

## DETERMINACIÓN DE LAS FLUCTUACIONES PERMISIBLES DE HUMEDAD RELATIVA

El factor más importante en la preservación de colecciones es el mantenimiento de condiciones ambientales apropiadas. Muchos factores ambientales, como la temperatura, la humedad relativa (HR), la luz, la contaminación y las vibraciones afectan la estabilidad de los objetos y los materiales. Este artículo es una introducción al trabajo que hemos llevado a cabo para determinar las fluctuaciones permisibles en la HR.

Hay que tener en cuenta varias consideraciones al especificar el nivel de HR en el control ambiental. La primera es el "valor establecido" de la HR - el valor que se pretende mantener. La segunda es la "fluctuación permisible" - la variación a corto plazo que será permitida. La tercera es la "variación estacional" que será permitida - el rango de valores a partir del valor establecido que será permisible dentro de las variaciones climáticas anuales causadas por las estaciones (en los países de climas templados). Si las fluctuaciones permitidas son lo suficientemente grandes, es posible, que la variación estacional se pueda situar dentro de una amplia gama de valores permisibles.

Unas consideraciones sobre las fluctuaciones permisibles de HR debe comenzar con un corto resumen de como se desarrollaron las regulaciones que están vigentes en la actualidad. Se conoce de tiempo atrás que los valores extremos de HR afectan los materiales. Las HR altas conducen al crecimiento de mohos y reblandecimiento de algunos materiales, mientras que periodos de exposición a HR bajas pueden causar fracturas y agrietamiento. Se le asignaba la responsabilidad de todos los daños causados por las condiciones ambientales en el material (tales como pintura craquelada, madera agrietada, y fallas de los adhesivos) a los cambios en HR.

Los informes acerca de este tipo de daños incrementaron a medida que los sistemas de calefacción central se hicieron más comunes. Experimentos simples en los cuales algunos tipos de daños fueron replicados sometiendo distintos materiales a grandes cambios de HR, demostraron que no eran únicamente algunos valores específicos de HR los que producían el daño, sino que los cambios en la HR podían causar daño también.

La evidencia práctica indicaba que tal daño podía ser prevenido o minimizado al mantener una HR constante y moderada. El ejemplo más famoso es el de las colecciones de la Galería Nacional de Londres. Durante la Segunda Guerra Mundial, por razones de seguridad las colecciones de la Galería Nacional fueron trasladadas a unas minas en Gales. El clima en las galerías de las minas era constante, pero la HR era demasiado alta. La HR fue ajustada calentando el aire levemente para mantener una HR entre 55 y 60 %.

Experimentos previos habían demostrado que este era el promedio de HR de la Galería Nacional, que para entonces no tenía sistema de aire acondicionado, pero tenía calefacción central, lo cual producía cambios estacionales en la HR. En cuestión de meses, los agrietamientos, las escamas, y otros problemas que habían ocurrido en la Galería Nacional desaparecieron casi por completo. Los problemas volvieron a aparecer cuando las colecciones fueron retornadas a la Galería Nacional después de la guerra. Esta experiencia fue la justificación para que posteriormente se instalara el control ambiental.

Obviamente, gran parte del beneficio de mantener una HR constante y moderada se deriva de tratar de evitar extremos dañinos de HR. También se pensaba que era beneficioso el evitar aun pequeñas fluctuaciones, porque se sabía que las fluctuaciones grandes causaban daño. Experiencias como la de la Galería, combinadas con una falta de conocimiento sobre el posible daño de pequeñas fluctuaciones en HR, llevaron a la presente tendencia de tratar de mantener una HR constante, o "mantener una línea recta" (en el termohigrógrafo). Un valor específico de HR era mantenido todo el año, reduciendo al máximo los cambios rápidos o diarios (fluctuaciones) así como los cambios durante períodos largos (estacionales). A menudo las especificaciones excedían la capacidad de los equipos o de los edificios. Esto condujo a una serie de problemas. Se hizo común la compleja ingeniería en los sistemas de calefacción, humedad y aire acondicionado (Heating, Ventilation, Air Conditioning - HVAC), a menudo haciéndose necesarios cambios drásticos en el material y la tecnología de la construcción original de estructuras históricas.

