

Tiempo de respuesta y variación dimensional del papel ante fluctuaciones de humedad relativa: implicaciones para su conservación preventiva

María Sobrino Estalrich, Salvador Muñoz-Viñas

Resumen: La respuesta del papel a las fluctuaciones de humedad relativa ambiental (HR) constituye un factor determinante para su conservación, exposición y almacenamiento, especialmente en obras de gran formato. Este estudio analiza el comportamiento dimensional de tres tipos de papel sometidos a cambios controlados de HR, registrando las variaciones longitudinales y transversales en intervalos de 5 minutos hasta que se alcanza el equilibrio higroscópico con el ambiente. Los resultados muestran que la mayor parte del cambio dimensional ocurre durante los primeros 10–15 minutos tras la alteración de la HR, estabilizándose antes de los 20 minutos en todos los casos. Se confirmó además un comportamiento marcadamente anisotrópico: las expansiones fueron más lentas y pronunciadas en dirección transversal (CD) que en la dirección de fabricación (MD). El papel envejecido mostró menor respuesta y una estabilización más rápida, lo que sugiere una reducción en su capacidad de absorción y desorción de agua, asociada a su envejecimiento. Estos resultados, permiten comprender los mecanismos y tiempos de respuesta del papel frente a las variaciones de HR ambiental, y aportan criterios útiles para la conservación preventiva, especialmente en el contexto actual de flexibilización de las condiciones ambientales en instituciones culturales.

Palabras clave: humedad relativa, conservación preventiva, papel, variaciones termohigrométricas, gran formato, anisotropía

Response time and dimensional variation of paper to fluctuations in relative humidity: implications for its preventive conservation

Abstract: The response of paper to fluctuations in relative humidity (RH) is a key factor in its conservation, display, and storage, particularly for large-format artworks. This study examines the dimensional behavior of three types of paper under changing moisture conditions, measuring longitudinal and transversal variations every five minutes until equilibrium was reached. The results show that most dimensional change occurs within the first 10–15 minutes after a change in RH, and that stabilization occurs within 20 minutes in all cases. As expected, pronounced anisotropic behavior was observed: expansion was slower and more pronounced in the cross direction (CD) than in the machine direction (MD). The aged paper showed a less pronounced response and faster stabilization, suggesting a reduced capacity for water adsorption and desorption, associated with fibre ageing. These findings provide a basis for understanding how and when paper responds to changes in RH, and offer useful criteria for preventive conservation, particularly in the context of increasing flexibility in environmental conditions within cultural institutions.

Keywords: relative humidity, preventive conservation, paper, thermo-hygrometric variations, large-format, anisotropy

Tempo de resposta e variação dimensional do papel perante flutuações de humidade relativa: implicações para a sua conservação preventiva

Resumo: A resposta do papel às flutuações da humidade relativa ambiental (HR) constitui um fator determinante para a sua conservação, exposição e armazenamento, especialmente no caso de obras de grande formato. Este estudo analisa o comportamento dimensional de três tipos de papel submetidos a alterações controladas de HR, registando as variações longitudinais e transversais em intervalos de 5 minutos até que seja atingido o equilíbrio higroscópico com o ambiente. Os resultados mostram que a maior parte da variação dimensional ocorre durante os primeiros 10–15 minutos após a alteração da HR, estabilizando antes dos 20 minutos em todos os casos. Confirmou-se ainda um comportamento marcadamente anisotrópico: as expansões foram mais lentas e mais pronunciadas na direção transversal (CD) do que na direção de fabrico (MD). O papel envelhecido apresentou uma resposta menor e uma estabilização mais rápida, o que sugere uma redução na sua capacidade de absorção e desorção de água, associada ao processo de envelhecimento. Estes resultados permitem compreender melhor os mecanismos e os tempos de resposta do papel face às variações de HR ambiental e fornecem critérios úteis para a conservação preventiva, especialmente no contexto atual de flexibilização das condições ambientais em instituições culturais.

Palavras-chave: humidade relativa, conservação preventiva, papel, variações termo-higrométricas, grande formato, anisotropia

Introducción

Las obras cuyo soporte es el papel constituyen una parte fundamental del patrimonio cultural, tanto por su valor artístico como documental. Este material posee una naturaleza altamente higroscópica, lo cual significa que su comportamiento dimensional y mecánico está directamente relacionado con las condiciones ambientales, en especial con la humedad y la temperatura. La absorción o desorción de humedad ambiental por parte de las moléculas de celulosa constitutivas del papel puede provocar cambios dimensionales, ondulaciones o tensiones internas en las obras (Banik y Brückle 2018: 97-98). Estos fenómenos no solo afectan a la apariencia estética de las obras, sino que condicionan su estabilidad mecánica, limitan su manipulación y condicionan la interacción con los materiales que forman parte del montaje. Comprender, pues, la relación entre las obras en papel y su entorno resulta esencial para anticipar y controlar estas variaciones, y por tanto sus consecuencias visibles.

Son muchos los autores que han estudiado el comportamiento del papel frente a los cambios en la humedad ambiental. Desde finales del siglo XIX ya se realizaban estudios sobre los efectos de la humedad en la estabilidad del papel, principalmente desde el punto de vista de la producción industrial. Asimismo, otros estudios posteriores más completos examinaron factores estructurales y químicos que influyen en la estabilidad dimensional del papel expuesto a cambios en la humedad ambiental, como el tipo y el grado de encolado, la longitud de la fibra, el contenido inicial de agua, entre otros, aportando un conocimiento más profundo y detallado sobre las variaciones dimensionales del papel (Caulfield 1988: 87-97; Larsson, Hoc y Wågberg 2009: 356-371). Estudios recientes suman a los factores anteriores otros como el contacto interfibrilar, el aumento de tamaño correspondiente a la celulosa, hemicelulosa y a la lignina, la densidad, porosidad, entre muchos otros (Lindner 2018: 1-17).

