparece en el registro de la imagen quedando registrado un único valor para esas zonas. Si a estos dos problemas sumamos la mayor incidencia de ruido al aplicarse a la imagen la corrección de gamma y contraste necesarias para su visualización, la calidad de la captura quedará seriamente entredicho.

Para mejorar la comprensión de los defectos que queremos medir incluimos a continuación dos imágenes explicativas. La imagen de la figura 1 muestra la comparativa de la captura de una zona con información tonal de alta densidad de una fotografía junto con los parches más densos de la escala de parches de densidad Q13 de Kodak. Hemos aumentado el valor gamma de las capturas drásticamente para que se hagan más manifiestos los defectos que queremos documentar. La primera fila muestra la captura subexpuesta, con dos valores de exposición menos de lo que le correspondería; la segunda fila muestra lo mismo pero con una exposición normal. Los defectos aparecen señalados. En la exposición normal hay posterización, pero su incidencia es menor que en la subexposición, debido a que el sensor del dispositivo de captura recibe más luz de las zonas de alta densidad.

Fig. 1
Comparativa de incidencia de problemas de rango dinámico en función de diferentes valores de exposición.

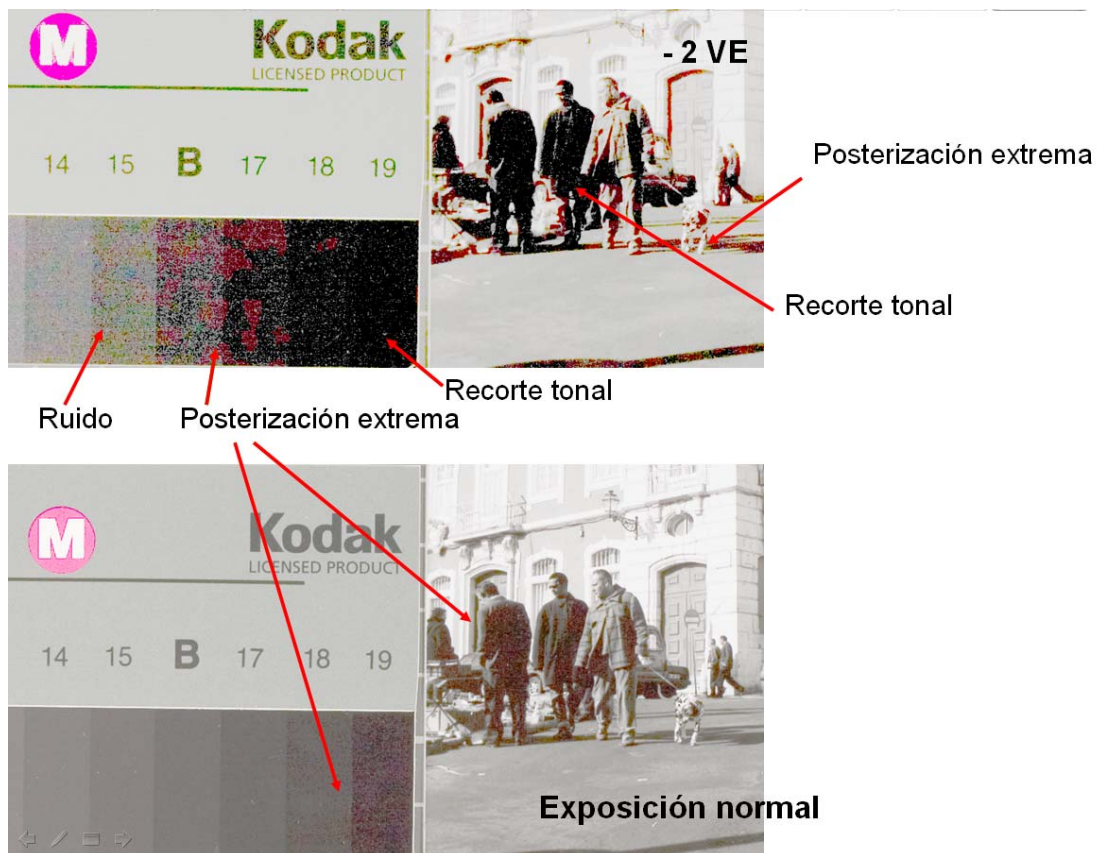
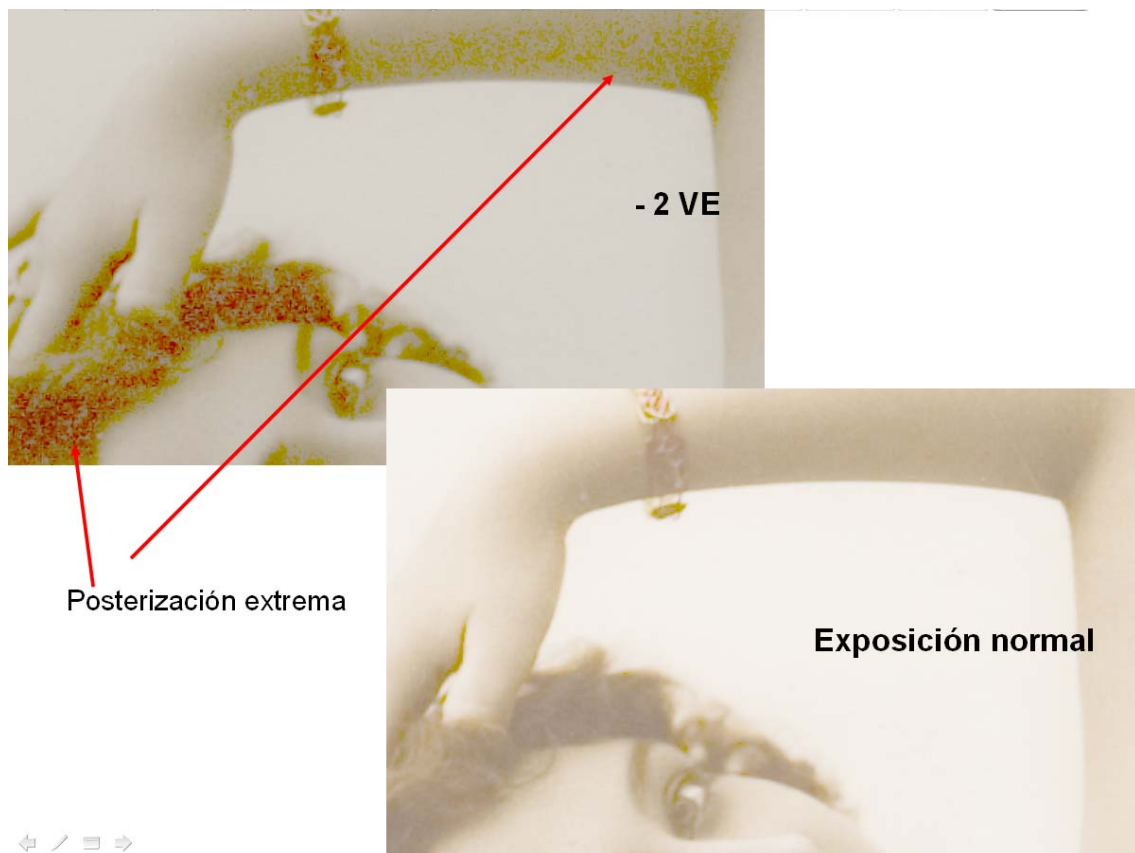


Fig. 2
Comparativa de incidencia de posterización en función de diferentes valores de exposición.



Las imágenes presentadas en las figuras uno y dos ejemplifican cómo a medida que la información gráfica va quedando subexpuesta, es decir, que es llevada durante la captura a zonas de sombra (o lo que es lo mismo, las intensidades de luz provenientes de las zonas de densidad de la superficie del documento se llevan a valores digitales más bajos) se va incrementando la posterización y el recorte de los tonos de sombra. Las gradaciones tonales sutiles del brazo y el pelo, en la imagen subexpuesta de la figura 2, han quedado reducidas a bandas de tono y color uniforme, perdiéndose esa información gráfica tan importante en este documento.

Las técnicas de captura de varias imágenes a diferentes exposiciones del HDR tratan de evitar la posterización de las zonas de sombra aprovechando la descripción de esas zonas en las imágenes sobreexpuestas. En las imágenes sobreexpuestas las zonas más densas despiden más luz; por lo que son llevadas a niveles de intensidad luz a los que el dispositivo de captura asigna suficientes bits como para garantizar que no quedan posterizadas. Por tanto, el HDR permite lo que algunos autores denominan como *improved quantization* (McCann, 2008): una cuantización mejorada que permite registrar digitalmente y presentar a los observadores humanos la información espacial del documento origen con mayor calidad.

El rango dinámico insuficiente para captar los márgenes de densidades de los documentos responde fundamentalmente a limitaciones de los sensores que usan los equipos de captura. Actualmente la fabricación de sensores con alto rango dinámico está limitada a los equipos de más alto precio, debido a su complejidad. Posiblemente, con la evolución tecnológica este problema no se presente de aquí a unos años. Algunos sensores como el Super CCD de Fuji, que incorporan algunas de sus cámaras fotográficas digitales, se adaptan a este problema empaquetando juntos dos clases de fotodiodos de forma ortogonal y de diferente tamaño de forma que el sensor responda mejor al registro de toda la gama de intensidades de luz. Algunos escáneres y programas de escaneado permiten aplicar una tecnología basada en la toma de varias imágenes con diferentes exposiciones para la ampliación del rango dinámico del equipo o para la reducción del ruido.

El HDR se basa en realizar diferentes imágenes de la escena o documento a digitalizar. Cada imagen se realiza con un valor de exposición distinto, de forma que se asegure que cualquier nivel de intensidad de luz de la captura quede registrado con calidad suficiente al menos en alguna de ellas. A partir de este conjunto de imágenes se calcula una nueva imagen con un rango dinámico muy amplio. Esto es, el conjunto de imágenes capturadas se fusiona en una única imagen que contiene la representación de todo el rango de luminancias captado en las anteriores. La idea es relativamente sencilla: las diferentes intensidades de luz que se derivan de una escena o documento generan en el dispositivo de captura diferentes dígitos, cuyo valor será más alto o más bajo en función de la intensidad. Las mayores exposiciones recogen más fotones de cada nivel de intensidad de luz de la escena y, por consiguiente, van moviendo las zonas más oscuras hacia las zonas del sensor donde la capacidad de registro es mejor; esto es, el sensor las registra como intensidades más altas, al recibir más fotones de ellas. Entonces, las exposiciones más altas permiten que las zonas más oscuras de las escenas o documentos tengan una mejor cuantización, cayendo en rangos de valores numéricos a los que el conversor analógico digital aplica mayor número de bits para la cuantización de las intensidades de luz. En definitiva, se trata de capturar en una imagen HDR todo el rango de luminancias de la escena o documento a digitalizar y que ese rango sea descrito con calidad, es decir, con suficiente número de bits, evitando el problema de los artefactos de cuantización en las zonas de sombra y del recorte de sombras y luces. En realidad, lo que hacemos mediante la multiexposición combinada es simular un dispositivo virtual ideal con un rango dinámico suficiente como para capturar la totalidad de la información gráfica (color, tono, detalle espacial) del documento o escena con calidad. Pero a pesar de que mediante este tipo de técnicas HDR se puede registrar la información espacial de una escena de alto contraste, no es posible captar correctamente el rango de luminancias de una escena (McCann y Rizzi, 2009).

Para el almacenamiento del fichero máster HDR, que es producto de la fusión de las múltiples exposiciones, se usan formatos específicos que contienen en una única imagen HDR toda la información capturada en varias tomas con diferentes exposiciones. Su profundidad de bits puede llegar a ser muy alta, como en el caso del TIFF de coma flotante, hasta 96 bits (32 bits por canal). Las imágenes representadas en estos ficheros no son visibles directamente en monitores convencionales, LCD o CRT, debido a su limitada razón de contraste y gama de colores, por lo que es necesario aplicar lo que se denomina como métodos de compresión de luminancias o de mapeo tonal (*tone mapping*) y de mapeo de gama (*gamut mapping*) (Mantiuk y otros, 2005). Mediante el mapeo tonal las imágenes pasan a una versión LDR para su visualización e impresión,

con una profundidad de bits de 16 u 8 bits por canal. En el proceso de mapeo es cuando se selecciona del total de tonos de luz y color captados en el rango dinámico, aquellos que van a ser incluidos en el margen de densidades y espacio de color del dispositivo de visualización o impresión.

En el caso de digitalización de documentos, en los másteres HDR tendríamos representada toda la gama de luminancias relativas que desprende el documento, que salvo casos muy excepcionales (como pueden ser diapositivas con muy alto contraste que pueden llegar a rangos dinámicos de 4D), su ratio de contraste no debería abarcar más de 3 órdenes de magnitud, esto es, una densidad óptica superior a 3.0. Gracias a esta particularidad, no necesitaríamos para el patrimonio documental mapeos tonales muy drásticos, como los que son requeridos en el caso de escenas tomadas de la vida real muy contrastadas. Esos 3 órdenes de magnitud, o 4 a lo sumo, los podemos vehicular sin problemas en ficheros con salida a 16 u 8 bits por canal mediante un procedimiento de mapeo básico que requeriría una nula o mínima compresión del histograma. En el caso de digitalización de documentos, lo que queremos conseguir con el HDR es no portar unos ratios de contraste con elevados órdenes de magnitud, ni siquiera poder reproducir con exactitud todas las luminancias del documento en el momento de la captura, sino tener representada toda la información de densidades del documento sin problemas de posterización, sin ruido visible y con calidad; es decir, capturar toda la información espacial sin distorsiones. El problema que nos encontramos al tratar de aplicar las técnicas HDR al campo del patrimonio documental es que han sido ideadas especialmente para la toma fotográfica de escenas con altas razones de contraste, pero no para digitalización con función de registro fiel de las características gráficas intrínsecas de los documentos patrimoniales, donde se precisa una amplia garantía de fidelidad. Se hace precisa una mayor investigación sobre la posibilidad de aplicar estas técnicas para la digitalización profesional de documentos, analizando todas las variables físicas implicadas mediante aplicación de técnicas de medidas objetivas de parámetros físicos junto a evaluación visual.

3 Metodología.

3.1 Primera fase. Captura digital y procesado HDR y LDR.

Para las capturas se ha utilizado una cámara réflex digital de formato pequeño de gama media-alta: una cámara Canon EOS 5D, equipada con un objetivo macro de 50mm de distancia focal. Se ha buscado un modelo de cámara de coste medio, profesional, con una relación calidad/precio equilibrada y asequible, típica de centros o instituciones con pocos recursos. La cámara se ha acoplado a un stand de reproducción Kaiser con dos lámparas de luz fluorescente de espectro continuo de 36 W, con temperatura de color de luz de día (5.400 K). La uniformidad de luz en el área de captura se ha controlado mediante un fotómetro. La cámara ha sido calibrada y caracterizada con una carta de gris de 18% de reflectancia y una carta Colorchecker de X-rite. La cámara digital tiene un sensor CMOS con 4368x2912 píxeles útiles. La sensibilidad se ha ajustado a ISO 100, la mínima de la cámara, para minimizar el ruido. Las capturas se han realizado en formato RAW nativo de la cámara, que posteriormente han sido procesados en un editor Adobe PhotoShop CS4, mediante el plugin Adobe Camera RAW. La caracterización de la cámara se ha realizado aplicando los mismos ajustes del procesado RAW aplicados a las imágenes de las capturas. Los ajustes aplicados han sido: 16 bits por canal de color;

captura en espacio Adobe RGB; máxima resolución espacial óptica de la cámara; negros 5; Brillo +50; Contraste +25; enfoque (cantidad 25, radio 1, detalle 25, máscara 0); reducción de ruido (de color 25, de luminancia 0). Hemos comprobado como estos valores representan un ajuste de contraste que es típico en muchos escáneres y escaneados de documentos patrimoniales, por lo que nos ha parecido correcto tomarlos como base.

Se han preparado dos grupos de documentos (denominados, respectivamente, grupo 1 y grupo 2). De cada grupo se han hecho dos capturas (denominadas, respectivamente, imagen 1 e imagen 2). Las capturas del primer grupo contienen:

- Carta Q13 y carta Q14, ambas de Kodak. Nos permitirá evaluar el rendimiento en el registro tonal: rango dinámico, gamma, contraste y ruido.
- Carta Colorchecker mini de X-rite. Nos permitirá evaluar el rendimiento en el registro del color.
- Dos cartas SFR quadrants. Nos permitirá evaluar el rendimiento en el registro del detalle espacial de forma objetiva mediante la aplicación de una función MTF. La imagen 2 de este grupo no contiene este tipo de cartas.
- Carta PM-189. Nos permitirá evaluar el rendimiento en el registro del detalle espacial de forma subjetiva, mediante evaluación visual.

Las capturas del segundo grupo contienen elementos de control y testigos con unas características gráficas comunes a documentos típicos de patrimonio documental gráfico fotográfico:

- Carta IT.8 reflectante. Se ha incluido únicamente la imagen 1 de este grupo.
- Carta Colorchecker mini.
- Cartas Q13 y Q14 de Kodak.
- Fotografías en blanco y negro modernas, con un amplio de densidades típico, ligeramente superior a 2 D.
- Fotografía en monocromo histórica, de principios del siglo XX, iluminada a mano con anilinas.
- Fotografías en color cromógeno contemporáneas.
- Testigo con un amplio margen de densidades. Una diapositiva en color capturada como si fuera material reflectante. Este testigo nos permitirá medir el comportamiento del HDR en zonas de densidad muy altas pero con mucho detalle gráfico espacial.

Los procedimientos fotográficos seleccionados para las muestras son comunes en muchos fondos fotográficos patrimoniales.

Se ha pretendido incluir en las capturas de prueba elementos que permitan evaluar visualmente y objetivamente los diferentes parámetros de rendimiento que se han incluido en el estudio. La duplicación de capturas que se hace en cada uno de los grupos corresponde a la necesidad de cotejar que el rendimiento de la técnica HDR sea constante captura a captura, y, por consiguiente, los resultados consistentes.

Por cada una de las imágenes de cada grupo se ha generado una versión en HDR, producto de la fusión de varias tomas realizadas con diferentes valores de exposición.

Desde cada versión HDR se ha generado una versión LDR, tras aplicar un proceso de mapeo tonal. Asimismo se ha realizado una versión LDR convencional de cada una de las cuatro capturas partiendo de tomas realizadas con un valor de exposición típico para la digitalización de documentos. La idea es cotejar el rendimiento de estas capturas LDR con el rendimiento de las correspondientes imágenes LDR derivadas de las versiones HDR.

En la literatura especializada en HDR se ha puesto ampliamente de manifiesto el gran impacto que en la calidad de la imagen HDR tienen, tanto el número de capturas tomadas a diferentes valores de exposición como los valores concretos de exposición que se aplican a esas capturas (Grossberg y Nayar, 2003; Reinhard y otros, 2006). También podemos encontrar métodos que ayudan a la operación de cálculo de las exposiciones requeridas en función de rango de luminancias a registrar en el HDR (Grossberg y Nayar, 2003). El método que hemos elegido ha sido averiguar qué margen de exposiciones nos permite, por una parte, evitar la presencia de artefactos de cuantización en las zonas más densas de los documentos, y, por otra, llevar las zonas menos densas a zonas del histograma con suficiente margen en las zonas de luces como para evitar su recorte al aplicar funciones de ajuste de contraste. Hemos partido de una captura con exposición normal, para un parche de gris del 18% de reflectancia, y hemos realizado capturas abriendo el diafragma paso a paso hasta conseguir que las zonas más densas, en torno a 2,6 D, lleguen en la captura más sobreexpuesta a valores de luminosidad L (CIELAB) cercanos a 40, con un ajuste gamma durante el procesado del fichero RAW cercano a 2. Eso garantiza ausencia de errores de cuantización (posterización) y ruido visible en la versión HDR en esas zonas. Para las zonas menos densas, hemos procedido a la inversa, haciendo varias capturas, cerrando progresivamente el diafragma, paso a paso, de forma que en el extremo de las zonas más claras, en torno a 0,05 D, la imagen más subexpuesta llegue a valores de luminosidad L (CIELAB) cercanos a 40, con lo que les garantizamos asimismo una buena representación en la versión HDR. Con ocho exposiciones distanciadas entre sí por un valor de exposición (un paso de diafragma) hemos conseguido este objetivo. El ratio de contraste de las imágenes de prueba con más margen de densidades es de aproximadamente 400:1, por lo que no estamos ante la necesidad de mapeos tonales drásticos, ni de un número mayor de capturas, como podría ser la captura de una escena muy contrastada con sol visible y objetos en sombra, donde podríamos tener ratios de contraste de más de 6 órdenes de magnitud. Hemos de considerar que cuando tomamos varias exposiciones del mismo documento o muestra de documentos, cada una de las exposiciones registra nueva información gráfica con calidad aceptable, en cuanto a color, tono y detalle espacial de las diferentes zonas de luminancias presentes. Se ha tratado, en definitiva, de que todas las zonas de luminancias estén bien representadas en la totalidad de las capturas, para poder llevar posteriormente y de forma automática el registro mejor de cada zona a un único fichero HDR máster. Ese fichero máster no podrá ser usado directamente, pues su función es describir la información original captada y la imagen que contiene no está adaptada a las posibilidades de visualización o impresión de ningún dispositivo. A partir de ese fichero HDR máster, mediante una operación de mapeo tonal hemos creado las versiones LDR adaptadas a dispositivos de visualización o impresión. Estas versiones las hemos denominado Mapeados LDR.

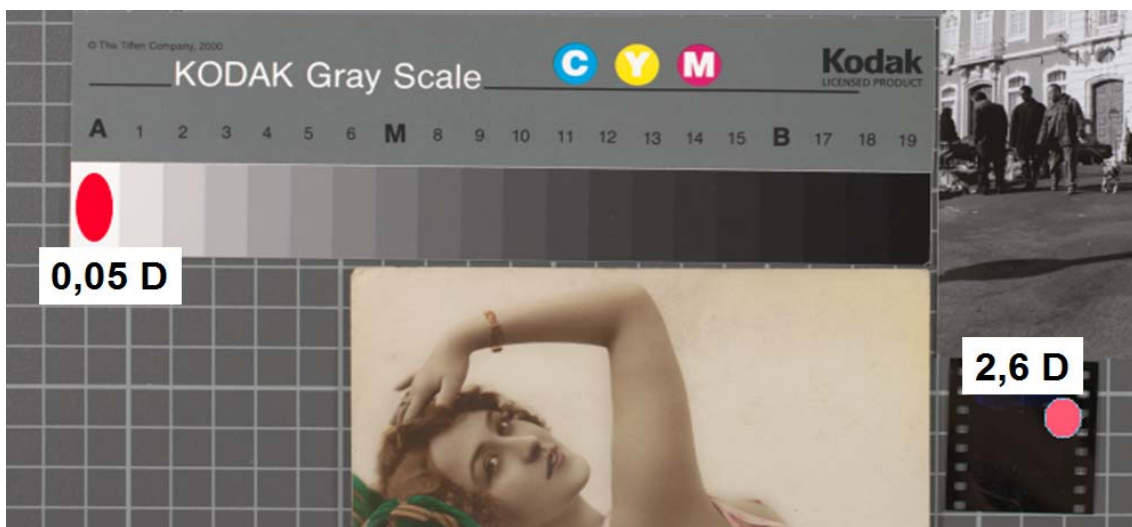
Para cada uno de los dos grupos de imágenes, se han realizado ocho capturas, con una diferencia de un valor de exposición (VE): una de ellas a exposición para carta de grises del 18%; tres de ellas subexpuestas consecutivamente un VE; y cuatro de ellas

sobreexpuestas consecutivamente un VE. Se ha mantenido la abertura del diafragma y la sensibilidad del sensor (el valor ISO) en todas las capturas, variándose la exposición mediante el aumento o disminución del tiempo de exposición. Los datos de la captura expuesta para carta de gris de 18% son: f/5.0 y 1/15 segundos.

