

adaptación cromática – chromatic adaptation

Authored by
memjavad

November 15, 2025

RECOMMENDED CITATION

memjavad (2025). *adaptación cromática – chromatic adaptation*. Spanish Psychological Databases. Retrieved from <https://spanish.arabpsychology.com/?p=4552>

Adaptación Cromática

Primary Disciplinary Field(s): Percepción Visual, [Colorimetría](#), Neurociencia, Procesamiento de Imágenes.

1. Definición Central y Mecanismos Fisiológicos

La adaptación cromática, un fenómeno fundamental en la [percepción visual](#) humana, se define como el proceso mediante el cual el sistema visual ajusta su sensibilidad a la iluminación predominante, o iluminante, de una escena. Este mecanismo homeostático es crucial para mantener la constancia del color, permitiendo que un objeto sea percibido con un color relativamente inmutable a pesar de los cambios significativos en la distribución espectral de la luz que lo ilumina. Fisiológicamente, la adaptación cromática implica ajustes a múltiples niveles, comenzando en la retina con la modificación de las ganancias de los tres tipos de fotorreceptores (L, M y S), responsables de la visión en condiciones fotópicas. Este ajuste de ganancia no es simplemente una atenuación general, sino una calibración específica que busca compensar el sesgo de color introducido por el iluminante, por ejemplo, atenuando la respuesta de los conos de onda larga (L) bajo una luz amarillenta intensa, o incrementando la sensibilidad de los conos de onda corta (S) bajo un iluminante azulado, asegurando así que el punto blanco (o un gris neutro) se perciba como neutro independientemente de su composición espectral real.

Este proceso de adaptación es inherentemente complejo y opera con una latencia mínima, aunque su culminación completa puede tomar varios minutos, dependiendo de la magnitud del cambio en el iluminante. El objetivo primario de la adaptación cromática es preservar la relación entre las reflectancias superficiales de los objetos y las respuestas neuronales subsiguientes. Si el sistema visual no se adaptara, la simple transición de luz solar directa a luz incandescente (mucho más roja) haría que todos los objetos blancos o grises parecieran fuertemente anaranjados, una distorsión que la experiencia cotidiana desmiente gracias a la eficacia de este mecanismo. La capacidad de adaptación es, por lo tanto, una manifestación de la **plasticidad del sistema visual**, esencial para la interpretación coherente del entorno físico en condiciones luminosas dinámicas y variables, permitiendo la estabilidad perceptiva necesaria para la navegación y el reconocimiento de objetos.

Es fundamental distinguir la adaptación cromática de otros fenómenos relacionados, como el contraste simultáneo o la asimilación del color. Mientras que estos últimos se refieren a las interacciones locales entre colores adyacentes en el campo visual, la adaptación cromática es un mecanismo global que calibra todo el sistema visual basándose en la cromaticidad promedio de la escena o, más precisamente, en el iluminante inferido. La eficacia de esta adaptación se mide típicamente por la precisión con la que el sistema visual logra mantener la constancia perceptiva del color, un logro que, aunque no es perfecto en todas las circunstancias, es notablemente

robusto en la mayoría de los escenarios naturales y artificiales. La investigación contemporánea sugiere que la adaptación no es un proceso puramente periférico, sino que involucra una compleja interacción entre la ganancia retiniana y los procesos de inferencia cortical.

2. Desarrollo Histórico y Modelos Teóricos Fundamentales

El entendimiento formal de la adaptación cromática tiene sus raíces en los estudios del siglo XIX sobre la visión del color y la [psicofísica](#). Científicos como Hermann von Helmholtz y James Clerk Maxwell ya exploraron la idea de que la sensibilidad de los receptores no era fija, sino que se ajustaba al ambiente luminoso. Sin embargo, el primer modelo matemático influyente que intentó describir y predecir este fenómeno fue la **hipótesis de von Kries**, propuesta a finales del siglo XIX. Esta hipótesis postula que la adaptación ocurre independientemente en cada uno de los tres tipos de conos, y que el efecto de la adaptación puede ser modelado multiplicando las respuestas de los conos (L, M, S) por factores de ganancia específicos. Este concepto, conocido como la transformación de von Kries, es la piedra angular de muchos modelos colorimétricos modernos, a pesar de su simplicidad inherente y las limitaciones que presenta ante datos experimentales complejos, especialmente bajo iluminantes extremos.