La mayoría de los edificios antiguos, y, muchos de los nuevos, sorprendentemente, no son capaces de mantener un 50 % o más de HR cuando la temperatura exterior esta muy baja, sin que se produzca condensación en los materiales del edificio. Mantener un valor específico de HR todo el año puede ser mucho más costoso que permitir el cambio por temporadas largas de acuerdo con las estaciones, o prescindir completamente del control de HR cuando el componente de aire fresco que se introduce por medio de ventilación esta dentro de la gama de valores de humedad establecidos.

En realidad, pocas instituciones logran mantener constante el valor absoluto de HR percibido como "óptimo". La mayoría permite los cambios estacionales o toleran fluctuaciones mayores de las que se podrían mantener si se tuviesen presupuestos ilimitados. Esto se hace con la aceptación tácita de que el clima no es perfecto y que alguna concesión se esta haciendo al permitir se produzca y se acumule algún daño, no importa cuan leve sea. Muchas instituciones funcionan con equipos viejos o ineficientes, esperando el día en que el presupuesto permita la instalación y el mantenimiento de un sistema capaz de llegar al "Nirvana" ambiental. Las vitrinas acondicionadas, los microclimas y otras técnicas se utilizan con gran frecuencia para mejorar situaciones ambientales que se consideran algo menos que ideales.

Obviamente, las cosas serían mucho más simples si los requisitos ambientales pudiesen ser menos rígidos sin causar daño. Esto requiere dar respuesta a dos preguntas básicas. Primero: ¿es cierto que todas las fluctuaciones de HR, no importa cuan leves, causan daño?, o ¿hay un umbral de fluctuaciones permisibles en la HR bajo el cual no se produce deterioro? Segundo: ¿si alguna fluctuación es permisible, cuál es esta? Se pueden hacer preguntas adicionales, tales como si el daño depende de el valor del cambio en HR, pero las investigaciones que pueden contestar las dos primeras preguntas deben dar la mayoría de las respuestas.

Nuestro método ha sido determinar el mecanismo de daño causado por las fluctuaciones de humedad relativa y las propiedades de los materiales involucrados en los procesos que conducen al deterioro. Muchos materiales tales como madera, goma, y pintura absorben y desabsorben agua y por consiguiente cambian de dimensión cuando la HR cambia. Si el material no esta constreñido, esta absorción y desorción es reversible dentro de un gama razonable de valores de HR, y el material simplemente se expande y contrae con los cambios en la HR. Es únicamente cuando el material esta constreñido, tanto internamente como externamente, que esta tendencia a cambiar de dimensión puede causar fuerzas y tensiones que conducen al deterioro.

Si disminuimos la HR, la madera tratará de encogerse. Si la madera está sujeta por un marco de metal rígido que le impide encogerse, se desarrollaran fuerzas de tensión. Si estas fuerzas son lo suficientemente grandes, pueden resultar en deformación permanente o fracturas. Entonces la

pregunta es: hay una gama de valores dentro de la cual un material puede ser deformado hasta un punto reversible?; y, ¿cómo se puede determinar la relación entre HR y estas fuerzas?

Figura 1

La Figura 1 muestra curvas de tensión-cambio dimensional (stress-strain curves) para un trozo de madera de *cottonwood* (madera suave, blanda que se usa en los EE.UU..) expuestos a diferentes niveles de HR.