Los datos de generación de las imágenes HDR son: fusión HDR automática con Adobe PhotoShop CS4, y función Fusionar para HDR. A pesar de que para las diferentes capturas se ha usado un disparador a distancia con la intención de evitar las vibraciones, para mayor seguridad se ha aplicado en el procesado HDR la función de alineación automática de las tomas, que corrige automáticamente pequeños movimientos de cámara que puedan provocar pérdida de detalle. Esta opción puede implicar la pérdida de unos pocos píxeles (entre 2 y 6 en las pruebas realizadas en este estudio). Se han usado las ocho capturas para la generación de los ficheros HDR, generándose un fichero HDR en formato TIFF coma flotante 32 bits por canal de color (96 bits totales de profundidad de bits) por cada una de las imágenes de cada grupo.

La densidad máxima y mínima capturada en las tomas del segundo grupo son, respectivamente, de 2,6 D y 0,05 D. Que aportan un margen de densidades de 2,55 D, o lo que es lo mismo, 8,5 pasos de diafragma (f/stops o VE). En la imagen siguiente aparecen identificadas estas zonas de densidad.

Fig. 3
Identificación de zonas extremas de densidad en las capturas de prueba.



A continuación indicamos los nombres de cada una de las capturas, junto a los datos de la exposición que les ha sido aplicada.

Primer Grupo HDR

Los datos de exposición de cada una de las capturas empleadas para hacer la primera imagen HDR fusionada son los presentados en la tabla I.

Tabla I

Datos de exposición de las capturas para la primera imagen HDR.

Identificador de imagen	Tiempo de exposición en segundos	Sobre/Sub-exposición
_MG_0381.CR2	1/125	-3
_MG_0380.CR2	1/60	-2
_MG_0379.CR2	1/30	-1
_MG_0378.CR2	1	+4
_MG_0377.CR2	0,5	+3
_MG_0376.CR2	1/4	+2
_MG_0375.CR2	1/8	+1
_MG_0374.CR2	1/15	Exposición correcta

Los datos de la segunda imagen HDR son los presentados en la tabla II.

Tabla II
Datos de exposición de las capturas para la segunda imagen HDR.

Identificador de imagen	Tiempo de exposición en segundos	Sobre/Sub-exposición
_MG_0373.CR2	1/125	-3
_MG_0372.CR2	1/60	-2
_MG_0371.CR2	1/30	-1
_MG_0370.CR2	1	+4
_MG_0369.CR2	0,5	+3
_MG_0368.CR2	1/4	+2
_MG_0366.CR2	1/8	+1
_MG_0365.CR2	1/15	Exposición correcta

La resolución espacial efectiva del área de captura en píxeles por pulgada en ambas imágenes es de 246,55 ppp.

Segundo Grupo HDR

Los datos de la primera imagen HDR de este grupo aparecen en la tabla III.

Tabla III
Datos de exposición de las capturas para la tercera imagen HDR.

Identificador de imagen	Tiempo de exposición en segundos	Sobre/Sub-exposición
_MG_0362.CR2	1/125	-3
_MG_0361.CR2	1/60	-2
_MG_0360.CR2	1/30	-1
_MG_0359.CR2	1	+4
_MG_0358.CR2	0,5	+3
_MG_0357.CR2	1/4	+2
_MG_0356.CR2	1/8	+1
_MG_0355.CR2	1/15	Exposición correcta

La resolución espacial efectiva del área de captura en píxeles por pulgada es de 253,3 ppp.

Los datos de la segunda imagen HDR de este grupo se muestran en la tabla IV.

Tabla IV
Datos de exposición de las capturas para la cuarta imagen HDR.

Identificador de imagen	Tiempo de exposición en segundos	Sobre/Sub-exposición
_MG_0353.CR2	1/125	-3
_MG_0352.CR2	1/60	-2
_MG_0351.CR2	1/30	-1
_MG_0350.CR2	1	+4
_MG_0349.CR2	0,5	+3
_MG_0348.CR2	1/4	+2
_MG_0347.CR2	1/8	+1
_MG_0346.CR2	1/15	Exposición correcta

La resolución espacial efectiva del área de captura en píxeles por pulgada de esta segunda imagen es de 197,24 ppp.

A partir de cada uno de los cuatro ficheros HDR máster a 96 bits, se ha generado una versión LDR con mapeo tonal a 16 bits por canal de color RGB. A estas versiones las denominamos *Mapeadas HDR*. La función de las versiones mapeadas es poder evaluar los parámetros físicos de forma objetiva y subjetiva. También nos hemos puesto en el caso de que la versión HDR tiene un tamaño, profundidad de bits y formato que dificultan su uso directo, y que en instituciones patrimoniales, prácticamente cualquier tipo de uso requerirá una versión mapeada. El mapeo tonal se ha hecho desde el mismo programa Adobe PhotoShop CS4, aplicando el operador de mapeo *Exposición y gamma*, con los siguientes parámetros de conversión: gamma 1 y exposición 0,50. Estos valores generan una curva de contraste que arroja valores adecuados para la generación y aplicación de un perfil de color ICC sobre la base de la carta Colorcheckr.

El mapeo tonal es una operación encaminada a comprimir la amplia gama de intensidades de luz registrada en una imagen HDR a una gama tonal más reducida

propia de formatos de fichero no HDR o de dispositivos de visualización o impresión de imágenes no HDR. Por ejemplo, en una imagen de una escena muy contrastada registrada en una imagen HDR podríamos tener una razón de contraste de 60.000:1 (cuatro órdenes de magnitud); si vamos a pasar esa imagen a un papel fotográfico convencional mediante una impresora fotográfica digital, se hace preciso pasar desde la razón de 60.000:1 a una razón aproximada de 100:1, la razón de contraste posible dentro del margen de densidades limitado que puede ser registrado mediante este tipo de impresoras y de papel fotográfico. Ese paso se realiza mediante una operación de mapeo tonal que comprime los 60.000 posibles tonos registrados en la imagen HDR en no más de 100. Debido a su alta complejidad, el mapeo tonal se hace de forma completamente automática, mediante algoritmos denominados operadores de mapeo tonal. El mapeo tonal se podría simplificar enormemente si se aplicara una compresión lineal pura, es decir, dividir 60.000 entre 100 para obtener 600 grupos de tonos de entrada por cada tono de salida y seleccionar uno de esos 600 tonos de entrada. Esa operación es computacionalmente muy fácil y rápida, pero el problema sería una imagen irreal, plana, con poca información interesante y demasiado oscura y sin detalle en las sombras. Los operadores de mapeo tonal trabajan de forma bastante más sofisticada e inteligente para procurar una selección tonal que permita que la imagen mapeada incorpore la información más interesante de la imagen HDR, la que más aproxima la imagen a la escena real captada mediante la técnica HDR (Freeman, 2009). En el caso de documentos patrimoniales, donde lo que debe mandar es la fidelidad de apariencia entre reproducción digital y el documento original, el mapeo debe procurar que estén representados con calidad, sin ruido ni posterización o sin cualquier otro tipo de artefacto que distorsiona la apariencia fiel de la imagen, los tonos, colores y detalle gráfico perceptibles por el ojo humano sano a la resolución espacial de captura del dispositivo. Por tanto, en este contexto, no exigimos un mapeo guiado por intenciones estilísticas o estéticas concretas, sino que procure fidelidad entre el documento físico digitalizado y la representación visual obtenible a partir de esa imagen.

Los operadores de mapeo tonal trabajan con tres tipos de contraste (Freeman, 2009): contraste global, que es el contraste que generan las grandes áreas de la imagen, esto es, la imagen entendida como conjunto; contraste local, el contraste que se genera en zonas pequeñas de la imagen, pero perfectamente visibles y diferenciables; y el contraste de detalle espacial fino, que se genera en zonas muy pequeñas de la imagen, de unos pocos píxeles. Los operadores de mapeo tonal pueden trabajar con uno o varios tipos de contraste. Los operadores que trabajan con el contraste global, que son los que nos interesa aplicar en nuestro caso, aplican un procesamiento lineal, es decir, los procesos se aplican exactamente iguales a cada píxel de la imagen, independientemente del valor de los píxeles que le rodean. Si no se aplica redondeo a los resultados, en teoría podrían ser revertidos automáticamente sus procesos de edición. Estos operadores permiten aplicar una compresión tonal global de la imagen HDR, sin hacer ningún tipo de procesamiento local, por zonas o diferentes rangos de frecuencias espaciales. Como acabamos de comentar, en concreto, hemos usado el operador global *Gamma* y *exposición* que incluye Adobe PhotoShop en sus últimas versiones. Este operador funciona de una forma similar a una curva de contraste en S, como las que encontramos en cualquier editor de imagen digital: podemos expandir y comprimir el histograma de tonos, y aclarar y oscurecer los tonos medios (gamma), mediante una serie de controles muy intuitivos. Los operadores globales, sin embargo, no son adecuados cuando la gama tonal de una imagen HDR es muy amplia o el contraste muy acusado. Pero, en el caso de los documentos digitalizados, los márgenes de densidades habituales, es muy

raro que superen 3.0 D (1000:1), por lo que no nos enfrentamos a ratios de contraste extremos, muy superiores al anterior, que podemos tener en escenas tomadas de la vida real. En nuestro caso lo consideramos, por tanto, un operador adecuado, al no tener un margen de densidades mayor a 3 D. Además este tipo de operadores no implica riesgo de deformación de información gráfica del documento, aspecto que necesitamos asegurar cuando lo que procesamos es patrimonio documental, al no provocar cambios drásticos en las altas frecuencias espaciales que pueden dar al traste con la fidelidad del detalle fino o con el mismo detalle. La aplicación de este operador está plenamente justificada considerando el relativamente bajo de margen de densidades que tenemos en nuestras capturas, con una razón de contraste baja; pero para capturas de documentos con márgenes de densidades muy altos o de escenas con razones de contraste de más de 4 órdenes de magnitud, el método *Exposición y gamma* no es válido, pues implica un recorte fuerte en luces y sombras. En esos casos hay que recurrir a métodos de mapeo tonal más complejos, que hagan ajustes locales por zonas, trabajando con contrastes locales. Para documentos con grandes márgenes de densidades sería necesario realizar una mayor investigación al respecto.

El nombre de los ficheros HDR a 96 bits del grupo 1 son: HDR_PrimerGrupo_1.tif y HDR_PrimerGrupo_2.tif; y los del grupo 2: HDR_SegundoGrupo_1.tif y HDR_SegundoGrupo_2.tif. El nombre de los ficheros HDR mapeados tonalmente a 48 bits por cada grupo son, para el grupo 1: HDRMapeado_PrimerGrupo_1.tif y HDRMapeado_PrimerGrupo_2.tif; y para el grupo 2: HDRMapeado_SegundoGrupo_1.tif y HDRMapeado_SegundoGrupo_2.tif.

Se ha aplicado gestión de color a las imágenes mapeadas desde HDR, generándose un perfil ICC de color a partir de la carta Colorchecker incluida en las imágenes. No tiene sentido aplicarlo a la versión HDR sin mapear, pues ésta debe ser procesada mediante el mapeo para obtenerse la versión de visualización.

Como ya indicamos anteriormente, a partir de las capturas bien expuestas (expuestas para densidad de gris del 18% de reflectancia) se han generado cuatro versiones LDR con procesado convencional por cada imagen. Los nombres de estos másteres son, para la primera imagen del primer grupo: _MG_0374.CR2 (para la versión RAW) y LDR_PrimerGrupo_1.tif; para la segunda imagen del primer grupo: _MG_0365.CR2 (para el RAW) y LDR_PrimerGrupo_2.tif; para la primera imagen del segundo grupo: _MG_0355.CR2 y LDR_SegundoGrupo_1.tif; y para la segunda imagen del segundo grupo: _MG_0346.CR2 y LDR_SegundoGrupo_2.tif.

Se ha hecho también un perfil de color específico para cada uno de los másteres LDR usando la carta Colorchecker incluida en cada captura.

El formato de los másteres LDR es TIFF a 48 bits. Se han generado a partir de sus ficheros RAW correspondientes usando Adobe Camera Raw, con los parámetros siguientes: Exposición 0, Negros 5, Brillo 50 y Contraste 25. Enfoque (cantidad 25, radio 1, detalle 25, reducción de ruido de color 25, reducción de ruido de luminancia 0). Son los ajustes típicos para la creación de imágenes de documentos, equivalentes a una corrección de gamma en torno a 2,2 y una ligera curva para aumento del contraste en S. Las imágenes se han dejado en el espacio de color de la cámara, representado por un perfil ICC específico.

Estos másteres LDR nos permitirán hacer evaluación comparativa entre HDR y LDR: mediremos sus parámetros físicos para comparar con respecto a la imagen HDR en cuanto a fidelidad y en cuanto a ganancia de rango dinámico. Nos dará la calidad objetiva de la conjunción del dispositivo de captura y los ajustes realizados para la obtención de un máster a exposición correcta.

3.2 Segunda fase. Aplicación de parámetros físicos y subjetivos visuales.

Para la evaluación del rendimiento en el registro de la información gráfica útil de los documentos originales y para la evaluación comparativa de rendimiento entre las imágenes HDR y sus correspondientes LDR hemos empleado parámetros físicos de medición objetiva automatizada y parámetros de evaluación visual subjetiva. Los parámetros físicos medidos objetivamente han sido: rango dinámico, ruido, espectro de ruido, capacidad resolutive, aberración cromática y error en la codificación de color. Para su medición se ha empleado el programa Imatest. La evaluación subjetiva se ha aplicado para evaluar la corrección de la apariencia de las imágenes reproducidas en cuanto a contraste y color, así como la apreciación visual de artefactos que distorsionan la representación de los elementos gráficos de los documentos en la imagen digital, tales como posterización, recortes tonales, pérdida de detalle espacial fino y ruido.

El haber empleado de forma conjunta métodos objetivos y subjetivos obedece no sólo a la necesidad de reforzar los resultados obtenidos objetivamente mediante pruebas paralelas complementarias o viceversa, sino a que no podemos hablar actualmente de una correlación lineal entre los resultados de las pruebas objetivas en cuanto a rendimiento de calidad en parámetros físicos y la percepción de la calidad final por un observador humano. La aportación en la percepción final de calidad de cada uno de los parámetros físicos sigue unas pautas de interrelación muy complejas que aún están muy lejos de ser comprendidas y modeladas matemáticamente. Los estudios de calidad de la imagen son bastante antiguos, se remontan incluso a la fabricación de instrumentos ópticos pioneros allá por el siglo XVI. Estos estudios se han incrementado exponencialmente desde los comienzos de la televisión. En el campo de la imagen digital y de la fotografía tenemos una bibliografía ya muy abundante desde los años 70, con la incorporación de una línea interesante de trabajo desde la perspectiva de los estudios psicofísicos aplicados a la percepción de la calidad visual. Una de las formulaciones más sistemáticas y que recoge el estado de la cuestión con respecto a este tema está representada por los trabajos de Peter Engeldrum, desde 1989 (Engeldrum, 2001; Engeldrum, 2004). No obstante estas interesantes aportaciones, no creemos que en el estado actual en cuanto a identificación de parámetros de calidad física y al desarrollo de métricas para su evaluación, podamos obviar la realización de pruebas complementarias de apreciación de calidad visual por parte de expertos humanos.

Debe quedar bien claro que al aplicar parámetros físicos estamos midiendo tanto el rendimiento del dispositivo de captura (la cámara fotográfica digital, junto con el stand de reproducción, sistema de iluminación y óptica) como del procesado HDR –en el máster HDR– y del procesado RAW –en el máster HDR y LDR. Pero como siempre usamos el mismo dispositivo y con las mismas condiciones de captura, entendemos que

podemos extrapolar conclusiones relativas al rendimiento HDR en las evaluaciones comparativas HDR-LDR.

Los parámetros físicos sólo han sido aplicados al primer grupo de dos imágenes, el que contiene cartas para la medición objetiva de los parámetros físicos. El segundo grupo contiene muestras para la evaluación subjetiva visual, que han sido complementadas con carta para evaluación objetiva o subjetiva de rango dinámico y contraste.

Un aspecto que no hemos renunciado a aplicar es la gestión de color mediante perfiles de color ICC, tanto para imágenes HDR como LDR. Pensamos que la gestión de color basada en los modelos asentados por el ICC (International Color Consortium) no debe ser obviada en la digitalización de patrimonio documental, por lo que cualquier estudio encaminado a asentar métodos relacionados con esta actividad debe incorporarlos. El problema de incorporar la gestión de color ICC en las imágenes HDR resultado de la combinación de imágenes tomadas a diferentes exposiciones es la aplicación de procesamientos no lineales que puede implicar esta técnica. Los procesamientos no lineales pueden provocar la falta de consistencia en la representación de color, no sólo imagen a imagen, sino incluso entre áreas diferentes de la misma imagen, ya que durante la generación de la imagen HDR se pueden llegar a aplicar procesamientos diferenciados en distintas zonas dentro de una misma imagen, de acuerdo a sus características gráficas. La gestión de color se ampara bajo el supuesto de un comportamiento uniforme del dispositivo y proceso de captura en todas las sesiones de captura a las que se aplica un mismo perfil ICC. En nuestro caso, hemos usado una técnica de mapeado tonal HDR muy simple, que minimiza este tipo de comportamientos no lineales en el procesado; por ello, podríamos considerar que tenemos consistencia al menos dentro de cada imagen. Bajo esta hipótesis, hemos hecho las pruebas de error en la codificación de color generando un perfil ICC personalizado para cada una de las imágenes.

Los parámetros físicos y la evaluación visual se han aplicado a las imágenes HDR mapeadas a 16 bits por canal de color y a sus correspondientes LDR. Obteniéndose datos que han sido reflejados mediante gráficos.

4 Resultados y discusión.

4.1 Capacidad resolutive: SFR.

4.1.1 Cálculo de valores óptimos en el rendimiento objetivo y subjetivo de los parámetros relativos a capacidad resolutive.

El término capacidad resolutive se utiliza para referir la potencia de un sistema óptico o de registro de imágenes resolviendo detalle espacial de pequeño tamaño. En nuestro caso, lo aplicamos para medir la calidad de registro del detalle de pequeño tamaño que se ha alcanzado en las imágenes de prueba HDR y LDR analizadas. La capacidad resolutive en una cámara digital está determinada por múltiples factores: la calidad de su óptica y de su sensor, las operaciones de procesamiento analógico y digital de la señal obtenida del sensor que aplican los circuitos internos para obtener la versión en formato RAW, y el procesamiento digital posterior del fichero RAW para crear una versión visualizable o imprimible. Todos estos factores participan de forma

correlacionada en la calidad del registro final del detalle, siendo difícil separar la incidencia de cada uno de estos factores en aquella. Como el dispositivo de captura y el procesamiento para conseguir las imágenes en formato RAW de partida son idénticos para las capturas HDR y LDR, consideramos que el método de evaluación aplicado es adecuado para los objetivos perseguidos en este estudio.

Para medir la capacidad resolutive hemos empleado la métrica MTF (*Modulation Transfer Function*). Esta métrica ha tenido y tiene una amplia aplicación en Ingeniería Óptica, Fotografía e Ingeniería de Imagen para la evaluación del rendimiento de ópticas y dispositivos de registro y reproducción de imágenes. Además, ha sido estandarizada por ISO, tanto para la evaluación de escáneres como de cámaras fotográficas digitales (ISO, 2000; ISO 2003; ISO, 2004) y está ampliamente documentada en múltiples trabajos teóricos y experimentales sobre evaluación de calidad en imágenes fotográficas digitales. MTF es una función que expresa cómo se transfiere el contraste existente en el límite de dos áreas colindantes, de muy alta y muy baja densidad respectivamente. Hemos aplicado la MTF al escaneado de una carta de tipo *ISO 12233 Slanted-edge Spatial Frequency Response* de acuerdo con el estándar citado, que podemos ver representada en la figura. Para ello hemos usado el programa Imatest. Hemos usado la variante al algoritmo propuesto en el estándar por Koren (2010a). Pese a la solidez de este método, se ha puesto de manifiesto (Artmanna y Wueller, 2008) su limitación para describir la capacidad de un dispositivo para registrar detalles espaciales de bajo contraste y superficies texturadas. Estos detalles pueden ser importantes en la captura digital de documentos patrimoniales gráficos, especialmente de fotografías; de ahí la justificación de la prueba complementaria de evaluación visual que hemos realizado, donde hemos tratado de evaluar la calidad en el registro de este tipo de información gráfica presente en los documentos de prueba.

Antes de aplicar la MTF a la primera imagen del primer grupo, hemos calculado el valor de resolución espacial en píxeles por pulgada, con la intención de simplificar los cálculos posteriores. Para ello, hemos dividido la resolución espacial absoluta en píxeles del ancho de las imágenes por el ancho del área rectangular encuadrada en las capturas en pulgadas, siendo el resultado 246,55 píxeles por pulgada. A continuación, hemos calculado los valores óptimos y límite para el rendimiento en la función MTF en un contexto de captura con un sensor digital basado en la discretización de la imagen en puntos, como es el sensor CMOS de la cámara empleada para las pruebas. Para ello, hemos aplicado la siguiente ecuación, donde intentamos incorporar la incertidumbre derivada de la diferente probabilidad de alineación o no alineación del detalle espacial de pequeño tamaño en las celdillas fotosensibles del sensor donde se proyecta la imagen captada por el sistema óptico de la cámara digital en función de la resolución espacial de captura que se emplee:

$$C = (R/50,8)/F,$$

donde C indica los ciclos por milímetro –los pares de línea en una carta de resolución de pares de línea por milímetro o ciclos de densidad en una carta de resolución con patrón sinusoidal– que deben quedar bien resueltos a diferentes valores de resolución espacial de captura en el dispositivo digital de registro de imágenes; R es una variable que expresa la resolución espacial de captura en píxeles por pulgada que se está evaluando; 50,8 es una constante cuya aplicación permite distribuir de forma proporcional los

píxeles capturados por cada pulgada lineal entre cada una de las líneas que se toma como referencia de tamaño de detalle fino en una carta de resolución de pares de líneas por milímetro –dividiendo el valor de resolución en píxeles por pulgada por esa constante podemos conocer los píxeles que corresponden a cada grupo de pares de línea de la carta–; F es un factor de calidad que permite resolver la incertidumbre en la alineación del detalle espacial fino contra las celdillas fotosensibles (píxeles) del sensor, mediante la incorporación en la medida de tres situaciones de calidad: Baja, Buena y Excelente. El factor Bajo equivale a la frecuencia de Nyquist, esto es, al valor de resolución espacial que se está aplicando, el sensor sólo dispone de un píxel a aplicar por cada línea de la carta. La probabilidad de que ese píxel coincida de forma exacta con una línea de la carta es muy baja, por lo que se estima que hay una alta probabilidad, y por tanto frecuencia, de mala calidad en el registro del detalle fino que podría ser bien registrado a ese valor de resolución espacial, ya que cada píxel generalmente capturará un fragmento de línea negra y de su línea blanca adyacente en la mayoría de los escaneados, registrando un color gris en lugar de una línea negra o una línea blanca. El factor Bueno equivale a que el sensor aplica 1,5 píxeles para cada línea de la carta, esto hace aumentar en alto grado la probabilidad de alineación correcta del detalle de una línea con un píxel; Excelente equivale a que el sensor aplica 2 píxeles para cada línea de la carta, con lo que la probabilidad de coincidencia de al menos un píxel completo en cada línea de la carta es del 100%, asegurándose el registro correcto de todas las líneas de la carta, salvo en casos de un penoso rendimiento del sistema óptico del dispositivo de captura o un enfoque erróneo durante ésta.