La transformación de von Kries, matemáticamente simple, asume que la adaptación se logra ajustando la ganancia de los canales de respuesta de los conos de manera que el iluminante adaptado (el punto blanco) produzca la misma respuesta en los conos que produciría un iluminante de referencia no adaptado. No obstante, la investigación posterior, especialmente en la segunda mitad del siglo XX, demostró que la adaptación es más compleja que una simple ganancia lineal en la retina. Modelos más sofisticados, como el modelo CIECAM02 (Color Appearance Model), han incorporado mecanismos adicionales que intentan simular la adaptación incompleta, los efectos de la luminancia, y las transformaciones que ocurren después de la etapa retiniana, en las etapas corticales del procesamiento visual. Estos modelos avanzados reconocen que la adaptación no es puramente retínica, sino que involucra procesos neuronales centrales que influyen en la percepción final del color, mejorando la concordancia con la experiencia humana.

Un hito crucial en el desarrollo teórico fue la introducción de la idea de la "adaptación al punto blanco" (White Point Adaptation). Aunque la adaptación cromática es más amplia, el ajuste del punto blanco es su manifestación más evidente y práctica. Modelos como el CAT02 (Chromatic Adaptation Transform 2) dentro del marco CIECAM02, buscan refinar la transformación de von Kries mediante la incorporación de matrices de transformación lineal que trasladan las respuestas triestímulo (XYZ) de un espacio de color a otro, imitando con mayor fidelidad la adaptación observada empíricamente. La continua evolución de estos modelos refleja la dificultad de encapsular un proceso biológico tan dinámico en ecuaciones matemáticas estáticas, y la necesidad de equilibrios entre precisión y complejidad computacional para aplicaciones prácticas como la gestión del color en la industria de la impresión y la visualización digital.

3. Características Clave y Dependencia del Entorno

Una característica definitoria de la adaptación cromática es su naturaleza de **compensación incompleta**. Aunque el sistema visual es notablemente efectivo, rara vez logra una constancia del color perfecta. Si se compara un objeto bajo una luz diurna estándar con el mismo objeto bajo una luz de tungsteno muy cálida, un observador adaptado a la luz de tungsteno todavía percibirá el objeto como ligeramente más cálido de lo que lo haría bajo luz diurna, aunque la desviación es mucho menor de lo que predeciría una ausencia total de adaptación. Esta incompletitud sugiere que el sistema visual mantiene una cierta conciencia del iluminante real, lo que podría ser ventajoso para tareas de discriminación fina o para la detección de cambios sutiles en la fuente luminosa.

Otra característica esencial es la **dependencia del campo visual** y del contexto. La adaptación no se basa únicamente en la luz que entra al ojo en un punto específico, sino que se ve fuertemente influenciada por la distribución espacial y temporal de los colores circundantes. El sistema visual utiliza el promedio de la cromaticidad de la escena (la "media espacial") o, alternativamente, el color más brillante o más blanco percibido en la escena (la "media brillante") como estimadores del iluminante. Esta dependencia contextual explica por qué una pequeña fuente de luz coloreada en una habitación grande y neutra puede no causar una adaptación significativa, mientras que si toda la habitación está bañada en esa luz, la adaptación será casi completa. La inferencia del iluminante es un proceso activo y bayesiano que utiliza la información global del entorno para establecer el punto de referencia blanco.

Finalmente, la adaptación cromática exhibe una **velocidad variable**, lo que implica una arquitectura multietapa. La adaptación rápida, que ocurre en milisegundos, se atribuye a los mecanismos neuronales de ajuste de ganancia en la retina y se cree que es responsable de la estabilización inmediata de la imagen. Sin embargo, la adaptación lenta, que puede tomar varios minutos, se asocia con cambios fotoquímicos en los pigmentos visuales o con procesos centrales de alto nivel, incluyendo la habituación cortical. Esta dualidad temporal subraya la complejidad del fenómeno: los ajustes inmediatos permiten la función visual continua durante transiciones de luz abruptas, mientras que los ajustes graduales optimizan la sensibilidad para una iluminación ambiental constante y prolongada, asegurando la máxima discriminación de matices bajo condiciones estables.