La mayoría de estudios realizados al respecto están orientados hacia la fabricación y optimización industrial del papel, donde el control dimensional se considera un parámetro crítico vinculado a los procesos de secado, encolado, generación de tensiones internas, etc. (Kiely 1927: par 17-21; Carson 1944: 1-11; Caulfield 1988: 87-97; Niskanen, Kuskowski y Bronkhorst 1997: 103-109; Larsson, Hoc y Wågberg 2009: 356-371; Lindner 2018: 1-17; Vonk, Geers y Hoefnagels 2020: 62-71). En el campo de la conservación, sin embargo, los estudios realizados respecto a la influencia de la humedad en las obras de papel suelen abordar otras cuestiones como la interacción directa con el agua durante tratamientos acuosos como baños, desacidificación o laminaciones, o la solubilidad de tintas u otras técnicas sustentadas. Otras investigaciones relevantes dentro del ámbito museístico se han centrado en el impacto de las condiciones ambientales sobre materiales patrimoniales, estableciendo límites seguros para cada tipo de material, teniendo en cuenta parámetros como

humedad, temperatura, iluminación o contaminantes (Mecklenburg y Tumosa 1999: 69-74; Pavlogeorgatos 2003: 1457-1460). La bibliografía sobre este aspecto es igualmente extensa. Cabe destacar el libro de Banik y Brückle *Paper and Water: A Guide for Conservators*, por consolidar en un único volumen el conocimiento teórico y experimental sobre la interacción entre el agua y el papel y sus implicaciones para la conservación de este material.

La tendencia actual es ampliar los parámetros de temperatura y humedad en las instituciones por cuestiones energéticas y de sostenibilidad (Anderson *et al.* 2010; Atkinson 2014: 205-210; Coelho *et al.* 2020: 1-4; Lucchi 2018: 180-183; Pavlogeorgatos 2003: 1457-1460), siempre teniendo en cuenta la seguridad de las piezas. Sin embargo, la relajación de los parámetros ambientales plantea nuevas preguntas para el conservador-restaurador: ¿en qué medida las fluctuaciones de humedad relativa (HR) ambiental, aun dentro de los rangos considerados seguros, afectan a la estabilidad dimensional de las obras en papel? ¿Con qué rapidez se dan estos cambios dimensionales una vez producida una alteración en la HR?

El presente artículo se centra en las consecuencias perceptibles que presentan las fluctuaciones de HR —que en la mayoría de los casos son reversibles y no necesariamente dañinas— pero que a veces dificultan sobremedida la exposición y el almacenaje de obras en papel, especialmente las de gran formato (Facini y Evans, 2003: 111-117; Benvestito, 2007: 51-52; Brockman y Mellon, 2020: párrafos 1-10; Filter, 1994: 1-6; Machačko, 2019: 159-161; Mecklenburg y Tumosa, 1999: 69-74). En este contexto, el estudio persigue dos objetivos principales: por un lado, cuantificar las variaciones dimensionales del papel ante cambios de HR en distintos tipos de soporte; por otro, determinar en qué intervalo temporal se concentran dichas variaciones. Este enfoque resulta especialmente útil, ya que nos permite valorar la rapidez de respuesta del material frente a fluctuaciones ambientales y comparar la respuesta dimensional entre distintos tipos de papel. A su vez, esto permite prever posibles alteraciones morfológicas —un aspecto particularmente relevante en obras de gran formato, donde incluso pequeñas variaciones porcentuales pueden tener consecuencias perceptibles—.

Metodología experimental

En los experimentos se emplearon tres tipos de papel con distintos niveles de calidad, composición y envejecimiento:

- Papel A: Se trata de un papel continuo gris, 100% reciclado, a partir de recortes de periódico, cuyo gramaje es de 80 g/m². Es un papel sin colorantes, encolantes, blanqueantes ni cargas. Al ser un papel heterogéneo en color— ya que se realiza a partir de remanentes de papeles de periódico— no se recoge información en la ficha técnica del fabricante respecto al brillo, blancura o cualquier característica estética (Papeles Rasepe, s.f.:

1-2). Este tipo de papel se ha seleccionado por su alta reactividad higroscópica, derivada de su bajo grado de encolado y cargas, y de su composición a partir de fibras cortas y recicladas (Roberts 1996: 155-160).

- Papel B: Es un papel blanco cuyo gramaje es de 80 g/m². Se fabrica a partir de fibra de eucalipto exclusivamente, con cargas minerales, almidón y encolantes. En este caso, la ficha técnica presenta datos como la opacidad, blancura, brillo, etc. que, si bien no son relevantes para este estudio, pueden consultarse en la misma (C.A.D Plotters 2018: 1-5). Este papel se ha elegido ya que es indicado para impresión *ink-jet*. Además, es un soporte ampliamente utilizado en documentos e impresos contemporáneos.

- Papel C: Corresponde a tres ejemplares originales de carteles cinematográficos de la película “No hago la guerra... prefiero el amor”, que se estrenó el año 1966 en Italia y en 1967 en España. Se trata de una impresión *offset* en un papel de 80 g/m². Este papel, de aproximadamente 60 años de antigüedad, se ha empleado para comparar la reacción de papeles nuevos con papeles que presentan cierto grado de envejecimiento y han estado sometidos a múltiples cambios en las condiciones ambientales.

Durante la formación de los papeles fabricados industrialmente, las fibras adquieren una dirección preferente, a lo que denominamos MD (*machine direction*), restringiendo la deformación de la hoja en dirección longitudinal. Al aumentar la humedad relativa, las fibras en MD apenas varían en longitud, pero sí experimentan una expansión significativa en su eje transversal debido a la absorción de moléculas de agua. Dado que esta expansión ocurre perpendicularmente al eje de las fibras, y estas se encuentran alineadas con la MD, el incremento dimensional se manifiesta principalmente en CD (*cross direction*). Este fenómeno explica por qué la expansión total en CD puede multiplicar varias veces la observada en MD (Muñoz Viñas 2008: 245).

De cada tipo de papel se fabricaron tres probetas de 100 x 70cm, para constatar la reproducibilidad de los resultados. En todos los casos la MD es paralela al lado largo del papel, y la CD es perpendicular a la misma. La elección de este formato responde a la necesidad de emplear muestras de dimensiones suficientes para registrar las mediciones con precisión. Asimismo, es un formato ampliamente empleado en carteles publicitarios y cinematográficos.