Aplicando la ecuación anterior, hemos derivado los valores de rendimiento para la prueba MTF a 246,55 píxeles por pulgada que mostramos en la tabla V. Empleamos como unidades líneas por pulgada y pares de líneas por milímetro, para facilitar la evaluación visual de la carta en pruebas posteriores. Como podemos observar, hemos correlacionado en la tabla los valores de MTF con la escala de calidades aplicada como factores de calidad en la ecuación anterior.

Tabla V
Valores de rendimiento para la prueba MTF a 246,55 píxeles por pulgada.

	Baja calidad (MTF 20%)	Buena calidad (MTF 50%)	Calidad excelente (MTF60%-70%)
Pares de líneas mm.	4,85	3,24	2,43
Líneas por pulgada	246	164	123

Posteriormente, hemos calculado el valor de resolución espacial límite conseguido en las versiones HDR y LDR. La resolución espacial límite mide la cantidad máxima de líneas por pulgada registrables de forma que el ojo humano sano pueda diferenciarlas. Esa cantidad puede asimilarse a la máxima resolución espacial, en píxeles por pulgada, real a la que puede capturar un dispositivo de digitalización. Para el cálculo del valor límite, hemos considerado que el MTF10% es una referencia suficientemente reconocida por la bibliografía especializada como valor límite del contraste perceptible por el ojo humano en zonas de detalle espacial muy fino (Williams, 2003). Este valor está basado en el criterio de Rayleigh. Este criterio fue establecido a fines del siglo XIX por John Rayleigh, pero ha sido confirmado experimentalmente en años recientes (Wueller, 2006).

De acuerdo a esta consideración hemos aplicado la siguiente ecuación:

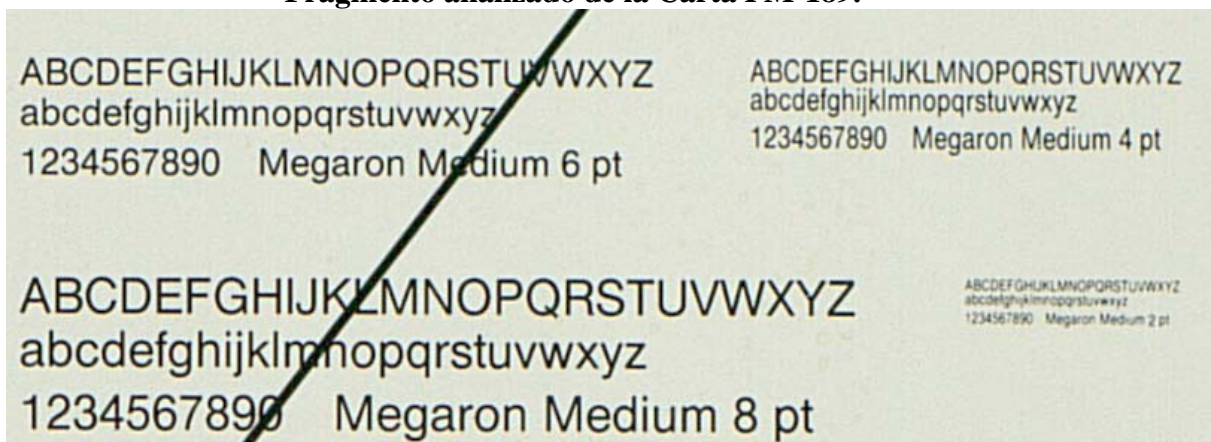
$$L = M * 50.8,$$

Donde L representa la resolución espacial límite medida en píxeles por pulgada/líneas por pulgada; M los ciclos por milímetro donde se alcanza el valor de MTF10% y 50,8 es la constante citada anteriormente.

Para la evaluación visual hemos usado una carta PM-189, construida de acuerdo a las recomendaciones de la norma ANSI (ANSI/AIIM, 1988). De todos los elementos de esta carta hemos usado sólo dos: el texto impreso de prueba y los patrones axiales de pares de línea por milímetros. Los tamaños del texto de prueba impreso en la carta PM-189 oscilan entre los 8 y los 2 puntos tipográficos. El tamaño mínimo del tipo de fuente representado en la carta, la Megaron Medium, es de 2 puntos. A ese tamaño la altura de letra e minúscula, que vamos a tomar como referencia para la evaluación, es de 0,45 mm. Ese tamaño puede ser tomado como referencia para las letras minúsculas. Con esto nos podemos hacer una idea del poder de resolución de la carta PM-189 en cuanto a representación de letra impresa.

A continuación, mostramos esta parte de la carta PM-189, en la figura 4.

Figura 4
Fragmento analizado de la Carta PM-189.



Para saber los tamaños de fuente que deben quedar bien resueltos en función de la resolución espacial de captura hemos aplicado las fórmulas recomendadas por la Cornell University Library (2003). De acuerdo a estas fórmulas, para el escaneado de texto impreso a escala de grises o color la resolución ideal se halla mediante:

$$R = 2QI/0,039h,$$

Donde QI es el índice de calidad; h el alto de la letra más pequeña de la fuente de prueba; y R la resolución de captura expresada en píxeles por pulgada. Los niveles QI son: apenas legible (3,0), mínima (3,6), buena (5,0), y excelente (8,0).

Como indicamos más arriba, en el caso de la fuente de 2 puntos de la carta PM-189, el tamaño promedio del alto de la letra e es de 0,45 milímetros aproximadamente; en el tamaño de fuente de 4 puntos, el tamaño de la e es de 0,9 milímetros aproximadamente; en el de 6 puntos, de 1,1 milímetros; y en el caso de 8 puntos, 1,5 milímetros.

Si despejamos h de la fórmula anterior tenemos:

$$h = 2 \cdot QI/R \cdot 0,039$$

Si ponderamos con los índices de calidad la fórmula anterior tenemos que:

- Calidad excelente: $h = 16/R \cdot 0.039$
- Calidad buena: $h = 10/R \cdot 0.039$
- Calidad mínima: $h = 7,2/R \cdot 0.039$

Si aplicamos las fórmulas obtenemos que a 246,5 píxeles por pulgada, que es la resolución de las dos imágenes de las cartas capturadas en el Grupo 1: el alto de letra mínimo que debe quedar perfectamente reproducido es 1,66 mm; esto es, 8 puntos en el tipo de fuente Megaron Medium de la carta PM-189; el alto de letra mínimo que debe quedar bien reproducido es 1,03 mm; esto es, algo menor de 6 puntos, aproximadamente; el alto de letra mínimo que debe quedar con legibilidad mínima es 0,75 mm; esto es, algo menor que la de 4 puntos. En consecuencia, todas las fuentes de la carta PM-189, excepto la de dos puntos, deberían ser legibles sin ningún tipo de problema.

Además de los parámetros anteriores, también hemos medido la aberración cromática lateral, que también contribuye a mermar el rendimiento en la capacidad resolutive de un registro de imagen. Se trata de un problema propio de los defectos de los sistemas ópticos que se acoplan a los dispositivos de captura, pero que pueden ser magnificados por el procesamiento digital aplicado durante el procesado RAW y HDR. En la aberración cromática lateral las diferentes longitudes de onda que conforman el espectro de los colores de la imagen enfocan en el mismo plano, pero con desplazamientos laterales respecto del eje central. Este fenómeno se manifiesta bajo la forma de halos de color alrededor de zonas de borde y alto contraste representadas en la imagen. La métrica de la aberración cromática lateral escogida es la del área en píxeles de la aberración cromática. Lo hemos medido mediante el programa Imatest. El programa detecta automáticamente la aberración de la zona de alto contraste marcada y la mide. La escala de valores de referencia para la calidad en este parámetro la hemos tomado de la propuesta por el mismo programa: menos de 0.5, no significativo; entre 0.5 y 1, menor; entre 1 y 1.5, moderado; 1.5 o superior, severo.

4.1.2 Resultados de las medidas objetivas de parámetros.

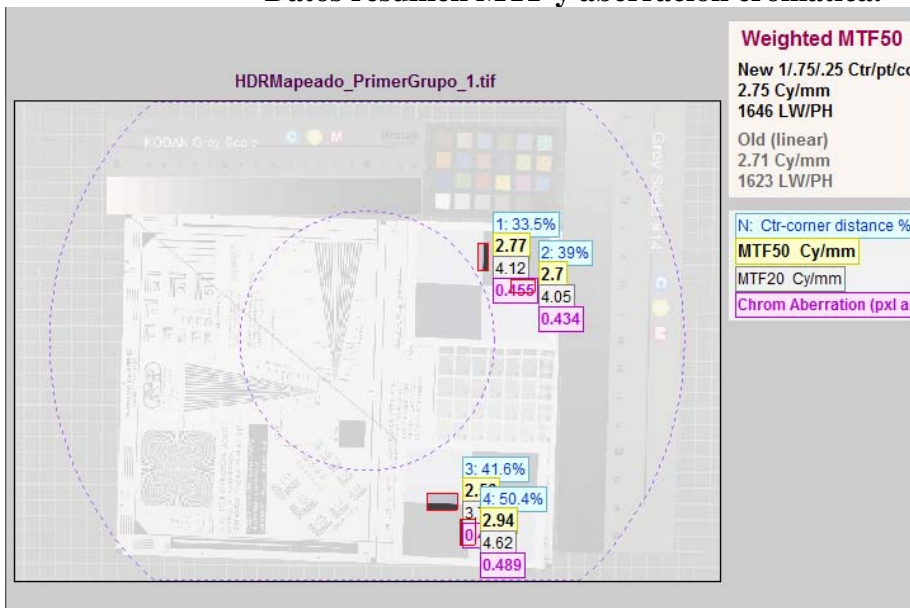
Antes de aplicar la medición MTF en el programa Imatest, hemos calculado a través de este mismo programa la curva de contraste gamma, de forma que su diferencia de valor gamma entre las imágenes HDR y LDR no influya en los resultados. La curva gamma para HDR es de 0,458 (2,19), la de la imagen LDR 0,6 (1,66). También hemos constatado en la primera imagen HDR la pérdida durante el procesado HDR de cuatro

píxeles en la horizontal y de tres en la vertical, siendo el tamaño en píxeles de la imagen 4364x2909. Esta pérdida es mínima y su incidencia puede ser despreciable habida cuenta de la alta resolución de las imágenes.

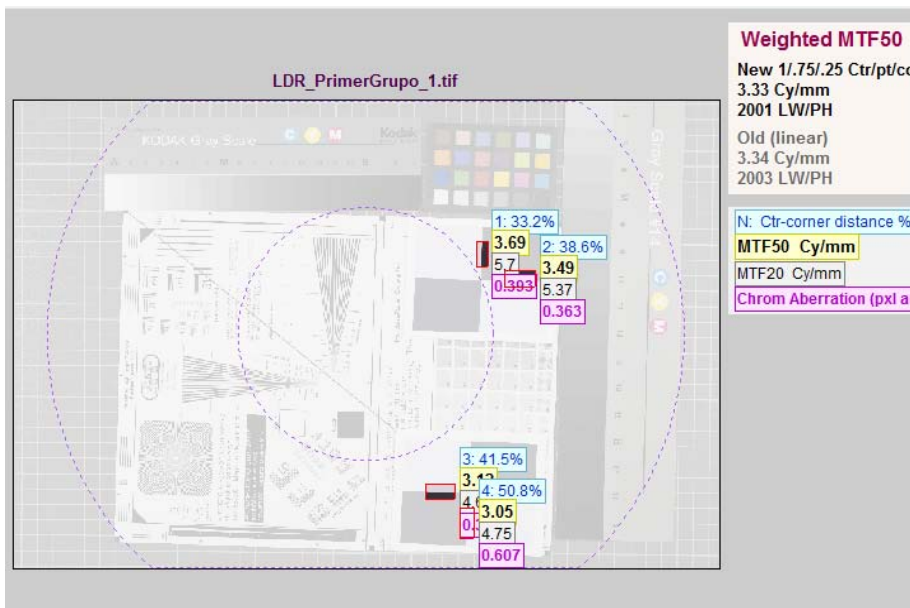
Las gráficas que mostramos a continuación son las ofrecidas por el propio programa Imatest a partir de los datos derivados tras aplicar las funciones indicadas.

Presentamos en primer lugar, en la figura 5, el resumen de datos de las dos regiones analizadas.

Figura 5
Datos resumen MTF y aberración cromática.



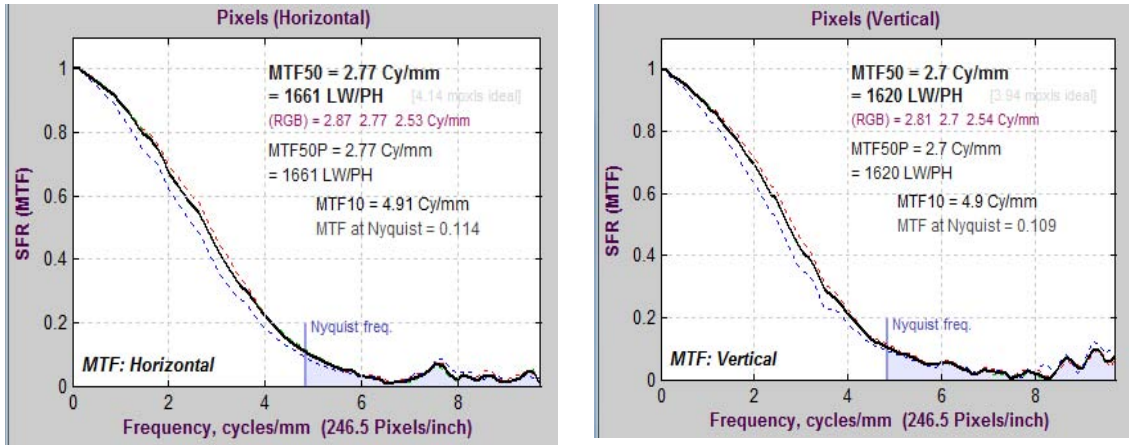
En Máster HDR.



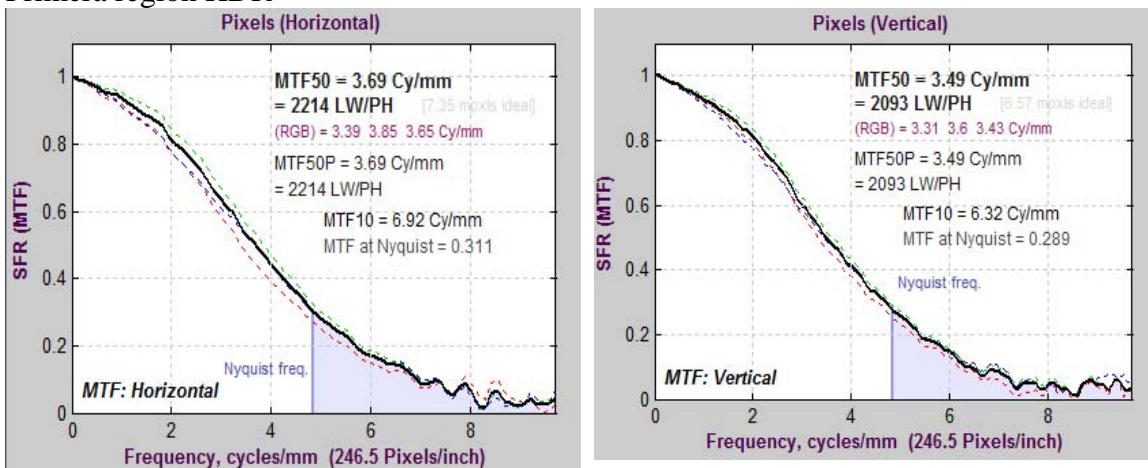
En Máster LDR.

A continuación, en la figura 7, representamos datos más precisos de SFR en ambas regiones, en másteres HDR y LDR, mediante los gráficos resumen generados por el propio Imatest.

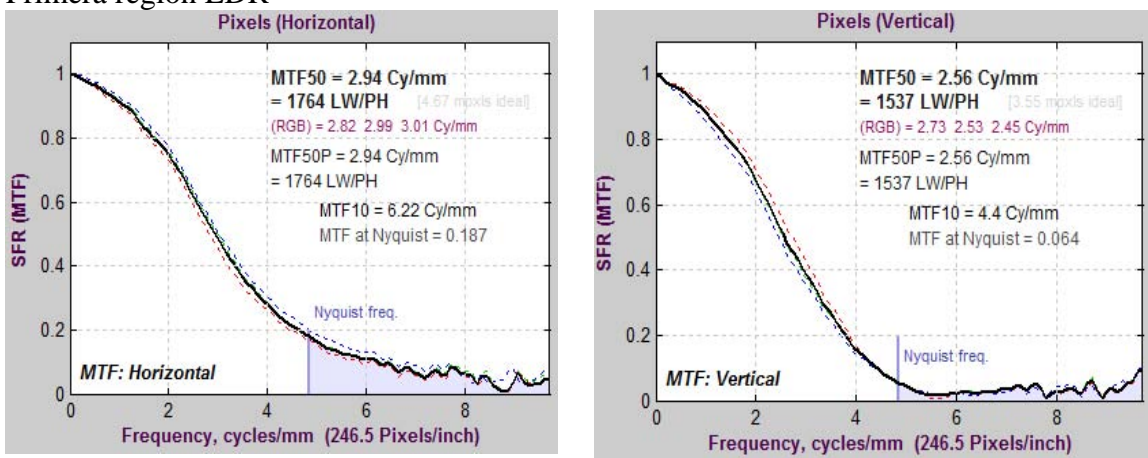
Figura 7
Datos MTF.



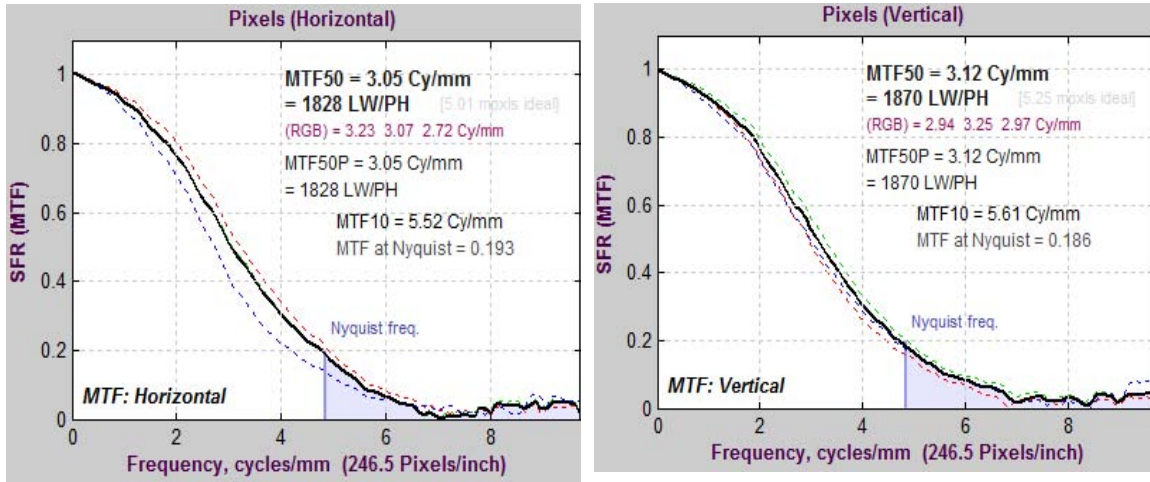
Primera región HDR



Primera región LDR



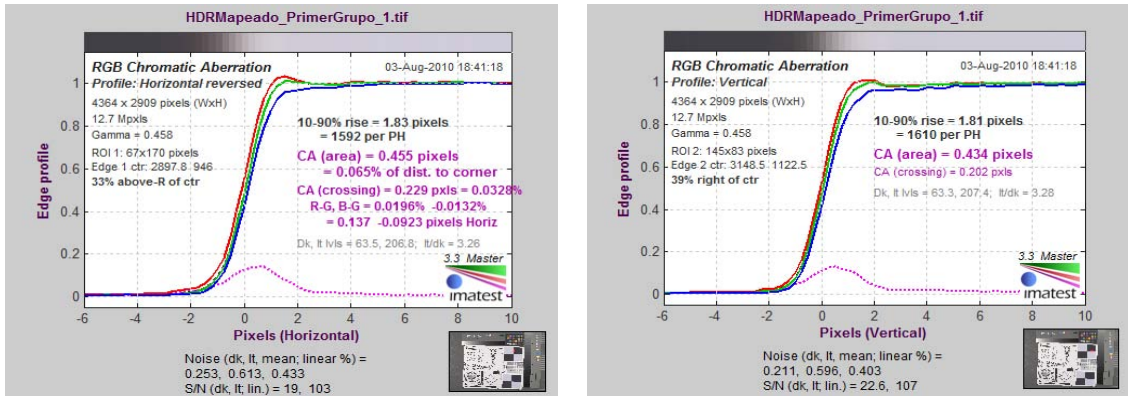
Segunda región HDR



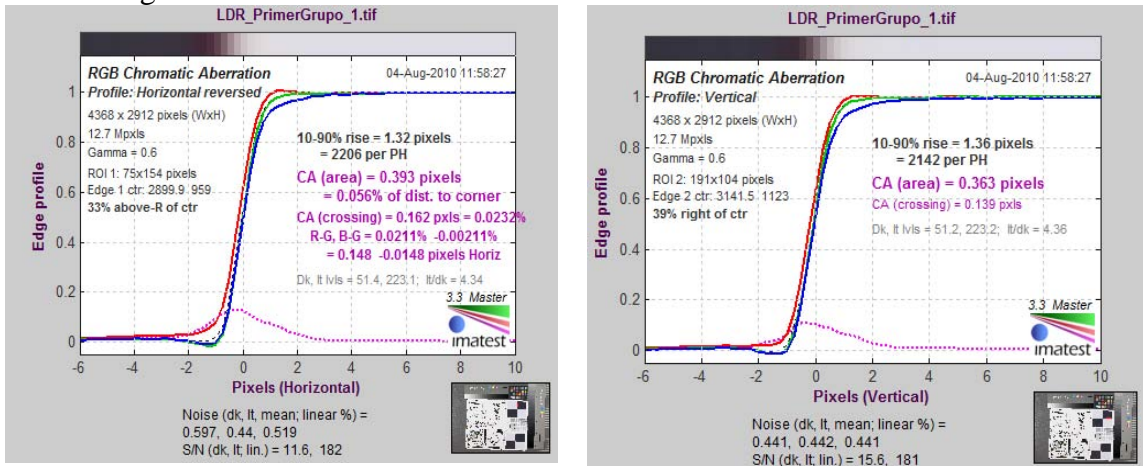
Segunda región LDR

En la figura 8 hemos reflejado datos más precisos de aberración cromática en ambas regiones, en másteres HDR y LDR.