Estos experimentos se hicieron con la tensión aplicada tangencialmente a la fibra de la madera, que es la dirección mas débil y sensible a la HR. Tales datos son representativos de muchos de los materiales que hemos probado. Aplicar tensión (fuerza, subiendo por el eje vertical) alarga la muestra (se mueve hacia la derecha en el eje horizontal). También se pueden producir cambios dimensionales al cambiar la HR solamente sin emplear ninguna fuerza. Esto implica movimiento en el eje horizontal, lo cual explica porque las curvas de tensión-cambio dimensional para distintos valores de HR empiezan en diferentes posiciones sobre el eje horizontal. Las curvas están separadas por el cambio en longitud causado por cambios de HR únicamente.

El comienzo de cada curva es lineal, y de hecho es reversible. Si nos mantenemos dentro de la sección lineal de la curva, la madera asume su forma original cuando la fuerza es retirada. Es únicamente cuando los cambios en longitud exceden ciertos valores que la madera se deforma irreversiblemente (cede) o eventualmente se quiebra. Las curvas de tensión-cambio dimensional nos permiten determinar cuanto puede ser estirada una muestra sin causar daño. Para la mayoría de materiales, este valor es de aproximadamente 0.3-0.4 % de la longitud original.

## Figura 2

¿Cómo se relacionan estas pruebas, llevadas a cabo en un ambiente de HR constante, con los efectos causados por cambios en la HR? La respuesta se ilustra en la Figura 2, que es un detalle de la Figura 1.

Considerando en el peor de los casos, que una muestra esta totalmente constreñida y que el cambio dimensional no es posible, si la HR se reduce a menos de 48 %, la muestra tenderá a encogerse, pero no podrá, y se desarrollaran tensiones. Esto es equivalente a moverse verticalmente, manteniendo la misma longitud pero con más tensión.

Si reducimos la HR a 23 %, nos encontramos en un punto de 23 % en la curva de tensión-cambio dimensional! Esto demuestra un principio fundamental que hemos encontrado valido para todos los materiales que hemos examinado. Cada punto en la curva de tensión-cambio dimensional corresponde a una HR única. En otras palabras, el camino por el cual se llega a una condición determinada no importa.

Mantener las dimensiones constantes y bajar la HR produce la misma tensión que permitir que la muestra se encoja mientras la HR baja, y después alargarla a su longitud original. Esto quiere decir que los efectos de cambios en HR pueden ser calculados por medio de una serie de pruebas de tensión-cambio dimensional llevadas a cabo en condiciones de HR constantes, bajas, pero diferentes, al contrario que tener que gastar mucho más tiempo haciendo pruebas que incluyan valores de HR fluctuantes.

La única información adicional requerida es el cambio en dimensión causado por cambios en HR, y la cantidad en que una muestra puede ser alargada reversiblemente, entonces podemos calcular la fluctuación de HR permitida.

### Figura 3

La Figura 3 es la curva isotérmica [1](#) de la absorción de humedad para cottonwood, al representar gráficamente los cambios en la longitud de la dimensión tangencial como función de la HR. Por consiguiente, la pendiente de esta curva es una medida de la sensibilidad de esta dimensión a cambios en la HR. Para una gama específica de valores de HR, mientras más plana sea la curva, más pequeña es la respuesta a los cambios en HR y más grande el cambio en HR necesario para causar daño.

#### Figura 4

La Figura 4 es una gráfica de la pendiente de la curva isotérmica, o sea la respuesta a cambios de HR. Vemos que la respuesta a cambios en HR es menor en la gama de valores moderados de HR, y mayor en los valores altos y bajos de HR. En la región media, se necesitan grandes cambios en HR para que se manifiesten presiones peligrosas. Entonces, la fluctuación permisible en HR es mayor en la gama de valores de HR entre 40 y 60 %, y menor en los valores extremos de HR. Se pueden calcular los cambios necesarios para que haya deformación irreversible, o finalmente fallas en la madera, para cada valor de HR.

## Figura 5

Esta información se ilustra en la Figura 5. Esta figura representa los valores de HR en los cuales la madera cede y se producen fallas, como función del punto de equilibrio HR, o el punto en el cual no hay tensión-cambio dimensional. En estos valores se asume que la madera está totalmente constreñida.