4. Mecanismos de Ajuste de Ganancia y Espacios de Color

El mecanismo fisiológico más aceptado para la adaptación cromática a nivel retiniano se basa en la Teoría de la [Sensibilidad Espectral](#) de los Conos. Cuando el ojo se expone a un iluminante que favorece una región espectral (por ejemplo, luz azul), los pigmentos de los conos S se fatigan parcialmente o, más precisamente, su ganancia neural se reduce en proporción al estímulo. Esta

reducción de ganancia funciona como un filtro inverso, contrarrestando el exceso de estímulo y evitando la saturación del sistema. La implementación matemática de este proceso en colorimetría requiere la transformación de las coordenadas triestímulo (como XYZ o RGB) a un espacio de respuesta de conos (LMS). La elección de la matriz de transformación para pasar de XYZ a LMS es crucial y define la calidad predictiva del modelo de adaptación; modelos como el CAT02 utilizan matrices específicas que han sido ajustadas empíricamente para reflejar mejor las sensibilidades espectrales reales de los conos, conocidas como las funciones de coincidencia de color fundamentales.

La aplicación de la transformación de von Kries en el espacio LMS se realiza mediante una matriz diagonal. Si \mathbf{R}_{LMS} es la respuesta de los conos bajo el iluminante de referencia y \mathbf{T}_{LMS} es la respuesta bajo el iluminante de prueba, la adaptación se modela encontrando una matriz diagonal \mathbf{D} tal que $\mathbf{T}_{LMS} \approx \mathbf{D} \mathbf{R}_{LMS}$. Los elementos de la diagonal de \mathbf{D} son los factores de ganancia independientes para L, M y S. La limitación intrínseca de von Kries es que solo puede modelar la adaptación si los ejes de adaptación son idénticos a los ejes de los fotorreceptores. Investigaciones posteriores han sugerido que los ejes de adaptación pueden estar rotados con respecto a los ejes LMS puros, lo que llevó al desarrollo de modelos que utilizan transformaciones lineales previas (como la transformación de Bradford) para alinear mejor los ejes de respuesta con los ejes perceptuales o neurales reales, mejorando la precisión predictiva.

El éxito de estos modelos reside en su capacidad para predecir las coordenadas de color percibido (colorimetría de apariencia) después de la adaptación. Un espacio de color de apariencia, como CIELAB o, más avanzado, CIECAM02, utiliza la transformación de adaptación cromática como un paso esencial para lograr la uniformidad perceptiva. Sin este paso, las coordenadas de color derivadas de la medición física del estímulo serían inútiles para predecir cómo se vería el color bajo diferentes condiciones de iluminación. Por lo tanto, la adaptación cromática no es solo un fenómeno biológico, sino un requisito metodológico fundamental en la ciencia del color aplicada, permitiendo la **estandarización** de la comunicación del color a través de diferentes medios y observadores.

5. Influencia de los Estímulos Cromáticos y Luminancia

La adaptación cromática no es un proceso que opere de forma aislada, sino que está íntimamente ligada a la luminancia y el contraste general de la escena. La intensidad del iluminante afecta directamente el nivel de adaptación. En condiciones de baja luminancia (visión escotópica o mesópica), la adaptación cromática se vuelve menos relevante o inexistente, ya que la visión depende principalmente de los bastones, que carecen de sensibilidad al color. Bajo condiciones fotópicas, la adaptación es más pronunciada y se modula por la luminancia promedio: un iluminante muy brillante provoca una adaptación más rápida y potencialmente más completa que

un iluminante tenue del mismo color.

El color del estímulo adaptativo, a menudo representado por su temperatura de color correlacionada (TCC), es el factor determinante primario. Los iluminantes con alta TCC (luces frías, azuladas) provocan una reducción en la sensibilidad de los conos S y un aumento relativo en los conos L y M. Por el contrario, los iluminantes de baja TCC (luces cálidas, rojizas) reducen la ganancia de los conos L. Esta respuesta diferencial de los canales de color es lo que permite al sistema visual reajustar su "punto blanco" de referencia. Es importante destacar que el sistema visual es extremadamente sensible a los cambios en el componente azul-amarillo del iluminante, lo que se atribuye a la alta variabilidad espectral que presentan los iluminantes naturales (luz diurna, atardecer) en este eje.