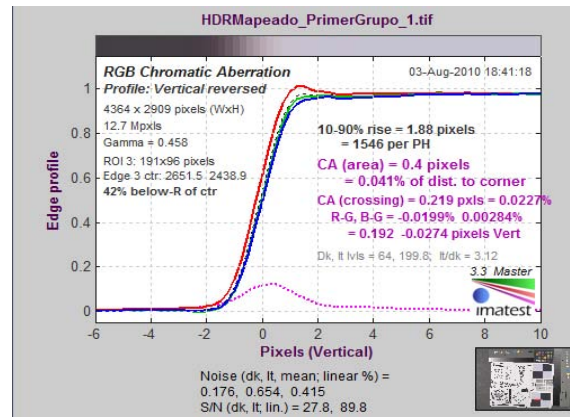
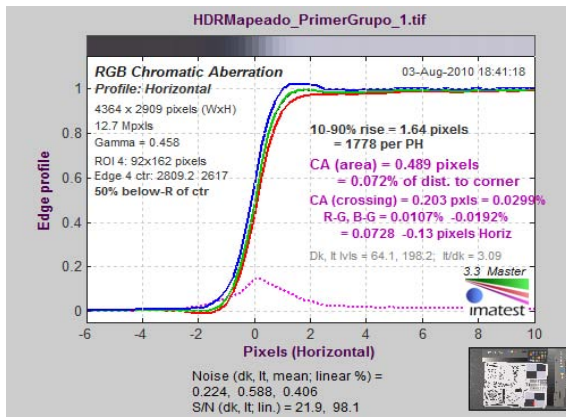
Figura 8
Datos sobre aberración cromática.



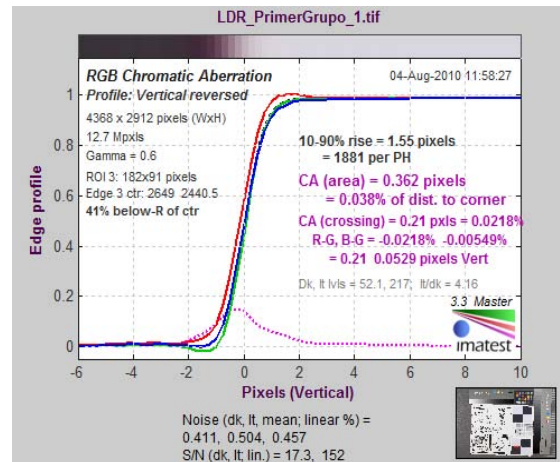
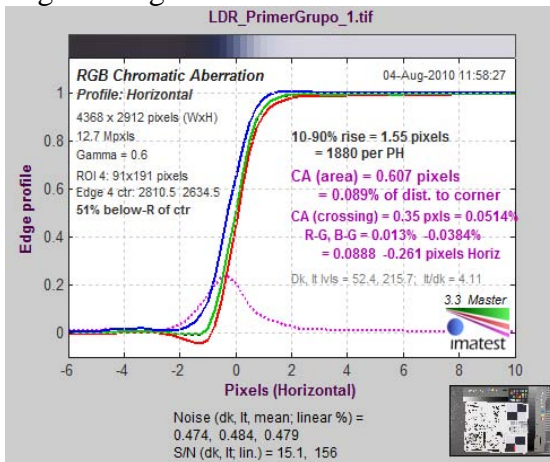
Primera región HDR



Primera región LDR



Segunda región HDR



Segunda región LDR

En el máster HDR se detecta una cierta pérdida de resolución: el valor para MTF50% ponderado es inferior al que debería: 2,75 ciclos por milímetro (Cy/mm) frente a los 3,24 esperados; el valor para MTF20% también es más bajo que el esperado. La diferencia con el valor esperado a MTF50% no es muy alta, aproximadamente 0,5 Cy/mm. A frecuencia Nyquist (un píxel por línea) el valor MTF es ligeramente superior a 10% en ambos sentidos, horizontal y vertical, salvo en la medida vertical de la segunda región. Esto indica que la capacidad resolutoria límite del HDR se ha mantenido, pudiendo registrar de forma visible detalles de un grosor igual al del píxel a la resolución de captura empleada para la imagen, por lo que no hay merma en la representación del detalle espacial más pequeño representable por la cámara digital y objetivo empleado a esa resolución espacial de captura. Este hecho es muy relevante para la digitalización de patrimonio documental. En el caso de la aberración cromática en HDR, nos movemos justo por debajo del valor 0,5, por lo que su afectación no es significativa.

En el máster LDR no se detecta ninguna pérdida de resolución: el valor para MTF50% ponderado coincide prácticamente con el valor esperado (3,33 Cy/mm frente a 3,24 Cy/mm esperados). En la primera región medida, en el caso de LDR, se dan valores por encima del valor esperado, lo que puede estar indicando un mínimo aumento artificial

de nitidez en el procesado de la cámara y RAW. Este aumento de nitidez se ha perdido durante el procesado HDR, al incorporar éste un mínimo suavizado de contraste en altas y bajas frecuencias espaciales, algo que ha sido detectado en las pruebas visuales, como señalaremos más adelante. En el caso de la aberración cromática, en la versión LDR nos movemos también por debajo del 0,5, por lo que su afectación no es significativa, salvo en la segunda zona en el lado horizontal. El LDR arroja también valores mejores en cuanto a afectación de la aberración cromática lateral, aunque nos movemos en ambos másteres en valores no significativos a esta resolución espacial. A pesar de su poca influencia en la calidad visual de las imágenes, estas mínimas diferencias en aberración cromática lateral evidencian que el procesado HDR puede introducir cambios, aunque mínimos, en la afectación de este problema.

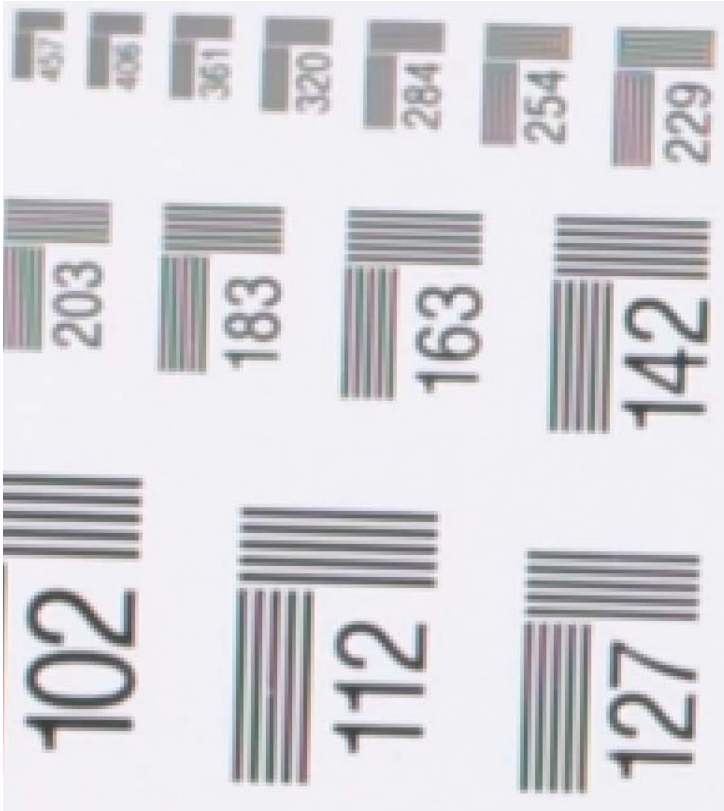
4.1.3 Resultados de la evaluación subjetiva de parámetros de capacidad resolutive.

La evaluación subjetiva se ha realizado a ambos grupos de imágenes de prueba. Su objetivo no es sólo contrastar los resultados de los métodos objetivos de medición, sino también evaluar la consistencia en el rendimiento del procesamiento HDR de una imagen a otra imagen. Se han evaluado dos zonas de la carta PM-189: el texto impreso a diferentes tamaños y los patrones axiales de pares de líneas por milímetro. La selección de estas dos zonas se debe a que incluyen dos elementos importantes de información de los documentos: letras y trazos finos que pueden estar presentes en una amplia gama de medios: manuscritos, dibujos, grabados, fotografías, pinturas, textos de imprenta, etc.

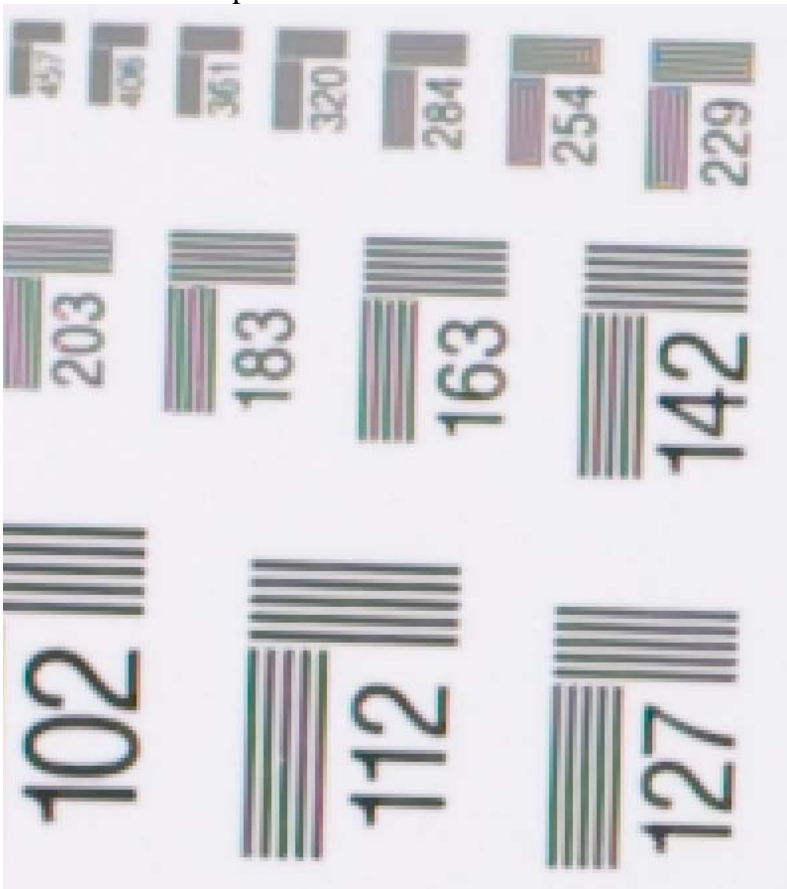
Es preciso ser muy cautelosos con la evaluación visual de la capacidad resolutive mediante patrones gráficos de líneas, debido a que por debajo de la resolución de Nyquist (un píxel por línea) surgen muarés que pueden engañar fácilmente al observador, haciéndole creer que hay líneas bien resueltas donde no las hay. Los muarés se presentan como patrones gráficos de interferencia, y son resultado de la ruptura del patrón a evaluar ante una resolución espacial insuficiente.

Para la mejor apreciación de detalle, hemos visualizado las pruebas a nivel de zoom 100% y 300%. Las capturas de pantalla, las ofrecemos a 300% de ampliación de zoom para hacer más palpables en papel impreso o pantalla los resultados.

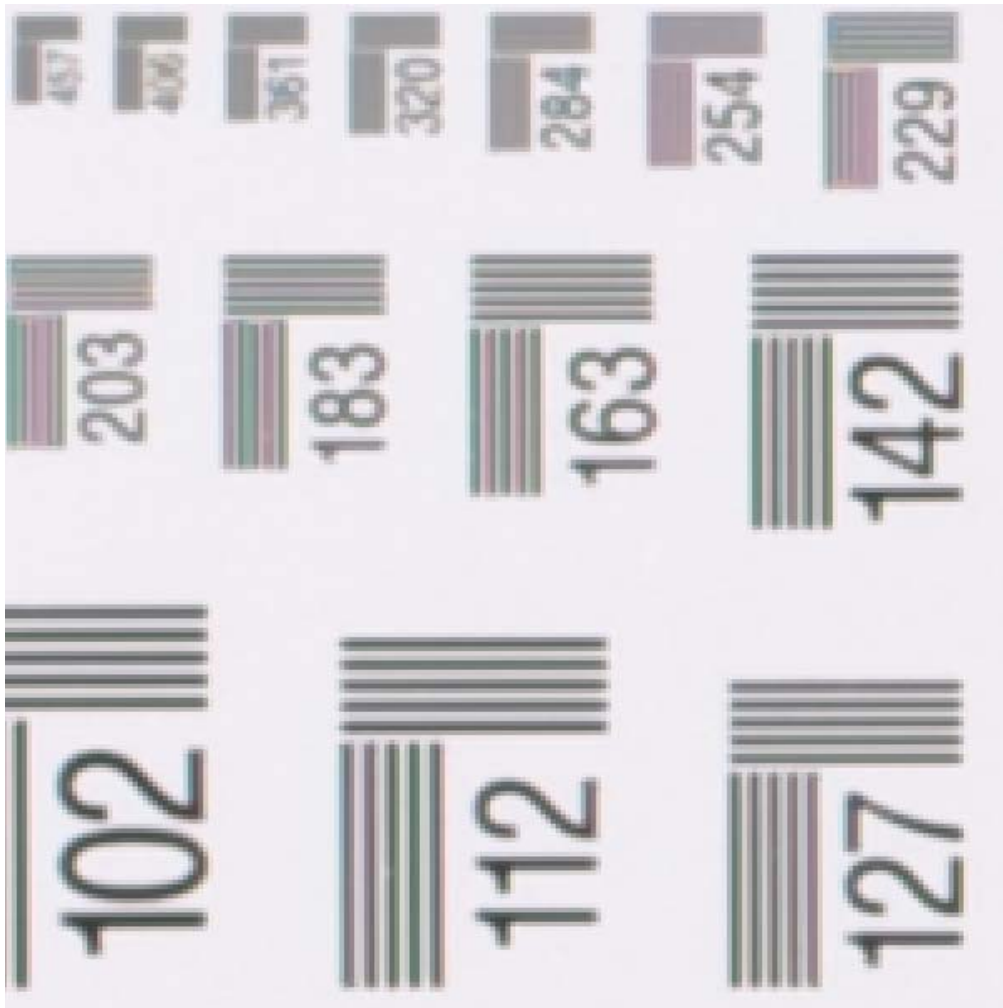
Figura 9 Evaluación visual comparada de rendimiento en capacidad resolutive sobre carta PM-189 de las versiones HDR y LDR.



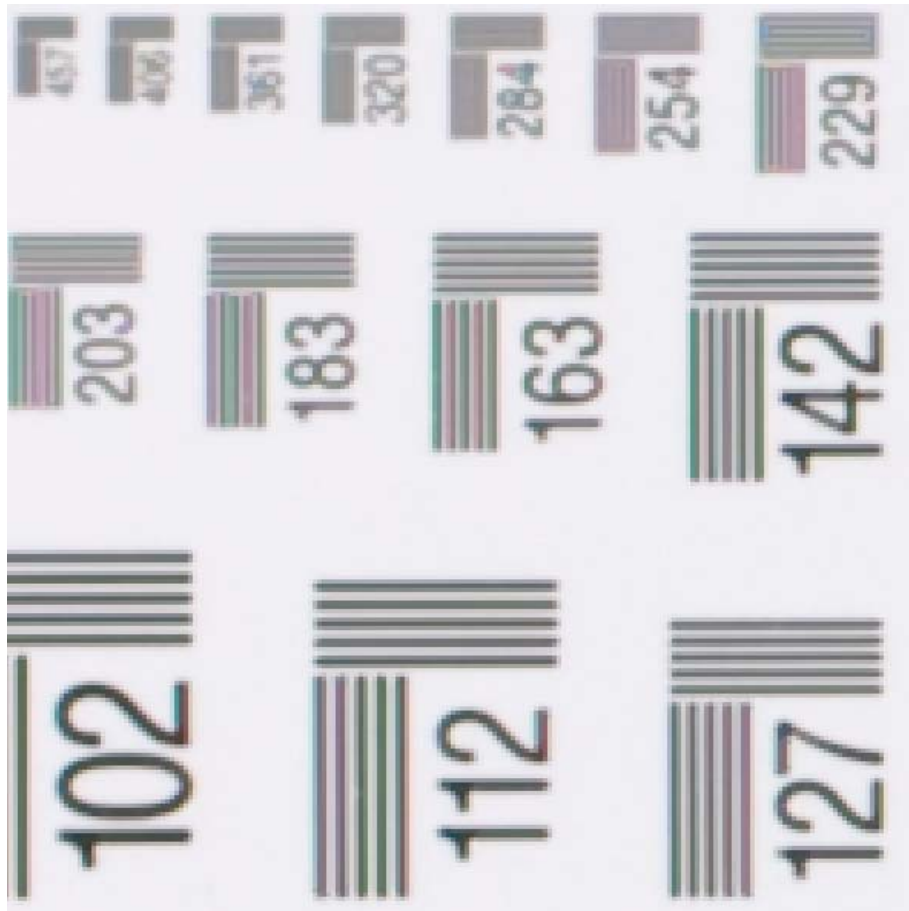
HDR. Primer Grupo 1. Pares de líneas.



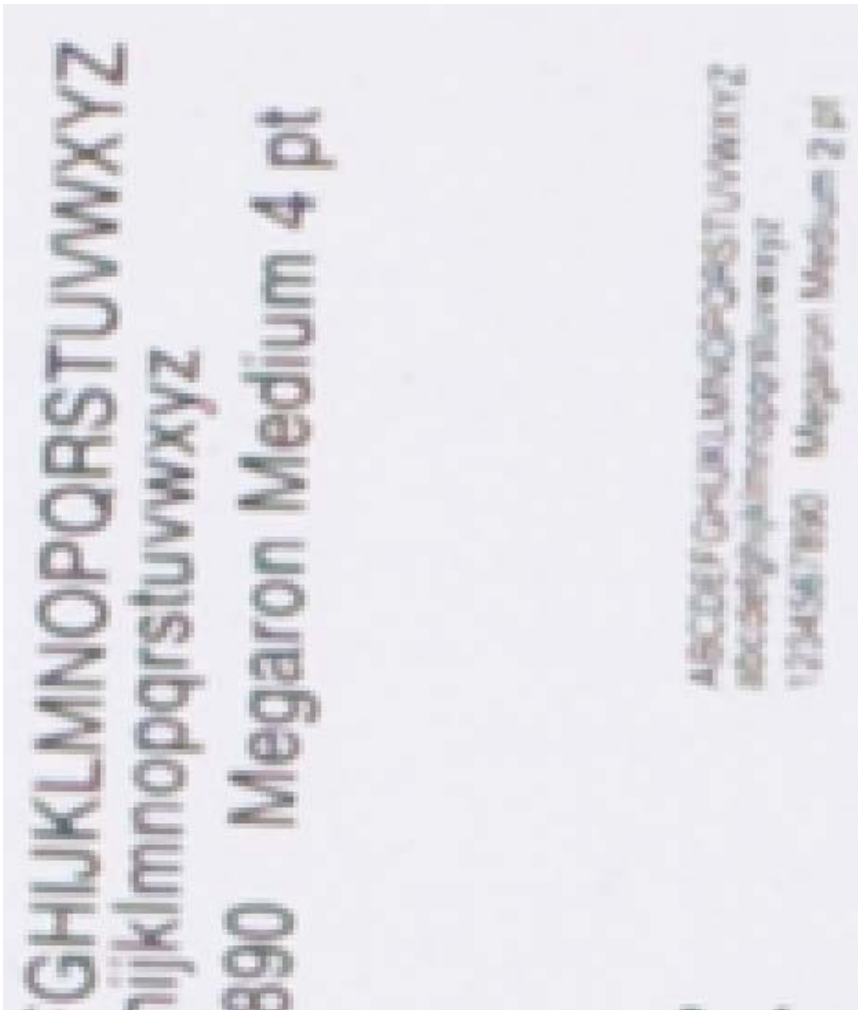
LDR. Primer Grupo 1. Pares de líneas.



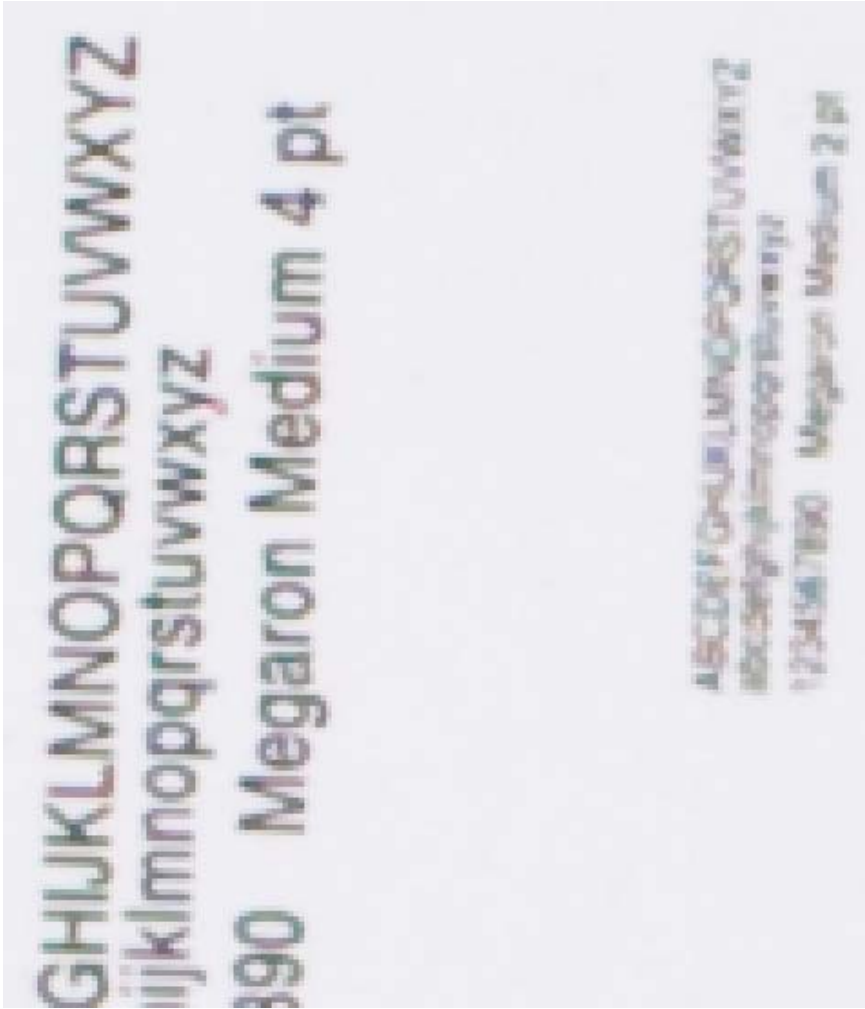
HDR. Primer Grupo 2. Pares de líneas.