Por ejemplo, comenzando con 50 % de HR, se puede reducir la HR hasta aproximadamente 31 % antes de que ceda, o de que la deformación irreversible empiece a ocurrir, y a aproximadamente 13 % antes de que se quiebre. Por el contrario, la HR se puede subir a aproximadamente 68 % antes de que ceda y se deforme permanentemente al ser comprimida. La madera tratará de expandirse, pero se mantiene "comprimida" en su longitud original. La falla durante la compresión es un fenómeno más complejo que la ruptura bajo tensión, y no lo consideraremos en este trabajo. De esta manera, para el *cottonwood* en equilibrio en condiciones de 50 % HR, la fluctuación de HR permisible es de por lo menos  $\pm 18$  % HR. Hay que recordar que estos cálculos son para el peor de los casos, tangenciales a la fibra de la madera y asumiendo que la madera está constreñida por completo. Una muestra que no está constreñida podría hincharse y encogerse reversiblemente en una gama mucho más amplia de valores de HR.

Nótese que los rangos de valores permisibles son muy pequeños en condiciones de HR alta y baja. La respuesta dimensional a cambios de HR aumenta en los extremos de HR, pero el cambio dimensional reversible permisible no aumenta. Una muestra de *cottonwood* constreñida y acondicionada a las condiciones de más de 70 % de

HR al aire libre, no puede traerse a un museo a condiciones 50 % de HR sin que se produzcan daños. Estos datos también refuta la idea de que las condiciones de HR alta evitan el daño mecánico porque los materiales están más blandos y flexibles. El daño ocurre, pero de manera distinta. Los materiales a lo mejor no se quiebran, pero si ocurre deformación permanente.

Hemos hecho este tipo de medidas y cálculos para muchos otros materiales. De ahí resultan varios aspectos interesantes. La fluctuación permisible es una función de la HR en la cual el objeto ha llegado a un punto de equilibrio. La HR en la cual existe la máxima fluctuación permisible varia con el material, y las fluctuaciones permisibles pueden ser muy diferentes en distintos materiales.

Un punto importante es que todas las fluctuaciones permisibles son mayores que las que se recomiendan actualmente por lo general, aunque estos valores son extremadamente conservadores. Estos valores asumen que los materiales están totalmente constreñidos, que son expuestos durante períodos largos a extremos de HR, y que se producen cambios que están dentro de la gama de reversibilidad y elasticidad.

Estos valores son válidos para materiales específicos. Ya que los cambios dimensionales permisibles para la mayoría de los materiales caen dentro de la misma gama, los mismos límites se pueden extrapolar en forma directa a objetos compuestos de varios materiales. Mientras se mantenga la HR dentro de la gama de valores permisibles para el más sensible de los material presentes en el objeto, ninguna presión excesiva se producirá en ninguno de los materiales del objeto.

Los objetos compuestos de varios materiales pueden comportarse muchas veces como un solo material. Si todos los materiales tienen aproximadamente la misma respuesta dimensional a cambios de HR, el objeto completo se hincha y se encoge sin que se produzcan tensiones de importancia. Las excepciones, claro está, son los objetos masivos en los cuales el exterior del objeto responde a cambios de HR antes que el interior. En este caso, el interior actúa como un freno interno, y las presiones y fluctuaciones permisibles deben ser calculadas para el material como si estuviera constreñido. El rango de cambio en HR no es tan importante, mientras que no se sobrepasen las máximas presiones permisibles.



## Figura 6

Un buen ejemplo de un objeto compuesto de diferentes materiales es una pintura sobre tabla de madera. La Figura 6 representa la sensibilidad a la HR de los componentes de las capas pictóricas de una pintura sobre tabla. Los valores para cottonwood están representados únicamente en la dirección perpendicular a la fibra de la madera. La respuesta en la dirección de la fibra es tan leve que no se tiene en cuenta. La tabla de madera es tan gruesa en relación a las capas de pintura, que su cambio dimensional determinara el cambio dimensional (o la ausencia de cambio) de las capas pictóricas.