Antes de comenzar el testado, las muestras fueron aclimatadas durante 24 h a 23 ± 2°C siguiendo las condiciones dictadas por las normas UNE 7522:1997 y EN 20187:1993 (AENOR 1993; 1997) y entre 50 ± 2% de humedad relativa. Las pruebas se realizaron en una cámara de humedad, que permitía mantener la humedad estable con una variación máxima de un 4%. Cada muestra se colocó sobre un soporte totalmente plano e inerte sin fijación, de modo que el crecimiento y el decrecimiento fueran libres y

sin restricciones de ningún tipo. Previamente se realizaron marcas en lápiz de grafito en las zonas de medida, para asegurar que las mediciones se realizaran siempre en el mismo lugar: se hicieron tres puntos de medición por cada dirección de fibra, dos perimetrales y uno central, tanto en la MD como en la CD, empleando una regla milimetrada con un error instrumental máximo de 0,3 mm. Durante las pruebas, la HR en la cámara de humedad se mantuvo en 85 ± 2 %, mientras que, en el exterior, mediante un sistema de climatización, se mantuvo a 52 ± 2 %. En ambos casos se monitorizaron las condiciones ambientales mediante un termohigrómetro digital.

El experimento se desarrolló en tres fases principales:

- Acondicionamiento y medición preliminar: Medición de las probetas tras la aclimatación según la norma UNE 7522:1997 y EN 20187:1993 descritas anteriormente.

- Las muestras fueron trasladadas al interior de la cámara de humedad, a 85 ± 2% de humedad relativa. Se tomaron mediciones de cada punto de la muestra cada 5 minutos, hasta que cuatro registros consecutivos mostraran la misma medida dentro del margen de error instrumental —0,3 mm—. Este fue el criterio adoptado para considerar a la muestra en equilibrio con la humedad ambiental, aunque las muestras se mantuvieron un total de dos horas en la cámara de humedad para comprobar que no había más crecimiento.

- Una vez alcanzada la estabilización en la cámara de humedad, las probetas se sacaron y se expusieron de nuevo al ambiente del laboratorio —52% ± 2% — repitiendo el mismo protocolo de medición.

El cambio entre condiciones de humedad fue intencionalmente rápido y no refleja —o no debería— las condiciones habituales en instituciones o museos. En este caso, el propósito de aplicar un cambio tan brusco en las condiciones ambientales fue observar la respuesta máxima de los materiales provocando la variación más amplia posible. Este enfoque ofrece dos ventajas: en primer lugar, proporciona un límite superior en el rango de variación dimensional de los papeles testados, y, en segundo lugar, permite acotar un tiempo de reacción y de estabilización. Bajo gradientes más suaves, la magnitud de la variación será menor, pero los tiempos de reacción y estabilización pueden considerarse extrapolables, así como la relación entre el crecimiento de la MD y CD.

Las mediciones obtenidas en cada ensayo se transformaron en porcentajes de variación dimensional respecto a la longitud inicial de las probetas, mediante la relación:

$$\Delta L(\%) = (L_t - L_0) / L_0 \times 100$$

donde L_t corresponde a la longitud registrada en cada intervalo de tiempo y L_0 a la longitud inicial en condiciones ambientales 52 ± 2%.

Para cada tipo de papel y dirección (MD y CD) se calcularon los valores a partir de tres probetas testadas para comprobar la homogeneidad de los resultados y determinar si presentan patrones similares.

Resultados

Los resultados obtenidos reflejan el comportamiento dimensional de los tres tipos de papel en las condiciones anteriormente especificadas. En todos los casos, las mediciones se expresan como porcentaje de cambio respecto a la longitud inicial y se representan en función del tiempo de exposición. La información derivada permite observar tanto la magnitud total de la expansión o contracción como la velocidad de estabilización en cada dirección de la fibra (MD y CD). Aunque no se mencionen las mediciones explícitamente, todas las muestras se consideraron estabilizadas tras cuatro mediciones sin cambios dimensionales (lo que equivale a 20 minutos sin cambios). De manera preventiva, las probetas permanecieron un total de dos horas en las condiciones especificadas anteriormente, para verificar su estabilidad; en ningún caso se registró crecimiento adicional.

— Papel A

En este caso, como resultaba esperable, el crecimiento en CD es mucho mayor que en MD. Los datos porcentuales de crecimiento total en las tres probetas respecto al tamaño inicial de la hoja oscilan entre un 0,10 y 0,25% en MD, lo cual equivale a un crecimiento medio de 0,17 cm. Por el contrario, los datos de crecimiento en CD se sitúan entre el 0,55 y 0,98%, siendo el crecimiento medio de 0,53 cm a lo ancho de las probetas. Estos valores reflejan la marcada anisotropía característica de este tipo de papel.

El gráfico anterior [Figura 1] corresponde al crecimiento porcentual en cada intervalo de tiempo. Como puede observarse, la mayor parte del crecimiento total se centra en los primeros 10 minutos, pero existen diferencias entre las direcciones de fibra: En MD la mayoría del crecimiento, en torno al 75% de media, se produce en los primeros minutos, y en torno al 95% tras los primeros 10 minutos; tras los 15 minutos no hay

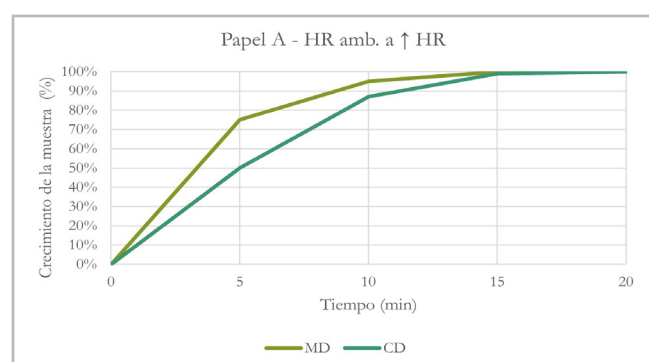


Figura 1.- Porcentaje de crecimiento del Papel A tras el paso de humedad relativa ambiental a elevada

más movimientos. Sin embargo, el crecimiento en CD se realiza de manera ligeramente más gradual, en promedio, un 50% del crecimiento ocurre en los primeros 5 minutos, alrededor de un 85% en los primeros 10 minutos de exposición a la HR. Tras 20 minutos no hay más movimientos.