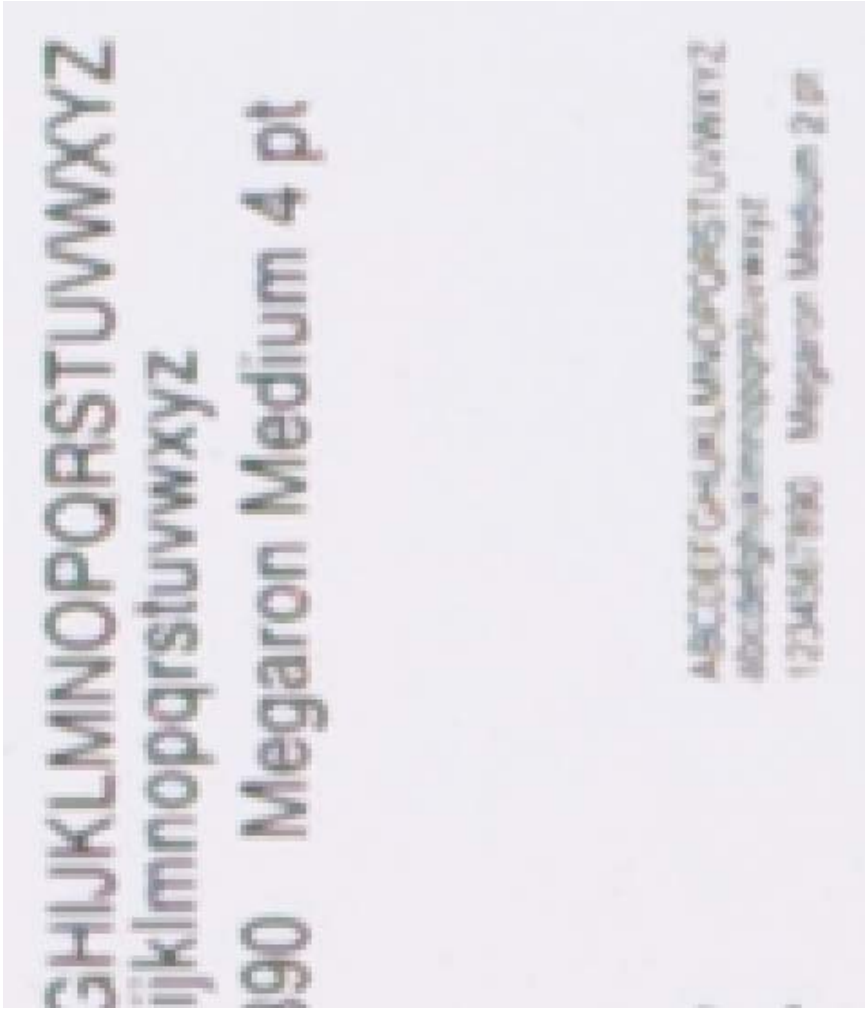
LDR. Primer Grupo 2. Pares de líneas.



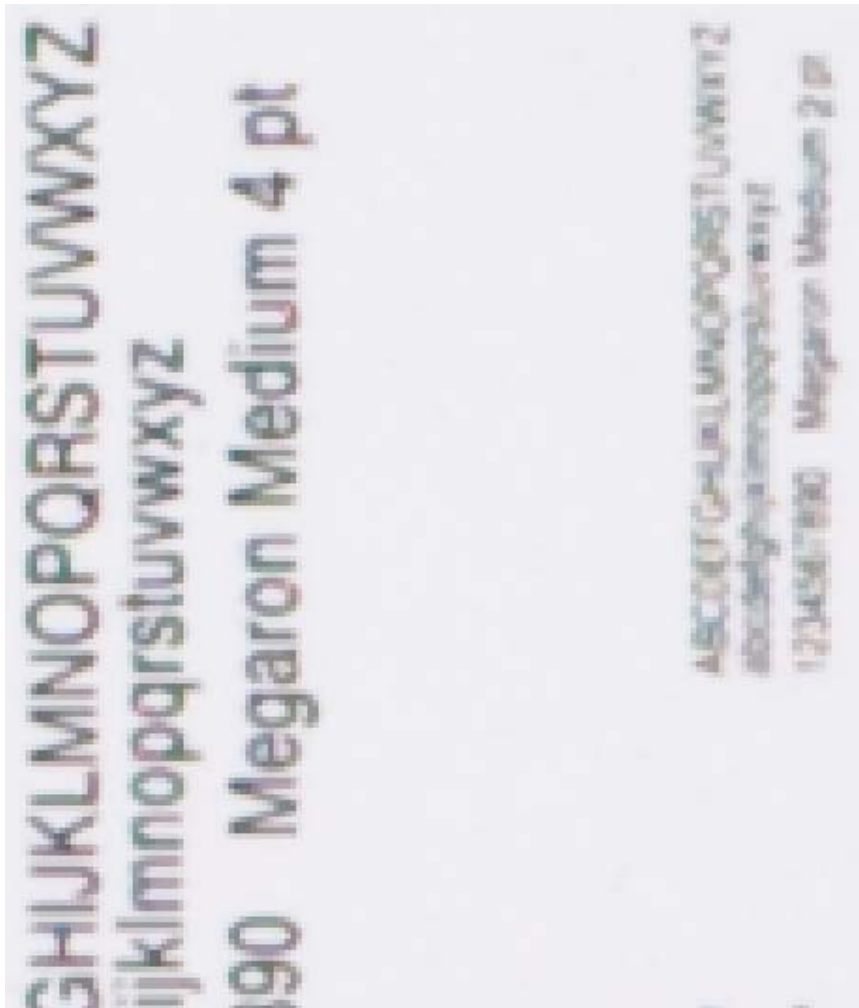
HDR. Primer Grupo 1. Texto.



LDR. Primer Grupo 1. Texto.



HDR. Primer Grupo 2. Texto.

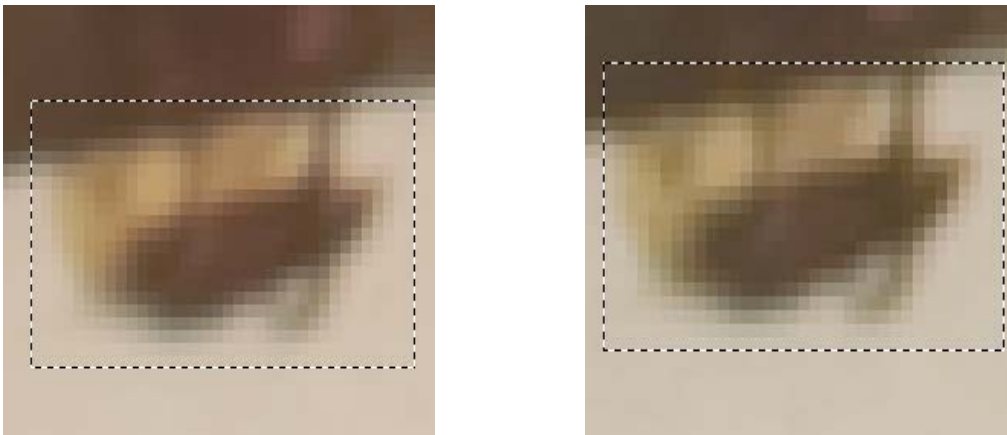


LDR. Primer Grupo 2. Texto.

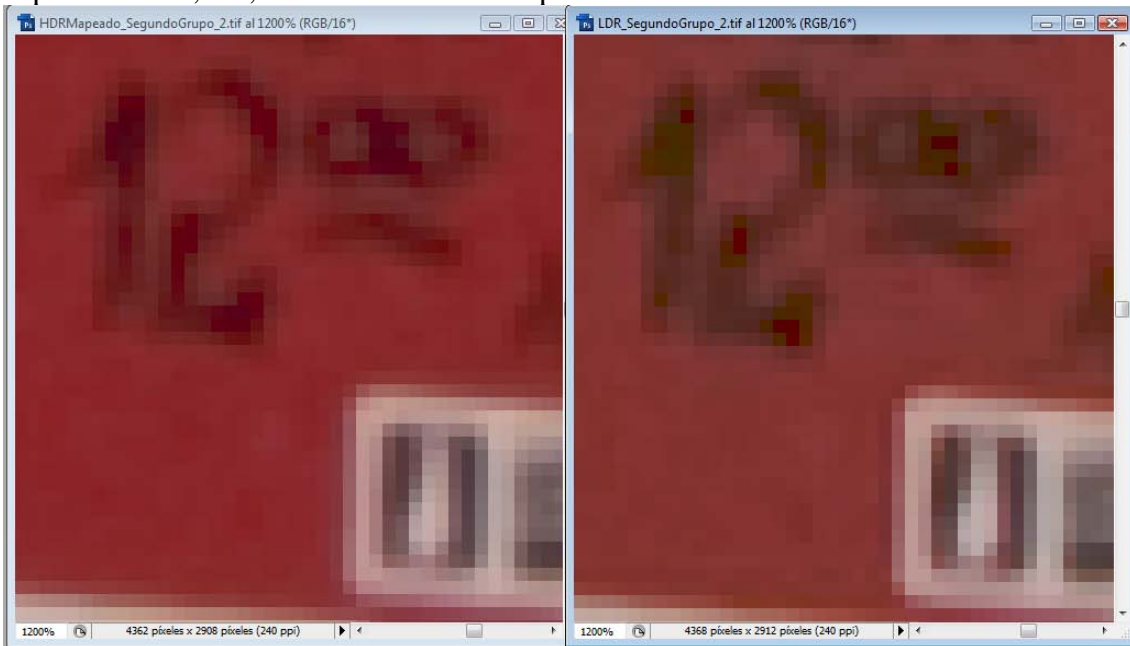
Tanto las pruebas en HDR como en LDR arrojan unos buenos resultados en la comparativa visual de textos y pares de líneas. No notamos visualmente la merma de MTF que evidenciaban las pruebas objetivas. Los textos son legibles en HDR y LDR. Las fuentes de legibilidad aceptable, 4 puntos, no presentan ningún problema de reconocimiento de letras o lectura. El HDR se muestra también consistente en cuanto a capacidad resolutive en las diferentes capturas realizadas. Hemos medido de forma manual el contraste entre texto y fondo blanco en algunas zonas mediante el cálculo de la luminosidad de los píxeles adyacentes, notando un muy ligero aumento de contraste en las zonas de borde de líneas y letras, propio de la aplicación de una máscara de enfoque por software, lo que demuestra la coherencia de los datos objetivos arrojados por la prueba de MTF.

A continuación, hemos evaluado detalles de las fotografías del grupo 2 que muestran zonas de altas frecuencias espaciales. Hemos elegido zonas de detalle donde la afectación por falta de rango dinámico sea mínima, ya que aquí no estamos evaluando problemas tonales, sino de capacidad resolutive. Mostramos debajo algunas capturas de pantallas.

Figura 10
Evaluación visual de detalle espacial fino.



HDR. Segundo Grupo 1 / LDR. Segundo Grupo 1. El mismo detalle de una de las fotografías en color capturadas a la misma resolución espacial (253,3 ppp), a razón de en torno a 10 píxeles por milímetro. El detalle de la fotografía de la izquierda tiene una superficie de 3,6x2,1 milímetros o 36x21 píxeles.



HDR. Segundo Grupo 2 / LDR. Segundo Grupo 2. El mismo detalle de una de las fotografías capturadas a la misma resolución espacial (197,24 ppp), a razón de 7,8 píxeles por milímetro.

En las zonas evaluadas de las fotografías, salvo algo de posterización y ruido en LDR, no hay diferencia alguna en la captación del detalle espacial fino relevante entre HDR y LDR. No obstante, en la segunda muestra, el mayor ruido y posterización que detectamos en densidades más altas en el máster LDR, ha actuado de forma plenamente visible, alterando, aunque en este caso escasamente, no sólo la reproducción tonal y de color, sino la representación del detalle fino. Esta segunda muestra corresponde a una zona más densa que la primera. Por tanto, en zonas de detalle espacial con densidades más altas el detalle en LDR se ve distorsionado, con una incidencia directamente

proporcional a la de afectación de los problemas de rango dinámico. Esta apreciación parece evidenciar que el uso de dispositivos de rango dinámico inferior al margen de densidades de los documentos a escanear puede provocar, incluso aunque la capacidad resolutive sea alta, distorsión y pérdida de detalle espacial de pequeño tamaño, especialmente en zonas de altas frecuencias espaciales.

4.2 Tono.

4.2.1 Evaluación objetiva.

Hemos aplicado tres parámetros físicos para la evaluación objetiva del rendimiento tonal: ruido, espectro de ruido y rango dinámico.

Es evidente que el ruido no sólo afecta a la calidad de la información tonal, sino también a la de la reproducción del detalle y del color. Hemos categorizado este parámetro dentro de los tonales con la única intención de simplificar la estructura del trabajo. El ruido es una variación aleatoria en los valores de luminosidad o color de la imagen digital. La norma ISO 157391, define el ruido como variaciones indeseadas en la respuesta de un sistema de imagen (ISO, 2003b). Los valores de los píxeles ruidosos se alejan de los valores que deberían tener de acuerdo al color o densidad de la superficie del documento a digitalizar que les corresponde, por lo que hablamos de información errónea. Los dispositivos de captura o aplicaciones de procesado digital suelen aplicar complejos algoritmos para la eliminación del ruido producido durante la captura, pero como el ruido presenta un fuerte componente aleatorio, se hace prácticamente imposible eliminarlo de una forma satisfactoria en todos los casos sin degradar el detalle de la imagen que lo presenta. Consiguientemente, la presencia de un nivel alto de ruido resta tanto calidad visual como información gráfica a la imagen digital de un documento o de una vista, por lo que estamos ante un parámetro de calidad muy importante en la digitalización de patrimonio documental.

Las causas del ruido en una imagen digital capturada son muy numerosas y no siempre están relacionadas con el propio dispositivo de captura, aunque muchos de sus factores provienen del rendimiento del sensor o del procesamiento posterior que sufre la señal eléctrica que porta la imagen dentro de los circuitos del dispositivo. En este trabajo no nos interesa tanto medir el ruido del dispositivo empleado, sino hacer una comparativa de la capacidad de las técnicas de procesado HDR para conseguir imágenes con amplios márgenes de densidades bien representados en toda su gama tonal frente a sus correspondientes imágenes alternativas LDR: con detalle espacial fino, sin posterización y con baja presencia de ruido. Es decir, tratamos de determinar cómo varía la incidencia del ruido en el procesado HDR aplicado en este estudio.

No vamos a medir el ruido de la imagen tal y como sale del dispositivo de captura, sino tras los ajustes de contraste que la preparan para poder ser visualizada o impresa de forma óptima. Esta consideración es importante, pues los ajustes de contraste hacen variar la cantidad de ruido a lo largo de la gama tonal de la imagen, y el procesado HDR implica una curva de contraste que puede variar con respecto a la de un máster LDR convencional; por ello, la presencia e incidencia de ruido puede verse afectada por el procesado HDR. Veamos esta cuestión con algo más de detalle. Lo más común es que el ruido sea más o menos uniforme en toda la gama tonal de la imagen, desde las sombras

a las luces, aumentando ligeramente en los tonos más claros (Koren, 2010b). La percepción magnificada del ruido que tenemos en las zonas de sombra es debido a los ajustes tonales que se aplican a la imagen en bruto para prepararla para su visualización, impresión o almacenamiento digital, como son la aplicación de la función gamma, que hace subir el brillo general de la imagen, o el aumento del contraste de ésta mediante una curva en “S”. Este tipo de ajustes incrementan fuertemente el ruido en los tonos de sombra, haciéndolo fácilmente perceptible a partir de cierto nivel de afectación; provocan que, a la inversa, el ruido disminuya en los tonos de luces, bajando allí su visibilidad. La sensación visual de afectación progresivamente mayor del ruido en los tonos de sombra a medida que se van subexponiendo las capturas, se debe principalmente a que mientras más subexpuesta está una imagen mayor debe ser el ajuste de gamma que aplicamos para poder visualizar su contenido.

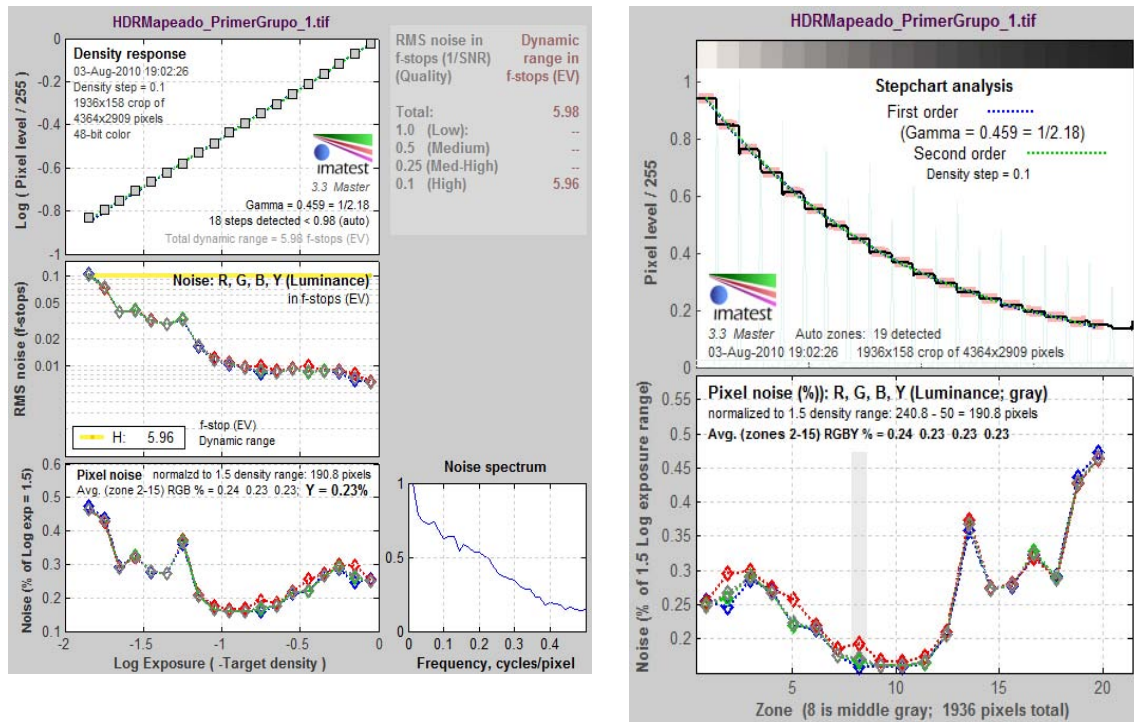
Una explicación detallada de las métricas para la medición del ruido lo tenemos en el propio estándar ISO (ISO, 2003b) y en otros trabajos que lo desarrollan (Kleinmann y Wueller, 2007). Lo ideal sería medir el ruido usando un método de medida que correlacione la cantidad de ruido con su grado de percepción por el sistema visual humano. El propio estándar ISO 15739, aunque no normaliza las medidas de ruido visual, sí que contiene un anexo informativo, el anexo C, donde explica un método con esa finalidad. No hemos aplicado este método por su complejidad y falta de normalización, pero sí una métrica de ruido que presenta una mayor correlación con la percepción visual humana de este problema que otras: la medida de ruido para el canal de luminancia como porcentaje de la diferencia de valores de píxel, entre el parche más oscuro y el más claro, correspondiente a un margen de densidades de 1,5 D (Koren, 2010b). La medida se basa en los parches de densidad de la carta Q13 y arroja un promedio del ruido total de la imagen. Cuanto menor es el tanto por ciento arrojado por el cálculo mejor es la calidad de la imagen. Alrededor del valor 1 por ciento el ruido empieza a ser fácilmente distinguible, especialmente en los medios tonos; por encima del 1,5% el ruido se hace muy apreciable, incluso en los tonos de sombra, por lo que nunca deberían darse por buenas digitalizaciones con zonas de ruido con valores alrededor del 1,5% en este método de medición.

Nos ha parecido relevante analizar también el espectro de ruido. La gráfica del espectro de ruido que hemos obtenido nos muestra el ruido en función del valor de frecuencia espacial. Estos datos evidencian el efecto que determinados procesamientos de la imagen digital, como la posible aplicación de filtros de paso bajo —antialiasig y antirruido— en la cámara digital o en el procesado RAW, pueden tener en la captación del detalle espacial fino. Estos procesados pueden causar la pérdida de detalle espacial fino en áreas uniformes de la imagen o que presenten detalle caracterizado por altas frecuencias espaciales y poco contraste. Un espectro de ruido que decae bruscamente hacia la mitad de la frecuencia de Nyquist (dos píxeles por línea o 0,25 ciclos/píxel) es indicativo de la aplicación de un filtro de paso bajo que difumina los detalles de la imagen donde hay altas frecuencias. Creemos útil aplicar este parámetro para comprobar si el procesado HDR aplicado en las imágenes de prueba implica algún procedimiento que puede derivar en la eliminación de patrones gráficos semejantes al ruido, y que pueden estar presentes en zonas de imágenes fotográficas con grano o en zonas que muestren determinadas texturas de grano fino. La eliminación del ruido implicaría la pérdida o reducción de este tipo de información tonal y de detalle espacial, que evidentemente, no sería adecuada en una digitalización patrimonial.