El *cottonwood* tiene una respuesta dimensional marcadamente pequeña a cambios en HR en la dirección de la fibra, o sea que actúa como un freno. La HR alta produce compresión en las capas superiores en la dirección de la fibra cuando tratan de expandirse, y la HR baja produce tensión cuando tratan de encogerse. En el sentido perpendicular a la fibra de la madera, la situación es muy diferente. En esta dirección, la sensibilidad de la madera a la HR es más o menos la misma que la de otros materiales en condiciones de HR moderada.

Los cambios en la gama de valores medianos de HR producen poca tensión, porque todas las capas responden en forma similar. Sin embargo, en condiciones de HR alta, la respuesta de la madera se incrementa en forma dramática, y la madera se expande más rápidamente que las otras capas. La madera puede estirar las otras capas de pintura a HR alta! En forma similar en condiciones de HR baja, el mayor encogimiento de la madera puede resultar en compresión de yeso y capas pictóricas. Las diferentes tensiones, presiones, y fluctuaciones de HR permisibles para objetos compuestos de varios materiales pueden ser calculadas directamente de datos como los que aquí presentamos.

El daño mecánico debido a cambios en HR no es el único factor que debe tenerse en cuenta en la decisión de cuales son las condiciones ambientales apropiadas. Estamos

actualmente en el proceso de investigar en forma similar, cuales son los efectos de la temperatura. Otros factores, tales como la reactividad química, los procesos de corrosión, sales higroscópicas, etc., también juegan su papel. Estas observaciones fueron el tema de una ponencia presentada en el reciente congreso de IIC en Ottawa. [2](#)

El hecho de que la mayoría de los objetos en los museos puedan tolerar sin daño mecánico fluctuaciones mayores de las que se tenían como regla anteriormente, no es un excusa para abandonar el control ambiental. Por el contrario, siempre habrá algunos materiales y objetos que requieran condiciones diferentes o más estrictas que la colección general de la institución. Enfoques tales como el uso de microclimas y vitrinas acondicionadas, son apropiados para tales excepciones. Si acaso, la adopción de fluctuaciones de HR permisible menos rígidas para el ambiente general va a requerir un plan mas cuidadoso y mayor conocimiento de los materiales, la historia, y las necesidades de las colecciones.

Este trabajo es uno de los resultados de varios proyectos colaborativos de investigación sobre las condiciones ambientales del museo que están llevando a cabo los autores en el Laboratorio Analítico de Conservación de la Institución Smithsonian.

[David Erhardt](#) hace investigaciones sobre los efectos de condiciones ambientales en procesos de degradación química;

[Marion F. Mercklenburg](#) se especializa en mecánicas estructurales;

[Charles S. Tumosa](#) en propiedades de los materiales; y

[Mark McCormick-Goodhart](#) en condiciones ambientales para el almacenamiento de materiales fotográficos.

Dirija sus preguntas o comentarios sobre este trabajo, a los autores, a la siguiente dirección:

CAL/MSC, MRC 534  
Smithsonian Institution  
Washington, DC 20560, USA

Tel: (301) 238-3700, FAX: (301) 238-3709, e-mail: [wde@cal.si.edu](mailto:wde@cal.si.edu)  
-----

**Notas:**

1 La curva isotérmica es la expresión gráfica de la absorción de humedad medida a una temperatura constante. [ [Vuelve al texto](#) ]

2 Erhardt, David y Marion F. Mecklenburg. "Relative Humidity Reconsidered" . Preventive Conservation: Practice, Theory, and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress. 12-16 September 1994. The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, pp. 32-38. [ [Vuelve al texto](#) ]

[David Erhardt](#), [Marion F. Mercklenburg](#), [Charles S. Tumosa](#), y [Mark McCormick-Goodhart](#).

**Traducción:** [Isabel García Fernández](#) y miembros del grupo APOYO

[ Volver [INDICE GENERAL](#) ]