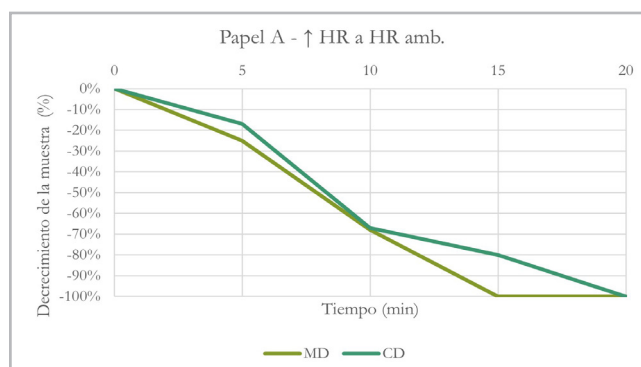


Figura 2.- Porcentaje de decrecimiento del Papel A tras el paso de humedad relativa elevada a ambiental

Este gráfico [Figura 2] corresponde a las mediciones realizadas en la siguiente fase —al someter las probetas a HR ambiental, tras haber sido sometidas a elevada HR—. El cambio dimensional en esta fase en esta y en las probetas posteriores se expresará en negativo, ya que se trata de un decrecimiento o encogimiento del papel. Como puede observarse, en ambas direcciones el decrecimiento es más progresivo que el crecimiento. Durante la fase de absorción, el 95% del crecimiento dado en MD se concentró en los primeros 10 minutos; posteriormente el 43% del crecimiento se produjo en el lapso entre 5 a 10 minutos de exposición. Con posterioridad a los 15 minutos no se observaron movimientos adicionales, finalizando la prueba con un decrecimiento de entre 0,33 y 0,40 cm, lo que sería equivalente a entre un 0,33 a un 0,40% en relación con la medida inicial. La CD se equilibra a los 20 minutos, es decir, es más progresiva, aunque tiene en común con la MD que la mayoría del decrecimiento se produce en el lapso entre los 5 y 10 minutos —en este caso correspondería al 50% del decrecimiento total—. Tras los 20 minutos de exposición, no hay más movimiento, lo cual se traduce en un decrecimiento medio de entre 0,35 y 0,53 cm, lo que equivaldría a entre el 0,55 y el 1,01% respecto a la medida inicial.

Es importante añadir que, respecto a las medidas iniciales, hay un encogimiento de entre 0,15 y 0,2 cm en MD debido al estrés mecánico durante el proceso de fabricación, también denominado built-in stress (Muñoz Viñas y Amorós Solera, 2008: 235-239; Moret de la Asunción, 2020: 26-27; Báguena Clemente, 2024: 24-25). En CD no se encuentran discrepancias respecto a la medida inicial, pese a que el crecimiento en esta dirección ha sido mucho mayor.

— Papel B

En este caso, como cabía esperar, también el crecimiento en CD es mayor que en MD. Respecto al MD, se observa

un crecimiento entre el 0,05 y el 0,17% respecto a la medida inicial, lo que se traduce en los mismos valores de crecimiento en centímetros. En CD, el crecimiento medio porcentual respecto a la medida inicial oscila entre 0,64 y 0,76% lo que se traduce en un crecimiento de entre 0,45 y 0,53 cm. La marcada diferencia entre ambas direcciones confirma de nuevo la marcada anisotropía del papel industrial.

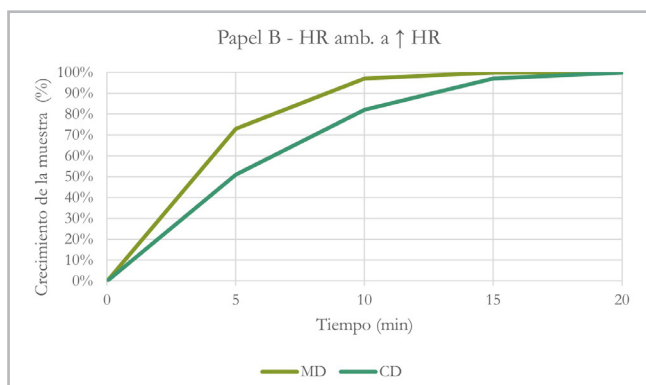


Figura 3.- Porcentaje de crecimiento del Papel B tras el paso de humedad relativa ambiental a elevada

Respecto a la distribución temporal de estos cambios [Figura 3], se observan similitudes con el papel A, en cuanto a que la gran mayoría del crecimiento se engloba en los primeros 15 minutos de exposición. Asimismo, se observa la misma tendencia de MD a crecer en los primeros minutos de exposición, así como la de CD a tener un crecimiento más progresivo y prolongado en el tiempo en comparación. En MD, el 73% del crecimiento total ocurre en los primeros 5 minutos; tras 10 minutos de exposición, se ha producido un 96% del crecimiento total. Tras los 15 minutos de exposición no se producen más movimientos dimensionales.

Por lo que respecta a CD, la expansión es también más gradual, y mantiene el mismo patrón general, centrándose la mayoría del crecimiento en los primeros 10 minutos de exposición.

Este gráfico, [Figura 4], corresponde a las mediciones realizadas en la tercera fase, tras el retorno de las probetas a condiciones ambientales tras alcanzar el equilibrio en

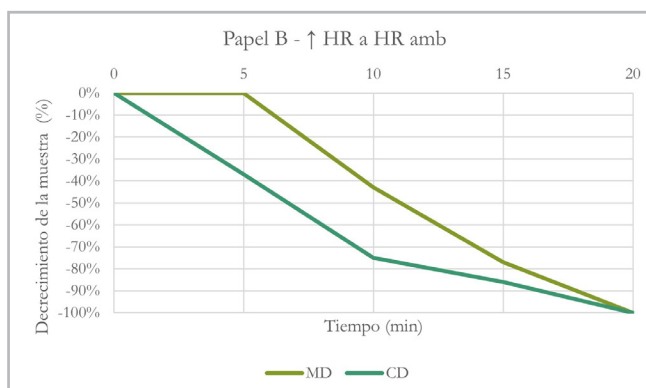


Figura 4.- Porcentaje de decrecimiento del Papel B tras el paso de humedad relativa elevada a ambiental

elevada HR. En general, los tiempos corresponden al mismo patrón que el papel A, pero con la particularidad de que la MD no crece en los primeros 5 minutos de exposición en ninguna de las tres probetas. Sin embargo, el tiempo en el que hay un cambio dimensional activo sigue siendo de 15 minutos. Partiendo de la base de que los cambios dimensionales en MD son muy reducidos, puede que el decrecimiento en el lapso tras los 5 minutos de exposición a HR ambiental estuviera por debajo del umbral de error, es decir, por debajo de 0,3 mm. No se detectaron variaciones posteriores a los 20 minutos.