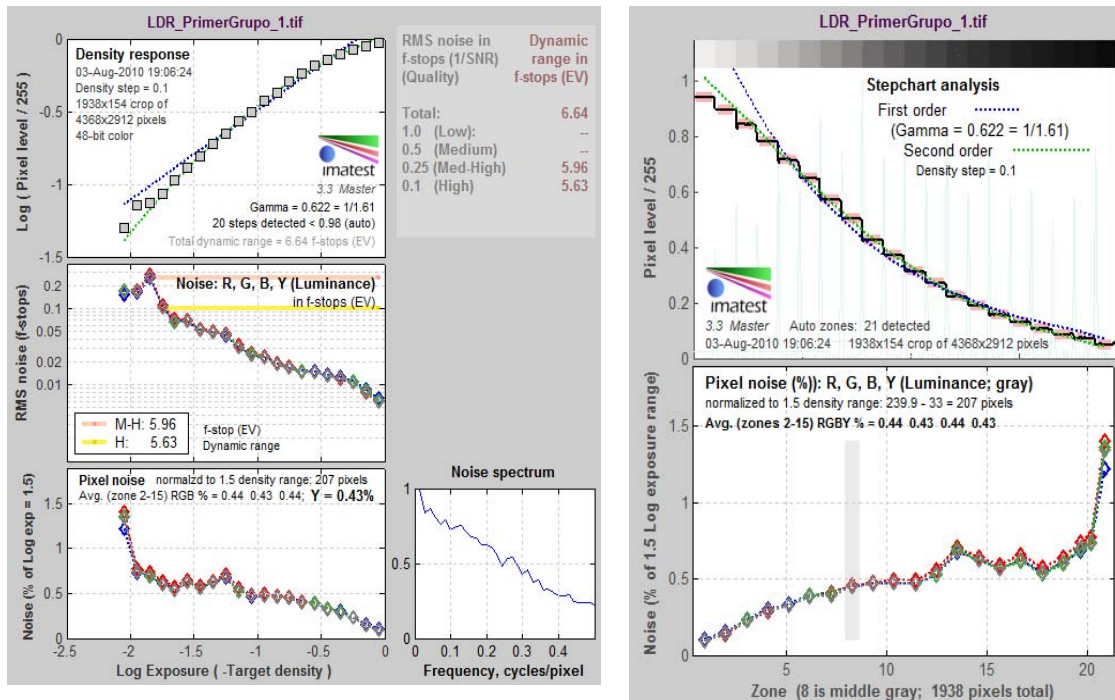
Como ya explicamos anteriormente, el rango dinámico es la capacidad de un sistema de registro de imágenes para detectar niveles de intensidad de luz. Se han venido usando múltiples métodos de medir el rango dinámico, con mayor o menor objetividad (Wueller, 2002); la propia ISO ha publicado un estándar específico para escáneres (ISO, 2004b). En este estudio, hemos usado el método aplicado por el programa Imatest, que ofrece una función suficientemente flexible para el cálculo del rango dinámico: mide el rango dinámico en valores de exposición (pasos de diafragma, o, abreviado, EV) y con diferentes niveles de calidad en función de la proporción de ruido. La escala de valores de exposición consiste en una escala logarítmica en la que cada valor de exposición implica doblar la cantidad de luz del paso anterior. Esta escala es más intuitiva por su mayor proximidad a la percepción logarítmica humana de los cambios en intensidad de luz.

Mostramos en la figura 1 datos precisos sobre el rendimiento tonal en los parámetros ruido, espectro de ruido y rango dinámico, en másteres HDR y LDR.

Figura 11
Rendimiento tonal.



HDR. Rango dinámico, ruido y espectro de ruido/ Pasos de densidad detectados y ruido.



LDR. Rango dinámico, ruido y espectro de ruido / Pasos de densidad detectados y ruido.

Para el cálculo del rango dinámico sólo utilizamos los pasos de densidad detectados con bajo nivel de ruido, es decir con calidad alta. El rango dinámico medido es de acuerdo a los 20 pasos de densidad de la carta, por lo que no es rango dinámico real sino circunscrito a la carta. El rango real sería mucho más alto en el HDR. De acuerdo a esta limitación, el HDR ofrece un rango dinámico sobre la carta de 20 parches de densidad de 5,96 f/stops, que equivale a 1,79D; El LDR ofrece un valor de 5,63, que equivale a 1,69 D. Pero los datos están sesgados, ya que hay dos parches en el caso del HDR que no han sido contabilizados automáticamente por el programa de cálculo de rango dinámico, por lo que debería ser mucho más alto, debería ser de 1,9 D, el más alto medible con esta carta de 20 pasos. Este hecho lo vamos a tratar de confirmar durante la prueba de evaluación visual cuyos resultados describimos más abajo.

La afectación de ruido es menor en HDR, $Y = 0,23$ contra $Y = 0,43$. Esto se reproduce en todos los canales de color. Pero hemos de considerar que en HDR no se han contado los dos últimos pasos que son los más ruidosos. Si nos atenemos a la comparativa de los parches anteriores a estos dos no captados en HDR, el nivel de ruido es menor siempre en HDR, por debajo de 0,5 siempre. Los tres últimos pasos de densidad del LDR evidencia una cantidad de ruido muy alta, inaceptable, por lo que no podemos considerar estos tres pasos dentro del rango dinámico de la captura si aplicamos unos criterios patrimoniales rigurosos. Por ello, el rango dinámico en el caso del LDR habría que reducirlo a 1,6 D, siendo incluso cuestionable la aceptación del paso de densidad anterior al máximo aceptado. En el caso de HDR todos los parches detectados están muy por debajo del 0,5 de ruido.

También hemos detectado una pérdida ligera de contraste en HDR frente a LDR, lo que puede propiciar una menor acentuación del ruido en las zonas de sombra. Esto lo detectamos mediante el gráfico *Density Response*, que representa la OECF. La OECF

(Función de Conversión Opto-Electrónica) correlaciona la densidad óptica de cada parche de la carta Q13 con los valores promediados de luminosidad de los píxeles que describen esos parches, tras los ajustes de contraste propios del procesado de los ficheros RAW y del HDR. Si nos fijamos en este gráfico, en la versión LDR podemos observar un aumento de contraste mediante una ligera curva en S. En HDR se ha suavizado el contraste durante el proceso de mapeado tonal y durante la fusión de imágenes tomadas a diferentes valores de exposición.

Las representaciones gráficas del espectro de ruido evidencian que la caída de la gráfica es más brusca en el caso de HDR. No obstante, en ambas gráficas se muestra una caída del ruido a medida que decrece la frecuencia espacial, lo que parece reflejar que se ha aplicado procesamiento antirruído y antialiasing durante el procesado RAW o, previamente, en los circuitos de la cámara. Esta caída debería manifestarse como un cierto suavizado de contraste en zonas con texturas finas de bajo contraste, que tendría que ser, de acuerdo a la mayor brusquedad de la caída de la gráfica, mayor en HDR. Este hecho ha sido contrastado visualmente durante la evaluación subjetiva, donde hemos apreciado zonas con este tipo de texturas que, aunque no se pierden, sí que bajan su contraste y se hacen menos aparentes al ojo.

4.2.2 Evaluación subjetiva.

La evaluación subjetiva se ha realizado a ambos grupos de imágenes, para comprobar la consistencia en el rendimiento del procesamiento HDR. Se han evaluado aspectos como la diferenciación de los pasos de densidad de la carta Q13, la presencia visible de ruido, posterización y recortes tonales.

Mostramos en las figuras 12 y 13 la representación de la escala de pasos de densidad de la carta Q13 y el detalle ampliado a 200% de zoom de sus últimos tres pasos. Hemos aplicado un ajuste de gamma suplementario igual a 1,5 para amplificar la visibilidad de los defectos. Hemos de ser conscientes de que este aumento de gamma hace aumentar el ruido en las zonas de sombra, al aumentarse el contraste de esos tonos y, al mismo tiempo, decrecer el de las zonas de luces. Pero esta circunstancia no representa problema porque el ruido lo hemos medido objetivamente en el apartado anterior con un ajuste de gamma normal para visualización.

Figura 12
Visibilidad de problemas tonales sobre la escala de parches de densidad Q13.



LDR. Primer Grupo 1. Escala de densidad.



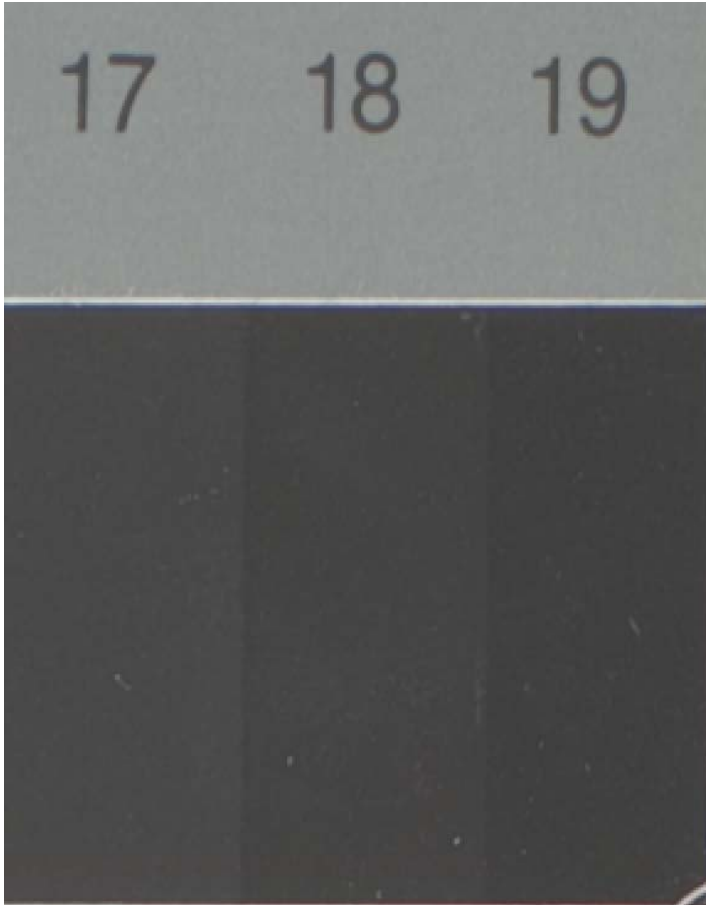
HDR. Primer Grupo 2. Escala de densidad.



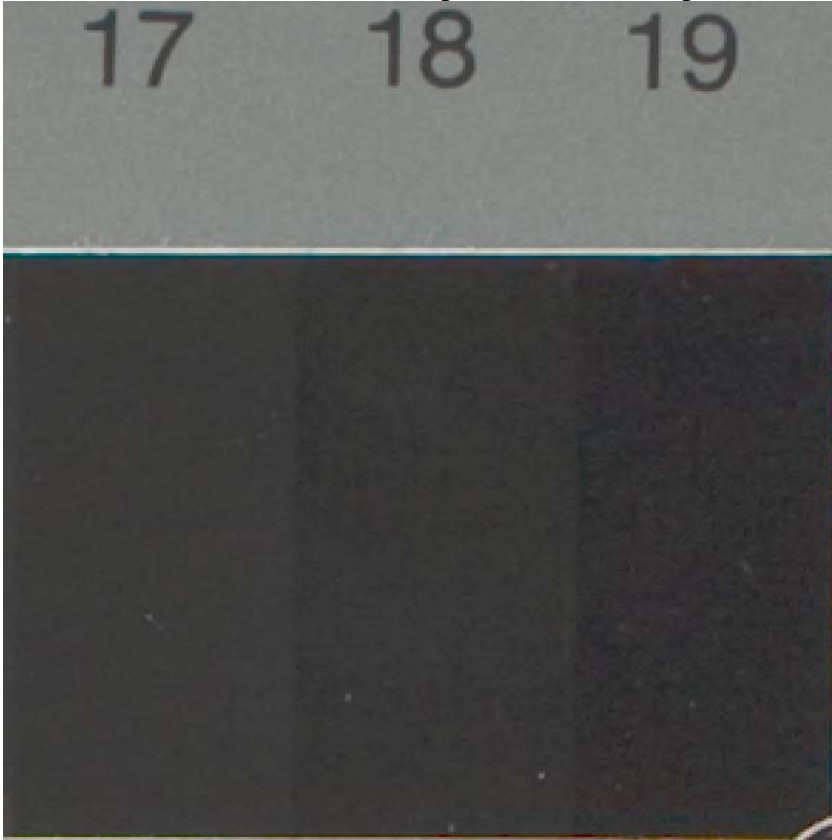
LDR. Primer Grupo 2. Escala de densidad.

En todas las capturas se diferencian perfectamente los 20 parches. Aunque el contraste es mayor en las LDR, debido a la pérdida de rango dinámico, a la peor identificación y representación de esos tres parches más densos, y a una curva gamma menor. La diferencia en la curva gamma fue detectada en la prueba objetiva anterior (2,18 frente a 1,61). Hemos de destacar, asimismo la alta consistencia en los resultados de unas capturas a otras de las mismas cartas de prueba.

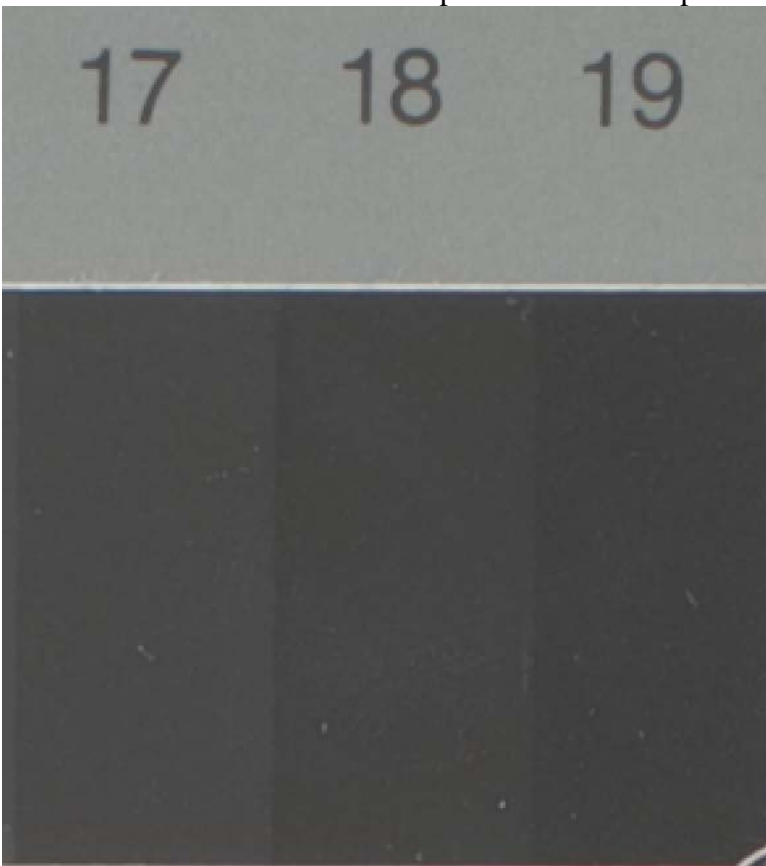
Figura 13
Ampliación de parches de máxima densidad en la escala Q13.



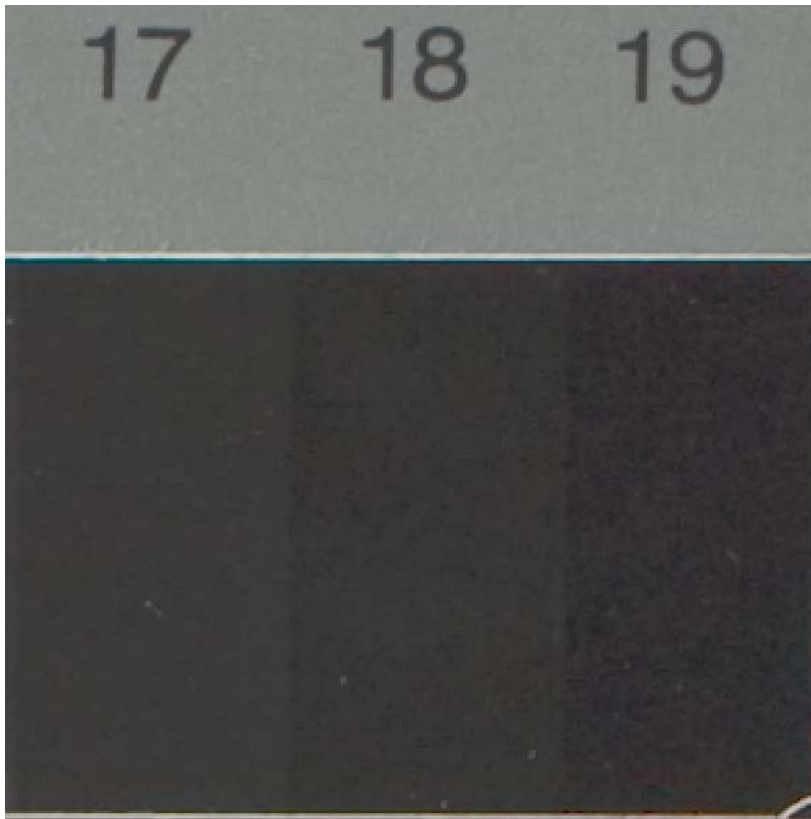
HDR. Primer Grupo 1. Tres últimos pasos de la escala.



LDR. Primer Grupo 1. Tres últimos pasos de la escala.



HDR. Primer Grupo 2. Tres últimos pasos de la escala.



LDR. Primer Grupo 2. Tres últimos pasos de la escala.

La evaluación visual de los tres últimos parches de densidad ampliados nos lleva a la conclusión de que no se observa posterización ni ruido visible en ninguna de las versiones HDR, habiendo una gran consistencia en los resultados de las dos capturas. En cuanto a las dos versiones LDR, podemos observar en ambas capturas posterización y ruido muy visibles, con distorsión de detalle en los tres parches. Vamos a profundizar más en este aspecto, evaluando detalles escogidos de zonas más densas en las fotografías representadas en el segundo grupo de capturas, tanto en color como en blanco y negro.

Figura 14
Análisis comparado de detalle de zonas de alta densidad en documento fotográfico en color.



HDR. Segundo Grupo 2. El mismo detalle de la imagen anterior.



LDR Segundo Grupo 2. Detalle de fotografía en torno a 1,8 D.

Figura 15

Análisis comparado de detalle de zonas de alta densidad en documento fotográfico en blanco y negro.



HDR. Segundo Grupo 1. Detalle de fotografía en torno a densidad 1,9 D.



LDR. Segundo Grupo 1. Detalle de fotografía en torno a densidad 1,9 D.



HDR. Segundo Grupo 2. Detalle de fotografía en torno a densidad 1,9 D.



LDR Segundo Grupo 1. Detalle de fotografía en torno a densidad 1,9 D.

Si nos fijamos en las figuras 14 y 15, tanto en los detalles de color como en blanco y negro, podemos observar una alta incidencia de la posterización y ruido en LDR, con gran distorsión y pérdida del detalle en densidades de entre 1,75; 1,8 y 1,95 D. Estos problemas no los vemos representados en HDR. Estas apreciaciones demuestran una pérdida de información tonal muy visible en las imágenes LDR, que puede ser crítica para la digitalización de fotografía, tanto en color como en blanco y negro, y sobre base opaca y traslúcida; pues estas densidades son muy comunes en esta clase de materiales. En consecuencia, no debemos considerar como aceptable el uso de la captura LDR para

la digitalización patrimonial de fotografía con el dispositivo fotográfico empleado en estas pruebas.

De cara al posible uso de este dispositivo, mediante técnicas LDR o HDR, para la digitalización de materiales con mayores márgenes de densidad que los representados en las cartas Q13 y Q14, nos interesa también evaluar el comportamiento de ambas técnicas en zonas con densidades superiores a 1,95 D. Hemos capturado detalles de zonas de densidad en torno a 2,6 D.

Figura 16
Detalles en zonas de densidad en torno a 2,6 D.



HDR. Segundo Grupo 1. Detalle de fotografía con densidad en torno 2,6 D.



LDR. Segundo Grupo 1. El mismo detalle anterior.

El resultado es muy evidente: LDR no capta detalle a esas densidades, y presenta mucho ruido, posterización y recorte tonal. También se demuestra que el rango dinámico de la versión HDR supera en mucho el margen de densidades de la carta de densidades Q13 analizada. Hemos de considerar, asimismo, que el grado máximo de densidad a capturar se puede configurar en HDR mediante la inclusión de más capturas con mayores niveles de exposición, por lo que la máxima densidad evaluada en este estudio no es un límite teórico, sino un tope impuesto en las pruebas aplicadas. Parece que con las técnicas HDR se puede mejorar muchísimo el rendimiento tonal de un dispositivo con escaso rango dinámico y que HDR no implica merma en la representación del detalle, al menos hasta estos valores de densidad máxima que estamos manejando en el estudio y con la técnica de mapeado tonal empleada.

4.3 Color.

4.3.1 Evaluación objetiva.

Para la evaluación objetiva y subjetiva de rendimiento en la codificación y reproducción de color hemos aplicado gestión de color, creando un perfil de color ICC del dispositivo específico para cada una de versiones HDR y LDR a partir de la carta Colorcheckr que hemos incluido en todas las capturas. Posteriormente, hemos convertido las imágenes desde el espacio de color de su perfil ICC a un espacio de color común con un *gamut* suficientemente amplio como para contener la mayor parte de los colores que podemos

tener en los documentos de prueba. El espacio elegido es Adobe RGB. La conversión se ha realizado mediante un procedimiento de conversión que busca la máxima proximidad colorimétrica en color: relativo colorimétrico con compensación de punto negro. Hemos de considerar que, de esta forma, estamos evaluando la actuación conjunta de otros factores, además de la capacidad e idoneidad del procedimiento HDR para poder reproducir colores fieles y consistentes mediante gestión de color y de su rendimiento comparado con las versiones LDR, que es nuestro objeto de trabajo en cuanto a color. Estos otros factores son: la capacidad de la cámara digital para poder registrar el color de los documentos consistentemente y con cierta fidelidad (su sensibilidad espectral), la calidad del software de creación de perfiles de color, y el propio software de gestión de color aplicado para las conversiones y visualizaciones. Como estos otros factores son comunes a todas las capturas HDR y LDR, creemos que nuestro objetivo puede ser conseguido a través de las pruebas diseñadas.

Lo que vamos a evaluar objetivamente es la corrección en la codificación de color de los parches de color de la carta Colorcheckr, pero no la corrección en la representación de color, pues hemos aplicado métricas de color que van a trabajar comparando sólo códigos de representación de color: la codificación colorimétrica de fábrica de los parches normalizados de color de la carta Colorcheckr con la codificación de esos mismos parches representados en las imágenes digitales LDR y HDR. La representación implica un acto de reproducción de color en un monitor, papel impreso u otro medio impreso o fotográfico; cosas que no medimos colorimétricamente de forma objetiva. Hemos de considerar también que la percepción del color depende de muchos más factores que la proximidad colorimétrica entre elemento reproducido y reproducción; algunos de ellos son difícilmente controlables en una prueba, como es el caso de los que dependen de la psicología, estado emocional y formación del observador. Debido a estas limitaciones, hemos completado la prueba colorimétrica con una prueba subjetiva realizada por un experto en evaluación de calidad en imágenes, donde contrastamos visualmente la proximidad en color y contraste entre los documentos provenientes de las versiones LDR y HDR reproducidos en un monitor —bajo unas condiciones de calibración, caracterización y visualización controladas— y sus correspondientes originales ubicados en una cabina de visualización normalizada de acuerdo a estándares de cotejo de color en Artes Gráficas (ISO, 2009b).