Respecto a las variaciones en CD, se observa un comportamiento análogo al papel A: durante los primeros 5 minutos, se produce un cambio equivalente al 36% de media del cambio dimensional total; posteriormente, tras los 10 minutos de exposición se da el 74% del decrecimiento total; tras 15 minutos, se da el 84% del cambio dimensional total. Finalmente, a los 20 minutos se estabiliza y no se percibe ningún cambio más.

Tras la finalización de las pruebas, solamente se detectó una discrepancia en el tamaño de la hoja respecto a la medida inicial. Esta discrepancia de 0,02 cm se sitúa dentro del margen de error instrumental, y por tanto no es significativa.

— Papel C

En este caso, como en los casos anteriores, también el crecimiento en CD es mayor que en MD en condiciones de elevada HR. Respecto a las mediciones en MD, hay un crecimiento de entre el 0,13 y 0,18% en relación con el tamaño original, lo que se traduce en un crecimiento de entre 0,13 a 0,18 cm en el tamaño de las probetas. En relación con la CD, el crecimiento en relación al tamaño original es de entre el 0,36 y el 0,48%, es decir, entre 0,25 y 0,33 cm en estas probetas.

El comportamiento observado confirma la anisotropía del material, aunque con una respuesta dimensional reducida. Esta menor amplitud de cambio se asocia al envejecimiento del papel, que disminuye su capacidad de absorción y desorción de humedad (Erhardt, Tumosa y Mecklenburg 1999: 504; Muñoz Viñas y Amorós Solera 2008: 235-239; Muñoz Viñas 2008: 245-247; Muñoz Viñas 2006: 145-150). En el caso del papel C —el único de los testados que presenta envejecimiento natural—, dicho proceso implica la acumulación progresiva de transformaciones irreversibles de naturaleza fisicoquímica en la celulosa, como la escisión de cadenas glucosídicas, la oxidación y el *crosslinking* (Erhardt y Mecklenburg 1995: 247). Según Zervos (2010: 20), el envejecimiento también favorece la denominada “hornification”, término que describe los cambios irreversibles en la capacidad de absorción, desorción y retención de agua tras ciclos repetidos de variación de humedad y temperatura. Estos fenómenos explican la menor respuesta dimensional del papel C frente a los papeles A y B.

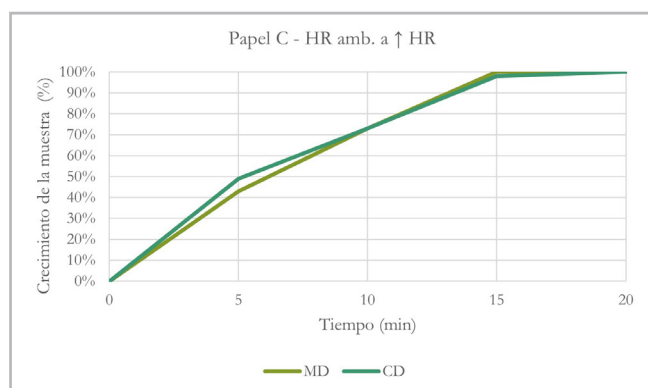


Figura 5.- Porcentaje de crecimiento del Papel C tras el paso de humedad relativa ambiental a elevada

El gráfico [Figura 5] evidencia una respuesta más heterogénea que en los papeles A y B. Si bien en MD se siguen produciendo la totalidad de los cambios dentro del rango de los 15 minutos de exposición: de media el 42% de los cambios se producen en los primeros 5 minutos y, cuando terminan los 10 minutos de exposición, se ha dado el 72% del crecimiento total. Destaca el lapso de los 5 a 10 minutos en la probeta 3, en el que no se producen cambios.

En CD las variaciones son aún más erráticas. La probeta 2 muestra una respuesta inicial intensa (un 87% del crecimiento total se produce a los 5 minutos de exposición, seguida por un cambio nulo durante los siguientes 5 minutos. La probeta 1 muestra una concentración del crecimiento en los primeros 10 minutos, donde se produce un 93% del crecimiento. Por último, en la probeta 3 el cambio es progresivo en los primeros 10 minutos, hasta acumular un 40% del cambio dimensional, sin embargo, la mayoría del mismo se produce a los 15 minutos (55%), y finalmente se produce un cambio muy ligero.

Respecto a los cambios dimensionales cuando las hojas se someten a HR ambiental tras su exposición a HR ambiental superior al 80% [Figura 6], los datos presentan una mayor homogeneidad entre las probetas que en la fase anterior. En este caso, el decrecimiento en MD se concentra en los 5 primeros minutos, con casi el 70% del decrecimiento total. Las probetas 1 y 3 no presentan cambios entre los 5 y 10 minutos.

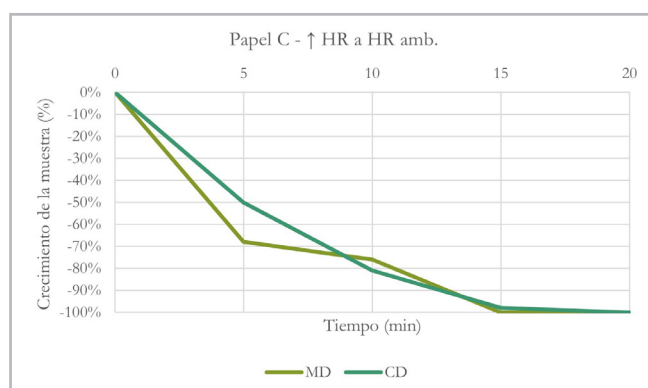


Figura 6.- Porcentaje de decrecimiento del Papel C tras el paso de humedad relativa elevada a ambiental

Aun así, todas las probetas se estabilizan a los 15 minutos, sin cambios posteriores.