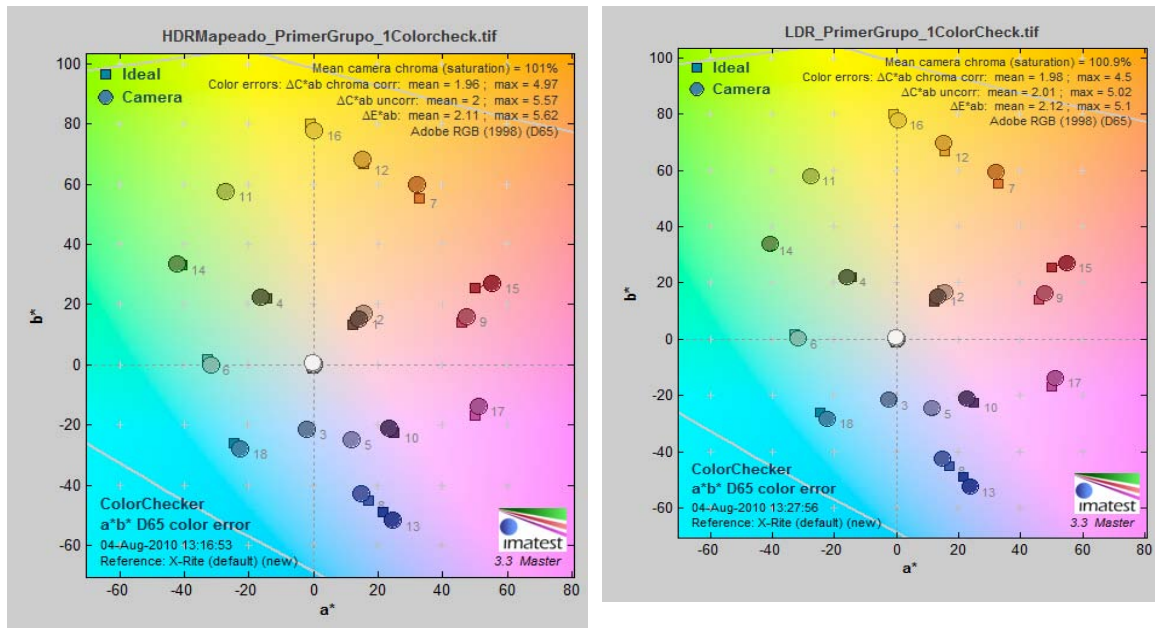
A las imágenes de la carta Colorcheckr representadas en las versiones HDR y LDR, una vez convertidas al espacio Adobe RGB, les hemos aplicado diversas métricas estandarizadas para la medida de la diferencia o distancia entre colores a partir de su representación codificada, encuadrables en lo que se denomina *Color Encoding Error*. Muchas de estas técnicas se basan en el cálculo de la distancia euclidiana que hay entre las medidas de color de las referencias de color incluidas en una muestra de colores previamente conocida (en nuestro caso, las de la carta Colorcheckr) y las medidas de los mismos colores correspondientes en una representación o reproducción de aquellas, tomando como sistema para la representación codificada de color un espacio de color perceptualmente uniforme e independiente de dispositivo, tal como el CIE Lab o CIE Luv. En concreto hemos manejado las métricas Delta E y Delta C sobre el espacio CIE Lab, que puede ser considerado, aunque sólo en rasgos muy generales, perceptualmente uniforme. Un espacio de color perceptualmente uniforme implica que la diferencia percibida entre los colores que comprende es aproximadamente proporcional a la distancia euclidiana existente entre ellos. Los tres ejes del sistema CIELAB se indican con los nombres L^* , a^* y b^* . Representan, respectivamente, un canal de luminosidad

(L), y dos de cromaticidad — tonalidad de rojo a verde (a) y tonalidad de amarillo a azul (b) —. Sería un tremendo error tomar las medidas objetivas, sobre la base de la carta Colorcheckr u otras similares, como una medida absoluta de la fidelidad en el registro de color de una imagen digital, pues las medidas nos hablan sólo de cómo se ha rendido en los colores reducidos de la carta, pero no en el resto de colores que presentan los documentos digitalizados. Los datos que arrojan estas métricas han sido utilizados en concreto para cotejar de forma comparada la consistencia de los métodos de procesamiento HDR y LDR, con la finalidad de poder determinar si el HDR permite conseguir una consistencia y proximidad de color en una reproducción similar al LDR, mediante la intermediación de la tecnología de gestión de color, o no.

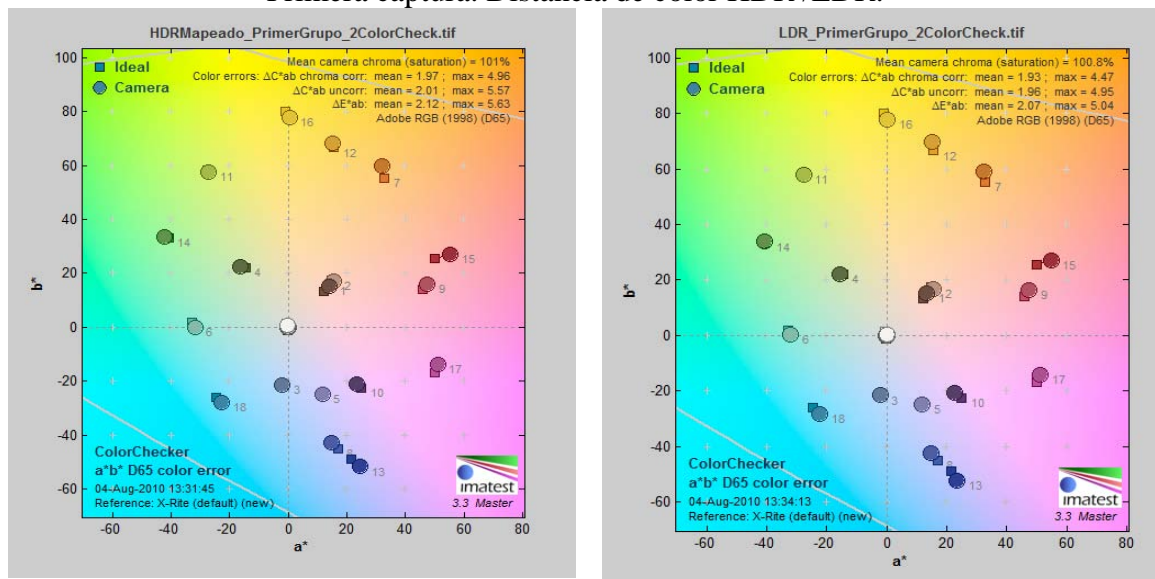
En teoría, una distancia de una unidad en las medidas de Delta C y Delta E significa que hay la diferencia perceptual de color mínima que puede percibir un ojo humano sano, por lo que esta cantidad podría ser tomada en principio como referencia. Esto sería así si los espacios de color a los que se aplican fueran perceptualmente uniformes en todo su espectro, lo que no siempre ocurre. Para paliar esta limitación, se suelen usar referencias menos exigentes; por ejemplo, una diferencia de Delta E de entre 3 y 6 se considera una buena proximidad de color en Artes Gráficas.

Presentamos más abajo los datos obtenidos en las pruebas colorimétricas mediante los gráficos aportados por el programa Imatest que hemos usado para las medidas de color. Los gráficos muestran la distancia de color en el plano de cromaticidad a^*b^* del espacio CIELAB (Koren, 2010a): los pequeños cuadrados representan los valores de color ideales, aportados por el fabricante, de los dieciocho parches de color (excluida la fila de parches grises) de la carta Colorcheckr; los círculos de pequeño tamaño representan los valores de color correspondientes a esos parches en la imagen digital obtenida tras la digitalización de la carta que se está evaluando; la distancia entre cuadrados y círculos correspondientes a un mismo color es indicativa de su diferencia; los números al lado de círculos o cuadrados indican a qué parche de la carta corresponde cada color; la percepción de saturación de un color individual es proporcional a su distancia desde el origen de las coordenadas cartesianas de cromaticidad ($a^* = b^* = 0$). También se ha calculado la media (mean) de todos los errores de color, el valor máximo (*max*) y el valor medio de saturación (*Mean camera chroma*). Estos datos aparecen en la parte de arriba a la derecha de cada gráfico. Valores medios de saturación por encima del 100% indican un aumento de la saturación general de la imagen digital con respecto a la saturación ideal de los colores de la carta de prueba. Un exceso de saturación podría significar la pérdida de detalles en zonas de color altamente saturados en el documento, por lo que es interesante también valorar este aspecto.

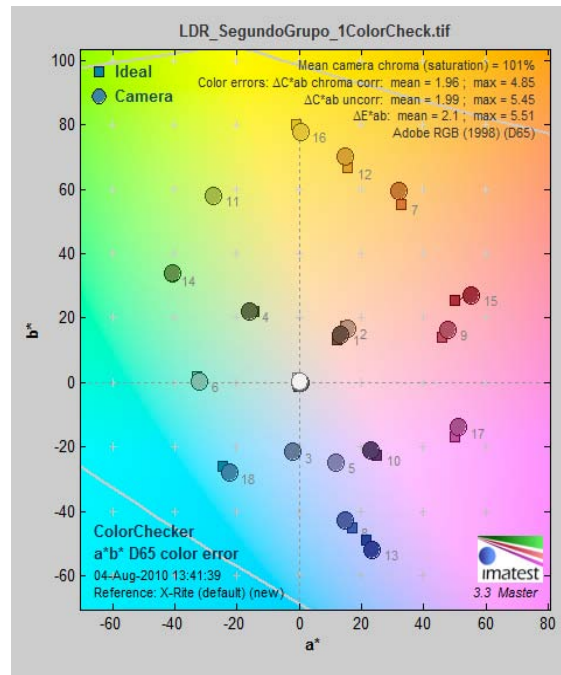
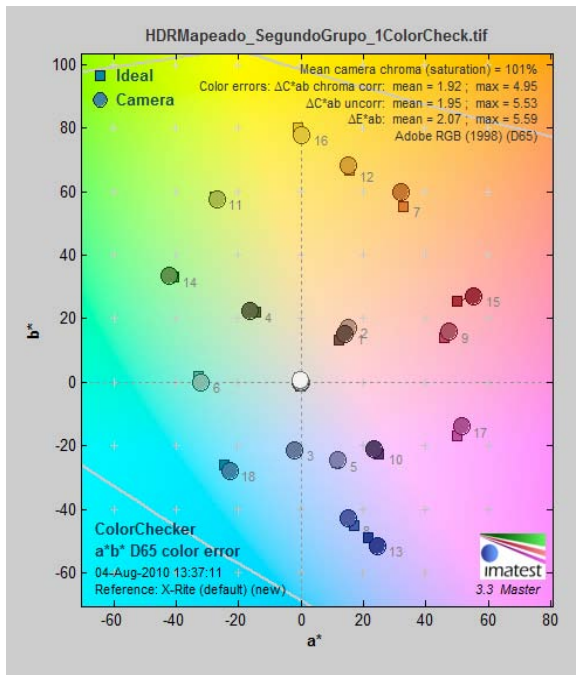
Figura 17
Gráficos comparativos de datos de distancia de color en las digitalizaciones.



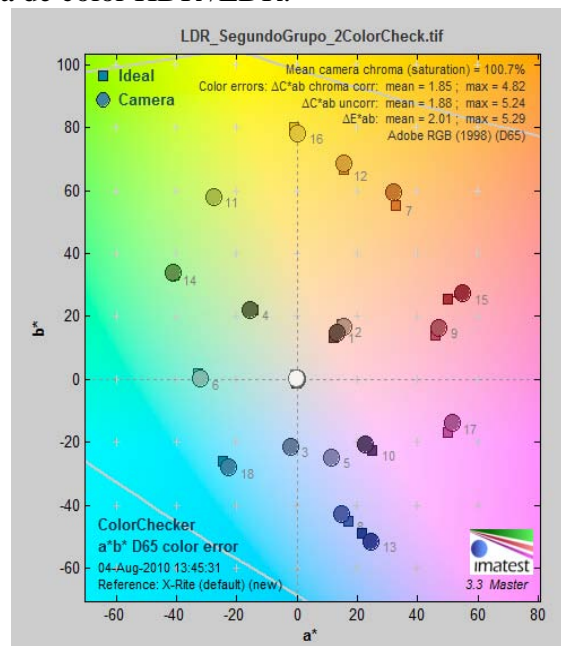
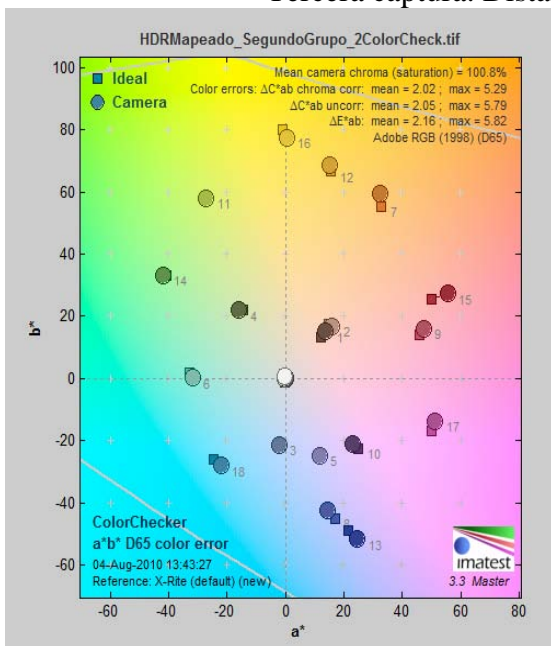
Primera captura. Distancia de color HDR /LDR.



Segunda captura. Distancia de color HDR /LDR.



Tercera captura. Distancia de color HDR /LDR.



Cuarta captura. Distancia de color HDR /LDR.

En cuanto a saturación, HDR y LDR arrojan resultados similares, con un aumento muy ligero de la saturación que es muy poco perceptible. En cuanto a precisión medida sobre la carta Colorcheckr, las diferencias en los valores medios y máximos entre ambas versiones son tan mínimas —siempre inferiores a la unidad— que podemos despreciarlas, tanto en métrica Delta E como Delta C. Los gráficos muestran un patrón de error de color prácticamente idéntico entre ambas versiones. No podemos considerar que LDR presente mayor precisión en cuanto a color que HDR ni viceversa. Pero volvemos a expresar la advertencia que ya hicimos más arriba: una codificación con

mucha precisión de los colores de los dieciocho parches de color de la carta Colorcheckr no implica necesariamente la misma exactitud en los millones de colores que pueda tener la imagen digital de un documento. La propia gestión de color introduce un sesgo hacia la mayor precisión de los parches de color o grises empleados en el proceso de creación del perfil de color ICC, pues el ajuste del resto de colores capturados se realiza mediante interpolación a partir de la correspondencia de color generada en el perfil ICC tomando como base los colores de la carta. Por ello, es altamente recomendable complementar este tipo de pruebas objetivas con la evaluación visual por expertos en condiciones controladas de visualización.

También hemos de considerar que el procesamiento HDR, a la hora de fusionar las imágenes tomadas con diferentes valores de exposición, tiende a conservar los colores mejor expuestos. Si los colores de la carta Colorcheckr están ubicados en un margen de densidad que implican una captura adecuada en la toma con exposición normal (para parche de gris de 18%), que es la que se ha hecho en la versión LDR, es posible que la imagen HDR de esos parches de color mantenga en una alta proporción los mismos píxeles que la imagen LDR, con lo que la carta Colorcheckr no estaría evidenciando con mucha precisión la respuesta a colores que están en densidades superiores o inferiores al margen de densidades de los parches de color de la carta Colorcheckr. Para paliar esta circunstancia, hemos evaluado minuciosamente la distancia en los parches más densos de color, aquellos que tienen un valor L de CIELAB inferior a 50, y no hemos hallado una distancia significativamente mayor a la del resto de colores.

4.3.2 Evaluación subjetiva.

El cotejo visual original/reproducción digital se ha realizado en una cabina de visualización normalizada, con un monitor marca EIZO, calibrado, caracterizado y ajustado en cuanto a temperatura de color e intensidad de punto blanco de forma coordinada con las condiciones de visualización de la cabina⁵. Para ello hemos seguido estándares y recomendaciones profesionales para cotejo visual de imágenes, especialmente el estándar ISO 3664:2009.

Para mejorar la consistencia en la representación del color de las capturas de pantallas que hemos hecho, algunas de las cuales incluimos aquí, las hemos pasado al espacio de color sRGB, que es más consistente para la visualización en cualquier tipo de monitor y además es el espacio de color por defecto en muchas plataformas informáticas y aplicaciones de visualización de imágenes.

Presentamos a continuación y analizamos, en las figuras 18 y sucesivas, varios detalles capturados, tanto en documentos en blanco y negro como en color incluidos en las pruebas.

⁵ Los datos de calibración son: luminancia de 115 cd/metro cuadrado; punto blanco de 6500K; Gamma R, G y B 2,2. El monitor ha sido calibrado y caracterizado justo antes de la prueba visual con un calibrador/caracterizador EyeOne de Gretag Macbeth.

Figura 18
Capturas de detalles para la apreciación de diferencias en contraste entre HDR y LDR.

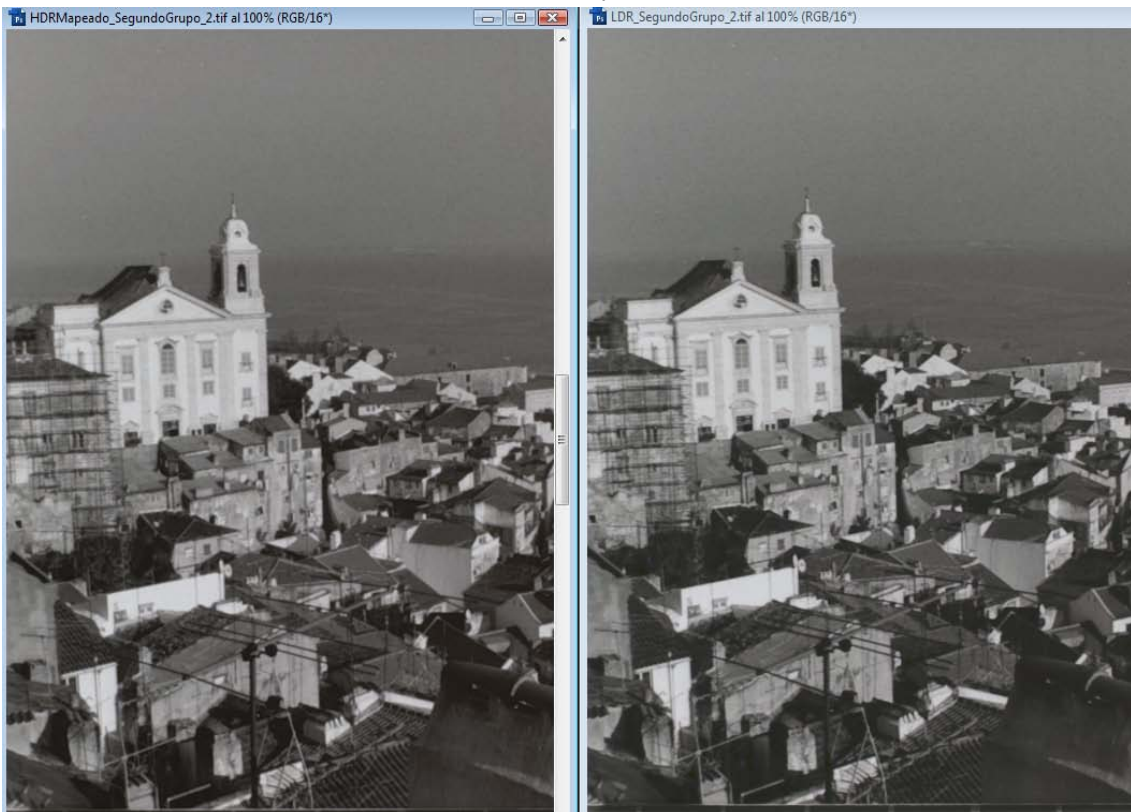


Detalle de apariencia en zonas de medio contraste en fotografía en blanco y negro y con dominio de altas frecuencias espaciales. HDR/LDR.

En las zonas de medio contraste evaluadas la apariencia visual subjetiva es prácticamente idéntica en reproducción tonal y contraste entre HDR y LDR. El cotejo con el original en cabina de visualización no arroja diferencias de percepción del contraste y color reseñables.

Si nos fijamos en la figura 19, en las zonas de alto contraste evaluadas la apariencia visual subjetiva es prácticamente idéntica en reproducción tonal y contraste, salvo la posterización y pérdida visible y aparente de detalle en sombras en el caso de LDR que ya mencionamos en el epígrafe dedicado a evaluación en el rendimiento tonal.

Figura 19
Capturas de detalles para la apreciación de diferencias en contraste entre HDR y LDR.



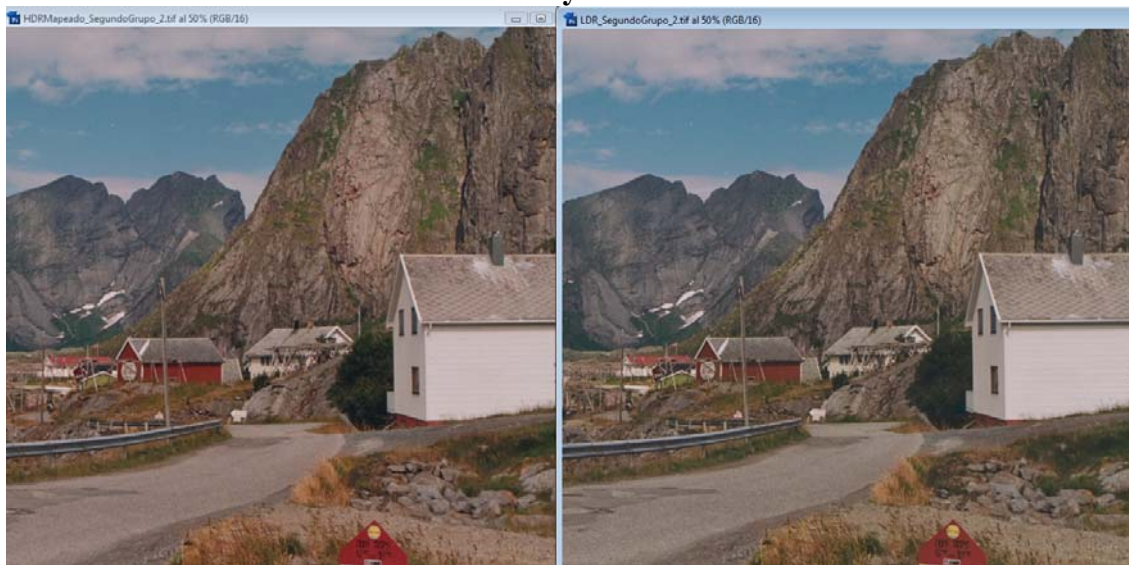
Detalle de apariencia en zonas de alto contraste en fotografía en blanco y negro y con dominio de altas frecuencias espaciales. HDR/LDR.

Figura 20
Capturas de detalles para la apreciación de diferencias en contraste y color entre HDR y LDR.



Detalle de apariencia en zonas color de bajo contraste en fotografía histórica monocroma iluminada a mano. HDR/LDR.

Figura 21
Capturas de detalles para la apreciación de diferencias en contraste y color entre HDR y LDR.



Detalle de apariencia en zonas color de alto y medio contraste en fotografía color. HDR/LDR.