El decrecimiento en la CD, si bien la mayoría del cambio dimensional se produce durante los primeros 5 minutos (50%), este se ralentiza progresivamente hasta alcanzar el equilibrio, llegando al 81% a los 10 minutos y al cambio total a los 15 minutos. Tras este tiempo no se observan más cambios.

No se detectaron discrepancias de tamaño respecto a las medidas iniciales, lo que indica que las probetas correspondientes al papel C recuperaron completamente sus dimensiones tras las pruebas, sin registrar variaciones apreciables dentro del umbral de medición. Este comportamiento es coherente con el comportamiento esperable en papeles envejecidos.

Discusión

La variación dimensional observada en las tres tipologías de papel sigue patrones claros y coherentes entre sí y entre los tres tipos de papeles testados. La respuesta dimensional en el ciclo de HR ambiental a HR elevada, la variación es generalmente más rápida que a la inversa, situándose la gran mayoría del cambio dimensional entre los 10 y 15 minutos de exposición a $85 \pm 2\%$. Además, los resultados muestran una respuesta inicial más intensa de media en todos los casos, situándose la mayoría del crecimiento en los primeros 10 minutos.

En contraposición, en el ciclo opuesto, de HR elevada a HR ambiental, se ha observado que el equilibrio llega tras los 20 minutos, y presenta una variación dimensional más progresiva respecto al ciclo anterior, esto concuerda con los estudios de Lindner (2018: 9-10) y de Jarrell (1927) —citado en la tesis doctoral de Larsson (2008: 4)—. Este patrón está presente en los papeles nuevos, —A y B— mientras que en el papel envejecido —C— no se observaron diferencias significativas entre los ciclos: en ambos casos el equilibrio se alcanzó a los 15 minutos y los porcentajes de cambio dimensional se distribuyeron de forma más homogénea en el tiempo. Se produce, como es esperable, cierta histéresis que, sin embargo, en este contexto no consideramos relevante.

Por el contrario, sí que es relevante la diferencia de comportamiento entre MD y CD: Los cambios en MD son mucho más rápidos y pequeños, mientras que en CD más lentos y grandes. Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Niskanen, Kuskowski y Bronkhorst (1997: 106-109), según los cuales, la tasa de deformación tras un cambio rápido de humedad depende tanto de la orientación de las fibras como del sentido de intercambio higroscópico (absorción o desorción). En sus ensayos concluyeron que las deformaciones en CD se desarrollaron más lentamente, y no alcanzaron el equilibrio hasta los 20 minutos de exposición. En cambio, las variaciones en MD fueron más rápidas. Según estos autores esto se debe a que la relajación de las tensiones internas generadas durante el secado del papel favorece una expansión inmediata en MD —aunque su magnitud total sea menor—. De hecho, nuestras probetas reproducen un comportamiento similar al

identificado por Niskanen, Kuskowski y Bronkhorst: aunque las magnitudes de crecimiento y las características de los papeles (gramaje, composición, etc.) difieran entre sí, tienden a seguir un mismo patrón de comportamiento temporal frente a un cambio brusco en la humedad relativa ambiental.

Aunque los efectos del envejecimiento sobre la celulosa han sido ampliamente descritos en la literatura (Zervos, 2010: 3; Erhart *et al.* 1999: 501-506; Mecklenburg y Tumosa 1999: 60-64; entre otros), los resultados obtenidos en este estudio permiten observar cómo dichos procesos se traducen en los cambios dimensionales. En las muestras del papel C (cartel envejecido), las variaciones dimensionales registradas fueron bastante menores que en los papeles nuevos, y tendieron a estabilizarse en torno a los 15 minutos. Esto sugiere una pérdida significativa de la capacidad de higr expansión e higr contracción del papel.

En el contexto del debate actual sobre la sostenibilidad ambiental en museos, estos hallazgos pueden resultar interesantes. Diversos autores han defendido la posibilidad de ampliar los rangos de temperatura y humedad relativa con el fin de reducir el consumo energético sin que ello implique comprometer la integridad de las obras (Anderson *et al.* 2010; Atkinson 2014: 205-210; Lucchi 2018: 180-183; Coelho *et al.* 2020: 1-4; Padfield 1994: 1-10); No obstante, esta es una cuestión que debe valorarse de manera individual considerando la naturaleza del material, el estado de conservación, las técnicas sustentadas, el tamaño de la obra, entre muchos otros factores. El comportamiento del papel C —un papel envejecido naturalmente— respalda parcialmente esta tendencia: su menor variación dimensional sugiere que, las oscilaciones moderadas de humedad pueden no generar deformaciones apreciables. Sin embargo, obras más recientes o higroscópicas podrían presentar respuestas mucho más marcadas frente a los mismos cambios ambientales.

Si bien el objetivo de este artículo no es cuestionar si las condiciones climáticas tradicionales son o no adecuadas, sino aportar una perspectiva complementaria, los datos obtenidos permiten reflexionar sobre la rapidez con la que las obras en papel responden a los cambios de humedad ambiental. El hallazgo de que la mayor parte de la expansión o contracción ocurre en los primeros 10-15 minutos tras la exposición a un cambio de HR constituye una información relevante para la gestión preventiva. Ello sugiere que, en entornos con control ambiental estable, las fluctuaciones breves pero intensas pueden generar respuestas visibles en papeles muy higr expansivos en pocos minutos. Asimismo, si la fluctuación es breve y vuelve al estado inicial, también la obra podría revertir ese cambio de manera igualmente rápida.

Conclusiones

El presente estudio ha analizado el comportamiento dimensional de tres tipos de papel frente a cambios en la humedad relativa ambiental, observando patrones consistentes en la temporalización de las respuestas

dimensionales. En la mayoría de los casos, la mayor parte de la variación dimensional se produce durante los primeros 10-15 minutos de exposición al pasar de condiciones ambientales normales ($52 \pm 2 \%$) a elevada HR ($85 \pm 2 \%$). La respuesta dimensional producida en el ciclo contrario, de elevada HR a HR ambiental, resultó más progresiva y se produjo durante los primeros 15-20 minutos de exposición. Asimismo, la diferencia entre las direcciones de fibra resulta evidente: los cambios en dirección transversal (CD) fueron mayores y más lentos que en la dirección de fabricación (MD), reproduciendo el comportamiento anisotrópico descrito por la literatura.

Desde la perspectiva de la conservación preventiva, estos resultados aportan información útil: aun cuando las fluctuaciones se mantengan dentro de rangos permisibles, el modo en que se produce el cambio —más gradual o más brusco— puede condicionar la respuesta dimensional del papel. Cuando la variación se produce de forma rápida, dicha respuesta puede desencadenarse casi de inmediato, favoreciendo la aparición de deformaciones perceptibles, mientras que cambios más progresivos tienden a pasar desapercibidos. Este aspecto resulta especialmente relevante en obras de gran formato, en las que pequeñas variaciones dimensionales pueden traducirse con mayor facilidad en alteraciones visibles de la planimetría, como ondulaciones o arrugas. En este sentido, dado que en la práctica pueden darse oscilaciones de HR en los espacios de exposición—ya que forman parte de la realidad operativa de muchos espacios museísticos—, la rapidez de la respuesta observada sugiere que una deformación puntual no debería requerir acciones inmediatas cuando el marco ambiental se mantiene dentro de rangos aceptables, siempre que se trate de episodios aislados, y considerando que el material puede tender a recuperar su estado previo en un intervalo de tiempo reducido; no obstante, la gestión preventiva debería seguir orientada a evitar fluctuaciones innecesarias o repetidas que incrementen la probabilidad de que se produzcan distorsiones visibles persistentes o patologías a largo plazo.

La menor respuesta dimensional y la estabilización más rápida observadas en el papel envejecido, indican que la antigüedad del soporte y su estado de conservación influyen en la magnitud del cambio dimensional y en el tiempo de respuesta del material ante fluctuaciones de HR. A efectos prácticos, este resultado es relevante porque sugiere que, bajo condiciones ambientales comparables, no todas las obras en papel presentan la misma susceptibilidad a manifestar deformaciones visibles ni el mismo ritmo de estabilización. En consecuencia, al planificar la exposición y el almacenaje, resulta pertinente considerar estas diferencias para anticipar qué obras pueden mostrar respuestas más marcadas y cuáles presentan menos reactividad frente a las oscilaciones ambientales —dentro de los rangos seguros—.

Estos resultados, aunque preliminares, aportan una base cuantitativa para comprender la velocidad real de respuesta del papel frente a variaciones ambientales. En el contexto actual, donde las instituciones culturales buscan equilibrar sostenibilidad energética y conservación, los datos obtenidos

pueden contribuir a definir estrategias más realistas que minimicen riesgos sin requerir un control ambiental excesivamente estricto.

Referencias

- AENOR (1997). UNE 7522:1997. *Temperaturas de ensayo preferentes*. Madrid: Asociación Española de Normalización.
- AA.VV.(2010). "The plus/minus Dilema: The Way Forward in Environmental Guidelines", En *International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works Dialogues for the New Century Discussions on the conservation of cultural heritage in a changing world*. Milwaukee: American Institute for Conservation.
- ATKINSON, J. K. (2014). "Environmental conditions for the safeguarding of collections: A background to the current debate on the control of relative humidity and temperature", *Studies in Conservation* 59(4): 205-212. <https://doi.org/10.1179/2047058414Y.0000000141>
- BÁGUENA CLEMENTE, M. (2024). *Evaluación de las técnicas de alisado por tensión: un estudio de las variaciones dimensionales del papel*, Trabajo Fin de Máster. Universitat Politècnica de València, Valencia.
- BANIK, G. y BRÜCKLE, I. (2018). *Paper and water: a guide for conservators*. Munich: Siegl
- BENVESTITO, C. (2007). "Venice in pieces: Preservation and display of a pieced and folded woodcut", *Paper Conservator: Journal of the Institute of Paper Conservation*, 31: 51-56 <https://doi.org/10.1080/03094227.2007.9638653>
- BROCKMAN, M., MELLON, A. (2020). "Larger than Life: The Conservation Treatment of an Oversized Poster", Unframed. Los Ángeles: Los Ángeles County Museum of Art (LACMA) <https://unframed.lacma.org/2020/04/20/larger-life-conservation-treatment-oversized-poster> [consulta: 14/10/2025]
- BRANDBERG, A., MOTAMEDIAN, H. R., KULACHENKO A., HIRN, U. (2020). "The role of the fiber and the bond in the hygroexpansion and curl of thin freely dried paper sheets", *International Journal of Solids and Structures*, 193-194: 302-313. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.033>
- C.A.D PLOTTERS INK-JET (2018). *Opaco ink-jet 80-90 grs. Safety data sheet*.
- CARSON, F. T. (1944). *Effect of humidity on physical properties of paper*. Washington: Department of Commerce. United States of America.
- CAULFIELD, D. F. (1988). "Dimensional Stability of Paper: Papermaking Methods and Stabilization of Cell Walls", *Wood Science Seminar 1: Stabilization of the Wood Cell Wall*, 87-98.
- COELHO, G. B. A., ENTRADAS SILVA, H., Y HENRIQUES F. M. A. (2020). "Impact of climate change in cultural heritage: from energy consumption to artefacts' conservation and building rehabilitation", *Energy and Buildings* 224: 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110250>
- EDWARDS SMITH, N. (1992). "The Mounting and Framing of a Large Work of Art on Paper; a Case Study – Victoria and Albert Museum", *Conservation Journal*, 03: 1-6.
- ERHARDT, D., TUMOSA, C., MECKLENBURG, M. (1999). "Material consequences of the ageing of paper" En: *ICOM Committee for Conservation 12th Triennial Meeting Lyon*: 501-506
- ERHARDT, D., MECKLENBURG, M. (1995). "Accelerated vs. Natural Aging: Effect of Aging Conditions on the Aging Process of Cellulose" En: VANDIVER, J. R et al. (eds.) *Materials Issues in Art and Archaeology IV MRS Symposium Proceedings*. Pittsburg: Materials Research Society ,352: 247-270. <https://doi.org/10.1557/PROC-352-247>
- FACINI, M. S., Y EVANS, D. (2003). "Big Paper, Big Problems: Preservation Issues of Large Format Works on Paper", *The Book and Paper Group Annual* 22: 111-117
- FILTER, S. (1994). "Historic Intent: Lodovico Ughi's Topographical Map of Venice; A Large Wall Map as an Historic Document, a Work of Art, and a Material Artifact", *The Book and Paper Group Annual*, 13: 1-6
- KIELY, H. U. (1927). "The Effect of Moisture on Paper", *Joint Session of the Connecticut Valley Mill Superintendents and Printing House Craftsmen*. <https://cool.culturalheritage.org/byauth/kiely/moisture.html> [Consulta 10/10/2025]
- LARSSON, A. (2008). *Dimensional Stability of Paper. Influence of fibre-fibre joints and fibre wall oxidation*, Tesis Doctoral. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- LARSSON, P., HOC, M., WÄGBERG, L. (2009). "The influence of grammage, moisture content, fibre furnish and chemical modifications on the hygro- and hydro-expansion of paper" *Advances in Pulp and Paper Research*, 355-388. <https://doi.org/10.15376/frc.2009.1.355>.
- LINDNER, M. (2018). "Factors affecting the hygroexpansion of paper", *Journal of Materials Science*, 53:1-26. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1358-1>
- LUCCHI, E. (2018). "Review of preventive conservation in museum buildings", *Journal of Cultural Heritage*, 29: 180-193. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.003>
- MACHAČKO, L. "Problems of the conservation of artworks on large-format paper supports", *Works of Art on Parchment and Paper: Interdisciplinary Approaches*. Liubliana: Univerze v Ljubljani, 159-164. <https://doi.org/10.4312/9789610602743>
- MECKLENBURG, M., TUMOSA C. H. (1999). "Temperature and relative humidity effects on the mechanical and chemical stability of collections", *ASHRAE Journal*, 64-79.
- MORET DE LA ASUNCIÓN, A. (2020). *Impacto de los sistemas de alisado en tensión sobre el papel*, Trabajo Fin de Máster. Universitat Politècnica de València, Valencia.
- MUÑOZ VIÑAS, S. (2006). "Understanding paper flattening (I). Principles and problems of common flattening techniques", *Arché*, 1: 145-150.