En las figuras 20 y 21 se refleja la apariencia de color. La apariencia en ambas muestras, HDR y LDR, es muy similar, salvo algunas diferencias en color, que se perciben como colores que no tienen exactamente el mismo grado de saturación o tono. El resultado del cotejo con los originales en la cabina de visualización normalizada es el siguiente: el color general es más próximo al original en HDR que en LDR. Especialmente en la imagen monocroma, el contraste, apariencia general de color y saturación son más próximos en la imagen HDR. La imagen monocroma en LDR da la sensación de tener una dominante de color verdosa, además de una diferencia grande en cuanto a la saturación de los tonos verdes. La imagen monocroma en LDR muestra también un problema de posterización bien visible en la gradación detalle de las sombras del antebrazo de la modelo. Esa posterización no aparece cuando se visualiza la imagen sin su perfil de color, es decir, interpretando los datos en bruto con el espacio de color de trabajo del editor de imagen usado para las pruebas (Adobe RGB en Adobe PhotoShop). Es, por consiguiente, un defecto introducido por el perfil de color, provocado por el exceso de contraste en esa zona de la imagen en LDR. En HDR el contraste de esa transición es menor, por lo que la gestión de color no introduce posterización. En el documento fotográfico en color moderno, en HDR observamos una apariencia también muy próxima de color y saturación. La imagen HDR precisa, para conseguir una igualación total de proximidad al ojo, sólo un ligero aumento de contraste⁶. En LDR la diferencia en contraste y saturación es mayor en la apreciación visual; para su igualación con el original ha requerido un ajuste de contraste que distorsionaba en

⁶ Para la igualación se han pasado desde los espacios respectivos de los perfiles ICC de la cámara al espacio Adobe RGB con propósito de conversión Colorimétrico Relativo, con compensación de punto negro. Lo hemos realizado con el comando niveles ajustando el punto blanco, gamma y negro, respectivamente, a 220, 1,1 y 9.

exceso la imagen debido a la fuerte posterización que presenta en zonas de sombra⁷. Con este ajuste la posterización en la versión LDR es muy visible en las zonas más densas, por lo que la imagen no puede considerarse correcta para un patrón de calidad normal. Es decir, la imagen LDR no puede ser igualada en pantalla manteniendo una calidad visual aceptable; el bajo rango dinámico de la cámara digital empleada lo impide. Pero este problema se ha solucionado satisfactoriamente en la versión HDR mapeada tonalmente.

Hemos evaluado, asimismo, la consistencia del perfil ICC en las dos capturas HDR, para ello hemos intercambiado los perfiles ICC de los dos ficheros HDR del grupo primero, pues ambas capturas se han hecho exactamente con las mismas condiciones de iluminación, resolución y procesado. El resultado es que la proximidad de color es muy alta con el intercambio de perfiles, siendo indistinguibles a simple vista las versiones con perfil intercambiado con respecto a las versiones con su propio perfil. Hemos tomado algunas muestras de las cartas Colorcheckr, midiendo su proximidad en CIELAB, y no hemos notado cambio en sus valores colorimétricos. No obstante, sería conveniente, por mayor seguridad en la aplicación de la gestión de color, digitalizar cada documento en HDR con una carta Colorcheckr de pequeño tamaño que permita hacer un perfil ICC de color personalizado para cada imagen de documento.

4.4 Evaluación visual de artefactos.

La evaluación visual de artefactos exclusivos del procesamiento HDR se ha realizado sobre las capturas de documentos originales, por lo que sólo hemos empleado el segundo grupo. Ante la detección de un posible artefacto se ha comprobado que no aparezca también en su correspondiente máster LDR, ya que, en su caso, no sería tal artefacto HDR. La evaluación se ha realizado de forma visual debido a la dificultad de su detección, medición y valoración automáticamente, así como a la carencia de herramientas fácilmente disponibles para medir este tipo de parámetros.

Hemos analizado la presencia de una serie de defectos típicos del mapeo tonal en aplicaciones de software HDR. Para su identificación hemos empleado los defectos analizados en el manual de Michael Freeman (Freeman, 2009):

- Inversión de tonos. Este defecto consiste en que dos tonos adyacentes invierten su valor de intensidad de luz, de forma que el que debería ser más oscuro se vuelve el más claro y viceversa. Se puede producir cuando el operador de mapeo tonal trabaja el contraste de la imagen a nivel local, zona de interés a zona de interés, y se cruzan de forma errónea dos ajustes de contraste diferentes para zonas adyacentes, derivando en que en una se oscurece demasiado una zona clara y en la otra se aclara excesivamente una zona oscura. Por ejemplo, una sombra podría llegar a ser más clara que una zona donde incide directamente la luz.
- Pérdida de contraste a nivel local. Este defecto produce sensación de irrealidad, de pérdida de naturalidad.

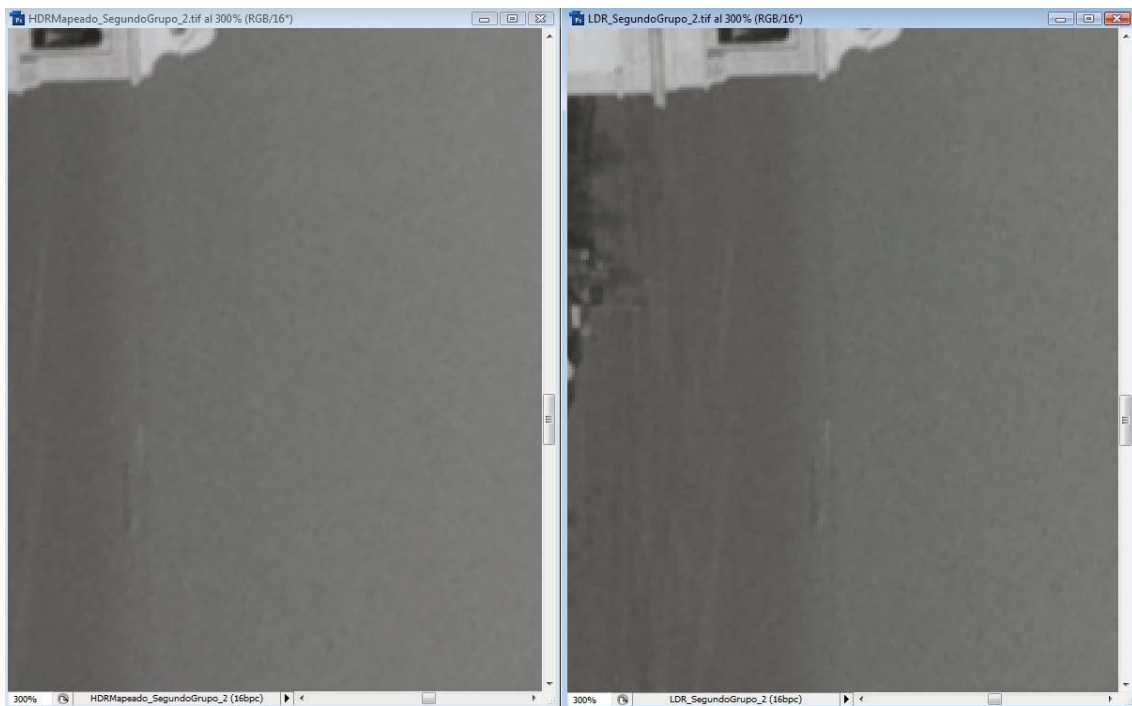
⁷ Lo hemos realizado con el comando niveles ajustando el punto blanco, gamma y negro, respectivamente, a 212, 1,23 y 20.

- Halos. Se producen cuando el operador de mapeo tonal aumenta excesivamente el contraste a nivel local en la zona límite de dos áreas de alto contraste; alrededor del borde que separa ambas zonas se produce un halo.
- Sobresaturación de color a nivel local, especialmente en altas luces.
- Exceso de contraste de detalle o microcontraste. Se percibe como un exceso de nitidez.
- Recortes de detalles en zonas de luces. Se pierden detalles muy claros de la imagen.
- Recortes de detalles en zonas de sombra. Se pierden detalles muy oscuros de la imagen.
- Ghosting (doble imagen). Se produce por pequeñas diferencias en el registro de los elementos captados en las imágenes tomadas a diferentes exposiciones que luego se fusionan.
- Rebordes de color muy marcados en zonas de borde que separan áreas muy contrastadas entre sí. Se manifiestan como halos de colores primarios o secundarios (rojo, cian, magenta, verde...) apreciables alrededor de este tipo de zonas.
- Suavizado. Se produce una pérdida de nitidez o de detalle de pequeño tamaño.

El único artefacto detectado visualmente en HDR ha sido el de suavizado, especialmente visible en una de las fotografías en blanco y negro, en la zona de mar (véase figura 22), que presenta una alta textura con poco contraste. Hemos detectado este suavizado en el resto de imágenes, tanto en las de color, como en la monocroma. Hemos medido su intensidad mediante el canal de luminancia en algunas áreas y realmente no es un efecto visual: existe, pero su incidencia es muy pequeña y fácilmente corregible aplicando una máscara de enfoque de muy baja intensidad.

Figura 22

Detalle comparativo de zona del documento donde se puede apreciar un suavizado en la versión HDR (a la izquierda).



5 Conclusiones.

Es importante concienciar a los profesionales que tienen responsabilidad sobre la digitalización de patrimonio documental, especialmente patrimonio fotográfico, de la necesidad de contar con dispositivos de captura que permitan el rango dinámico necesario para capturar el margen de densidades de los documentos. Tanto el rango dinámico del dispositivo, con los ajustes y parámetros de captura a aplicar, como el margen de densidades de los documentos deben ser medidos antes de la captura, debiendo ser el primero al menos igual o, preferiblemente, superior al segundo. En su defecto, se deberá seleccionar una técnica HDR adecuada para aquellos documentos para los que se estime que el rango dinámico del dispositivo es insuficiente, mediante pruebas que evalúen el rendimiento en cuanto a registro de información tonal, cromática y detalle espacial.

En las pruebas realizadas en este estudio, no hemos detectado diferencia en la capacidad resolutoria de las imágenes HDR frente a las LDR con el método de procesamiento HDR empleado. En ambos tipos de imágenes hemos podido registrar con el mismo nivel de calidad aquellos detalles espaciales de tamaño pequeño o grande que son registrables por el dispositivo de captura digital empleado con la configuración de captura elegida. El procesado HDR puede incluir en las imágenes un mínimo suavizado del microcontraste, esto es, el contraste en las zonas que presentan pequeño nivel de detalle, pero sin que este problema cause la pérdida de registro del detalle y siendo fácilmente solucionable mediante la aplicación de una máscara de enfoque ajustada a valores muy bajos. El procesado HDR puede introducir cambios en la afectación de la aberración cromática lateral, que es un problema de calidad muy frecuente en cámaras digitales, ya sea disminuyendo o aumentando su incidencia. En las pruebas realizadas, los cambios son prácticamente inapreciables mediante visualización en pantalla. La medición objetiva comparada de la aberración cromática en las pruebas realizadas no muestra un cambio que sea suficientemente significativo como para poder ser detectado visualmente a un tamaño de visualización normal.

El HDR mejora muy significativamente el rango dinámico de dispositivos de captura con escaso rango dinámico, como son las cámaras réflex digitales; posibilita que se puedan capturar documentos con amplios márgenes de densidades, más allá de la propia capacidad del dispositivo, permitiendo el registro correcto de información tonal, espacial y cromática sin defectos graves de calidad, tales como ruido alto, posterización y recorte tonal en zonas de luces o de sombras.

No se han detectado diferencias significativas entre HDR y LDR en cuanto a la calidad de registro de color, empleando métricas de medida de error de color estandarizadas; tampoco en cuanto a la percepción subjetiva de proximidad original/imagen visualizada en un monitor con condiciones de entorno de visualización controladas. Aunque la proximidad en color y contraste es mayor en la versión HDR. En cuanto a la viabilidad de uso de perfiles ICC, tampoco se ha detectado ningún problema, pero es recomendable, a la espera de estudios que aborden con más profundidad este aspecto, que los perfiles se realicen sobre una carta de color, apta para su creación, digitalizada en el mismo acto de digitalización del documento, pues el procesado HDR puede incluir ajustes no lineales, que hacen perder la consistencia en la reproducción de la carta entre

escaneado y escaneado o dentro de zonas distintas en cuanto a contenido gráfico de la misma imagen, incluso sin variar las condiciones de luz ni parámetros de captura entre los escaneados. Creemos que es necesaria una investigación más pormenorizada al respecto, analizando la respuesta de la gestión de color ante colores presentes en los documentos a escanear que estén alejados, en cuanto a luminosidad o cromaticidad, de los colores normalizados de la carta empleada para hacer el perfil de color.

No hemos detectado incidencia significativa, o de difícil corrección mediante un procedimiento automático, en cuanto a presencia de artefactos típicos del procesamiento HDR. El suavizado de contraste detectado tiene una incidencia mínima y, en caso de considerarse adecuada su corrección, se puede hacer fácilmente por un procedimiento automático desde cualquier editor de imagen digital.

Las pruebas realizadas evidencian que hay consistencia en el procesado HDR —con el método captura multiexposición, fusión y mapeado que hemos aplicado— de imagen a imagen. Por consiguiente, se podría conseguir consistencia en la calidad de resultados para la digitalización de un fondo completo. No obstante, convendría hacer más pruebas y con una muestra mayor de documentos, que contemplase diferentes tipos de medios y documentos.

Gracias al uso de técnicas HDR, con una cámara fotográfica digital de coste medio-bajo, hemos podido obtener, perfectamente reproducido, un rango dinámico entorno a 2,6 D, que equivale a 8,6 diafragmas (f/stop); no ofreciendo esta cámara con técnicas de digitalización LDR con calidad más de 1,7 D o 5,6 diafragmas. Por ello, la técnica de HDR presentada y analizada en este estudio nos parece aplicable a la digitalización de patrimonio documental en casos donde no se cuente con suficientes recursos para el escaneado de documentos con amplios márgenes de densidad, pero con una serie de matizaciones. En primer lugar, hay que considerar que los resultados de este estudio no son extensibles más allá del margen de densidades de los documentos y cartas de prueba, con una densidad máxima de 2,6 D. Estos márgenes de densidades no son problemáticos para la técnica de mapeado tonal que hemos empleado, menos agresiva y apta para posibilitar una interpretación facsímil de un documento fotográfico que otras; pero con márgenes de densidades mayores, esta técnica podría no dar los mismos resultados, debiéndose optar por otras más agresivas con la información gráfica del documento. Para densidades y márgenes de densidades mayores a los incluidos en este estudio recomendamos hacer pruebas adicionales, donde se demuestre la idoneidad de éste u otros procedimientos de HDR. En segundo lugar, hay que contar con los problemas de eficiencia añadidos al HDR: el mayor consumo de tiempo para la captura y procesado de la imagen, el tener que manejar y gestionar múltiples ficheros de gran tamaño, la necesidad de un control minucioso en el momento de generar el mapeado —que exigiría un control por un experto, en todas las imágenes—, la necesidad de involucrar más recursos en las digitalizaciones, y un control de calidad más exhaustivo. Este problema de eficacia puede hacer más aconsejable acudir a equipamientos de alto coste que ofrezcan un rango dinámico suficiente en el caso de que los lotes de documentos a digitalizar sean muy voluminosos.

6 Bibliografía.

ANSI/AIIM MS44-1988 (1988). Recommended Practice for Quality Control of Image Scanners.

Artmanna, U.; Wueller, D. (2008). Noise Reduction vs. Spatial Resolution. *Proceedings of SPIE*, vol. 6817, p. 68170A.

Berns, R.S.; Frey, F.S. (2005). Direct Digital Capture of Cultural Heritage- Benchmarking American Museum Practices and Defining Future Needs. Rochester; Rochester Institute of Technology, Munsell Color Science Laboratory [en línea]. Disponible en <http://www.cis.rit.edu/museumSurvey/documents/Benchmark_Final_Report_Web.pdf> [fecha de consulta 5/08/2010].

Burt, P.J.; Kolczynski, R.J. (1993). Enhanced image capture through fusion. *Proceedings of the ICCV*, p. 173-182.

Cornell University Library (2003). Patrón de referencia para la captura digital. Tutorial de Digitalización de Imágenes. Llevando la teoría a la práctica [en línea]. Disponible en <<http://www.library.cornell.edu/preservation/tutorial-spanish/conversion/conversion-04.html>>.

Debevec, P. E.; Malik, J. (1997). Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, p. 369-378.

Engeldrum, P. G. (2001). Psychometric Scaling: Avoiding the Pitfalls and Hazards. *IS&T's 2001 PICS Conference Proceedings*, p. 101-107.

Engeldrum, P. G. (2004). A Theory of Image Quality: The Image Quality Circle. *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 48 (5), 446-456.

Freeman, M. (2009). *Manual de fotografía de gama dinámica amplia (HDR)*. Barcelona; Blume.

Frey, F. ; Reilly, J. M. (2006). Digital Imaging for photographic collections: foundations for technical standards. (2ª ed.) Rochester; Image Permanence Institute [en línea]. Disponible en <http://www.imagepermanenceinstitute.org/shtml_sub/digibook.pdf> [fecha de consulta 25/08/2010].

Grossberg, M. D.; Nayar, S. K. (2003). High Dynamic Range from Multiple Images: Which Exposures to Combine? *Proceedings ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision* [en línea]. Disponible en <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=263472EA4F34B6BA3E4D514F06B57655?doi=10.1.1.123.3522&rep=rep1&type=pdf>> [fecha de consulta 25/08/2010].

ISO 12233:2000 (2000). Photography - Electronic still-picture cameras - Resolution measurements.

ISO 16067-1:2003 (2003a). Photography - Spatial resolution measurements of electronic scanners for photographic images - Part 1: Scanners for reflective media.

ISO 15739:2003 (2003b). Photography - Electronic still picture imaging - Noise measurements.

ISO 16067-2:2004 (2004a). Photography - Electronic scanners for photographic images - Spatial resolution measurements - Part 2: Film scanners.

ISO 21550:2004 (2004b). Photography - Electronic scanners for photographic images - Dynamic range measurements.

ISO 14524:2009 (2009a). Photography - Electronic still-picture cameras - Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs).

ISO 3664:2009 (2009b). Graphic technology and photography - Viewing conditions.

Kenney, A. R. y Rieger Y. O. (2000). *Moving Theory into Practice: Digital Imaging for Libraries and Archives*. Mountain View, CA; Research Libraries Group.

Kleinmann, J. ; Wueller, D. (2007). Investigation of two methods to quantify noise in digital Images based on the perception of the human eye. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, vol. 6494, p. 64940N.1-64940N.12.

Koren, N. (2010a). Running Imatest SFR [en línea]. Disponible en <
http://www.imatest.com/docs/sfr_instructions2.html > [fecha de consulta 5/08/2010].

Koren, N. (2010b). Noise in photographic images [en línea]. Disponible en <
<http://www.imatest.com/docs/noise.html> > [fecha de consulta 5/08/2010].

Koren, N. (2010c). Using Colorcheck [en línea]. Disponible en <
<http://www.imatest.com/docs/colorcheck.html> > [fecha de consulta 5/08/2010].

Loebich, C.; Wueller, D. (2001). Three Years of Practical Experience in Using ISO Standards for Testing Digital Cameras. *Proceedings of the Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference (PICS-01), Montréal, Quebec, Canada, April 22-25 2001, IS&T 2001*, p. 257-261.

Loebich, C.; Wueller, D.; Klingen, B.; Jaeger, A. (2007). Digital Camera Resolution Measurement Using Sinusoidal Siemens Stars. En: Martin, R.A; DiCarlo, J.M; Sampat, N. (editores). *Digital Photography III*, edited by Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE, vol. 6502 [en línea]. Disponible en <
http://www.image-engineering.de/images/pdf/conference_papers/resolution_measurement.pdf > [fecha de consulta 5/08/2010].

Mann, S.; Picard, R. (1995). Being 'undigital' with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures. *Proceedings of IS& T, 46th annual conference*, p. 422-428.

Mantiuk, R.; Daly, S.; Myszkowski, K.; Seidel, H.-P. (2005). Predicting visible differences in high dynamic range images - model and its calibration. *Human Vision and Electronic Imaging X, IST/SPIE's 17th Annual Symposium on Electronic Imaging*, vol. 5666, p. 204-214 [en línea]. Disponible en <<http://www.mpi-inf.mpg.de/~mantiuk/papers/mantiuk05PredVisDiff.pdf>> [fecha de consulta 25/08/2010].

McCann, John J. (2008). Perceptual rendering of HDR in painting and photography. *Preprint of 6806-30 paper in SPIE/IS&T Electronic Imaging Meeting, San Jose, January, 2008* [en línea]. Disponible en <http://web.me.com/mccanns/Color/Color_Reproduction_files/08EI%206806-30.pdf> [fecha de consulta 25/08/2010].

McCann, J. J.; Rizzi, A. (2009). Preservation of edges: the mechanism for improvements in HDR imaging. *Preprint of 7240-39 paper in SPIE/IS&T Electronic Imaging Meeting, San Jose, January, 2009* [en línea]. Disponible en <http://web.me.com/mccanns/McCannImaging/Home_files/09McCannEDGES.pdf> [fecha de consulta 26/08/2010].

Puglia, S.; Reed, J.; Rhodes, E. (2004). U.S. National Archives and Records Administration (NARA) - Technical Guidelines for Digitizing Archival Materials for Electronic Access: Creation of Production Master Files- Raster Images [en línea]. Disponible en <<http://www.archives.gov/preservation/technical/guidelines.pdf>>. [fecha de consulta 26/08/2010].

Reinhard, E.; Ward, G.; Pattanaik, S.; Debevec, P. (2006). *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann.

Stelmach, M. (2010). Evaluating digital image performance device capability and image quality. Presentation by Michael Stelmach at an August, 2010 workshop sponsored by CENDI, FLICC and FADGI [en línea]. Disponible en <http://www.digitizationguidelines.gov/stillimages/documents/Evaluating_Digital_Imaging-2010.pdf> [fecha de consulta 25/08/2010].

Still Image Working Group (2010). GAP Analysis. Updated 01/12/2010 [en línea]. Disponible en <http://www.digitizationguidelines.gov/stillimages/documents/Gap_Analysis.pdf> [fecha de consulta 25/08/2010].

Williams, D. (2002). Image quality metrics. *RLG Diginews*, vol. 4 (4) [en línea]. Disponible en <http://www.worldcat.org/arcviewer/1/OCC/2007/08/08/0000070511/viewer/file1806.html>.

Williams, D. (2003). Debunking of Specsmanship: Progress on ISO/TC42 Standards for Digital Capture Imaging Performance. *IS&T's 2003 PICS Conference*, p. 77-81 [en

línea]. Disponible en < http://www.i3a.org/wp-content/uploads/2008/03/debunking_specsmananship.pdf> [fecha de consulta 5/08/2010].

Wueller, D. (2002). Measuring Scanner Dynamic Range. *PICS 2002: Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference*. Portland, Oregon; April 2002, p. 163-166.

Wueller, D. (2006). Image Engineering digital camera tests (White Paper) [en línea]. Disponible en < https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/as-75.2122/luennot/AS-75_2122_kameramittaukset.0.pdf> [fecha de consulta 5/08/2010].

Wueller, D.; Dormolen, H. Van; Jansen, V. (2009). Universal Test Target Technical Specification [en línea]. Disponible en <<http://www.universaltesttarget.com/download/UTT%20technical%20specs.pdf>> [fecha de consulta 25/08/2010].

Xiao, F. ; DiCarlo, J. ; Catrysse, P. Y Wandell B. (2002). High Dynamic Range Imaging of Natural Scenes. *Tenth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, 2002. Scottsdale* [en línea]. Disponible en < http://white.stanford.edu/~brian/papers/pdc/CIC10_Paper88.pdf > [fecha de consulta 25/08/2010].