MUÑOZ VIÑAS, S. (2008) "Anisotropía y creep. Recomendaciones para el alisado por presión del papel" *17th International Meeting on Heritage Conservation*, 245-247.

MUÑOZ VIÑAS, S., AMORÓS SOLERA, F. (2008). "Alteración del tamaño de las hojas en el alisado por presión" *17th International Meeting on Heritage Conservation*, 235-239.

MUÑOZ VIÑAS, S. (2009). "The impact of conservation pressure-flattening on the dimensions of machine-made paper" *Restaurator*, 30(3): 181-198. <https://doi.org/10.1515/rest.012>

NISKANEN, K., KUSKOWSKI, S.J. y BRONKHORST, C. (1997). "Dynamic hygroexpansion of paperboards", *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 12(2): 102-110.

PAPELES RASEPE (s.f). *Papel Gris Perla – Estraza. Ficha técnica: papel plisadores* [Ficha técnica] Disponible en: <https://rasepe.com/wp-content/uploads/2022/05/R-PAPEL-GRIS-PERLA-ESTRAZA-PAPEL-PLISADORES.pdf> [Consulta: 15/10/2025]

PADFIELD, T. (1994). "The role of standards and guidelines. Are they a substitute for understanding a problem or a protection against the consequences of ignorance?" *Durability and Change: The Science, Responsibility, and Cost of Sustaining Cultural Heritage*. Sussex: John Wiley and sons: 191-199

PARSA SADR, A., MARACHECHI, S., SUKER, A., BOSCO, E. (2024). "Chemo-mechanical ageing of paper: effect of acidity, moisture and micro-structural features", *Cellulose* 11: 6923-6944

PAVLOGEORGATOS, G. (2003). "Environmental parameters in museums", *Building and Environment*, 38: 1457-1462. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00113-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00113-6)

ROBERTS, J. (1996). *The chemistry of paper*. Letchworth: Royal Society of Chemistry

SUGARMAN, J. E, Y VITALE, T. J. (1992) "Observations on the drying of paper: Five drying methods and the drying process", *Journal of the American Institute for Conservation*, 31(2): 175-179.

VONK, J., GEERS, M. Y HOEFNAGELS (2020). "Full-field hygro-expansion characterization of single softwood and hardwood pulp fibers", *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 61: 61-74 <https://doi.org/10.1515/npprj-2020-0071>

ZERVOS, S. (2010). "Chapter 5. Natural and accelerated ageing of cellulose and paper: A literature review" En: *Cellulose: Structure and Properties, Derivatives and Industrial Uses*. Nueva York: Nova Science Publishers.

Autor/es



María Sobrino Estalrich

maria.s.estalrich@gmail.com

Universitat Politècnica de València

<https://orcid.org/0009-0009-9630-0350>

María Sobrino Estalrich realizó sus estudios de grado y máster en la Universitat Politècnica de Valencia (UPV) y actualmente está cursando un doctorado dentro del Programa de Doctorado en Conservación y Restauración de la misma universidad. Su investigación doctoral se enmarca en el proyecto europeo GreenArt, en el que también colabora como investigadora en la UPV. Su campo de estudio se centra en la restauración de obra gráfica y la investigación de nuevos materiales. Asimismo, ha participado en trabajos para el Taller de Obra Gráfica y Documental del Instituto de Restauración del Patrimonio de la UPV como restauradora de diferentes ocasiones.



Salvador Muñoz-Viñas

smunoz@upv.edu.es

Universitat Politècnica de València

<https://orcid.org/0000-0003-0781-2645>

Salvador Muñoz Viñas es Catedrático de conservación y restauración del papel en la Universitat Politècnica de València, y responsable del Taller de Obra Gráfica del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Su trabajo se centra en la restauración del papel y en la filosofía del patrimonio cultural. A lo largo de su carrera, ha impartido cursos sobre estos temas en numerosas entidades nacionales y extranjeras, como por ejemplo el ICCROM, el British Museum o la Sorbona, y ha trabajado como Visiting Scholar en la Universidad de Harvard en diversas ocasiones. En 2015 fue nombrado Distinguished Visiting Professor por la New York University. Sus obras sobre restauración del patrimonio han sido publicadas en español, inglés, chino, coreano, italiano y otros idiomas.

Artículo enviado 05/01/2026
Artículo aceptado el 16/02/2026



<https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1483>