Además de la luminancia y la cromaticidad del iluminante, el tamaño del campo visual adaptativo también influye en la magnitud de la adaptación. Los experimentos han demostrado que la adaptación es más eficaz cuando el campo de prueba ocupa una gran parte del campo visual, lo que refuerza la idea de que la adaptación cromática es un mecanismo global que busca el equilibrio homeostático de la retina. Cuando los estímulos coloreados son muy pequeños o están confinados a la periferia, la adaptación puede ser parcial o nula, dependiendo más de los mecanismos de contraste local. Esta interacción entre adaptación global y contraste local es lo que hace que la modelización de la apariencia del color sea un desafío continuo.

6. Aplicaciones Prácticas en Ciencia y Tecnología

La comprensión y modelización precisa de la adaptación cromática son indispensables en diversas disciplinas tecnológicas y científicas. En la industria de la imagen digital y la fotografía, la adaptación cromática es la base del "**balance de blancos**" (white balancing). Cuando una cámara digital captura una escena, el sensor registra las intensidades de luz sin compensación. El software de procesamiento posterior aplica un algoritmo de adaptación cromática (típicamente una variación de von Kries) para ajustar los canales RGB, asegurando que los objetos blancos en la escena se representen como blancos neutros en la imagen final, independientemente de si la escena fue iluminada por luz fluorescente, flash o luz solar. Esta corrección es fundamental para la fidelidad del color y la estética de la imagen, permitiendo que la foto digital imite la constancia de color experimentada por el observador humano.

En el campo de la [colorimetría](#) y la gestión del color, la adaptación cromática es esencial para la conversión de colores entre diferentes dispositivos (monitores, impresoras, proyectores). Dado que cada dispositivo opera bajo un iluminante de referencia diferente (su propio punto blanco), es necesario aplicar una transformación de adaptación para predecir cómo se verá un color en el dispositivo de destino. Los sistemas de gestión del color utilizan modelos CAT (Chromatic Adaptation Transforms) estandarizados, como CAT02, para garantizar que el color percibido en

una pantalla se correlacione lo más estrechamente posible con el color percibido en una impresión, logrando así la **concordancia de apariencia** entre medios. Este proceso es vital para el intercambio de datos de color en flujos de trabajo profesionales, como el diseño gráfico y la producción cinematográfica.

Además, la adaptación cromática juega un papel crucial en la iluminación arquitectónica y el diseño de entornos. Al seleccionar fuentes de luz con diferentes temperaturas de color, los diseñadores deben considerar cómo el sistema visual del ocupante se adaptará al nuevo iluminante. Por ejemplo, en museos o tiendas minoristas, la elección de una iluminación que minimice la adaptación incompleta puede ser crucial para resaltar los colores verdaderos de las obras de arte o los productos. Asimismo, la investigación sobre la adaptación es relevante en el desarrollo de pantallas de visualización avanzada, especialmente aquellas que ajustan dinámicamente su punto blanco para imitar la adaptación natural del ojo (tecnologías como True Tone de Apple), mejorando la comodidad visual, reduciendo la fatiga ocular y optimizando la precisión del color en entornos cambiantes, desde interiores con luz artificial hasta exteriores soleados.

7. Críticas y Limitaciones de los Modelos Actuales

A pesar del éxito de modelos como CIECAM02 y sus transformaciones asociadas, la adaptación cromática sigue siendo un área de intensa investigación debido a las limitaciones inherentes de los modelos actuales. Una crítica principal es que la mayoría de los modelos asumen que la adaptación es puramente "cromática", es decir, que solo afecta al croma (saturación y tono) y no a la luminancia. Sin embargo, la evidencia experimental sugiere que la adaptación al iluminante también influye en la percepción de la claridad (brillo), un fenómeno que a menudo se ignora o se modela de forma simplificada en las ecuaciones estándar. Esto lleva a errores de predicción, particularmente cuando se comparan colores bajo iluminantes de muy diferente luminancia total.

Otra limitación significativa es la incapacidad de los modelos de von Kries y sus derivados para manejar con precisión la adaptación en condiciones de alto contraste o campos visuales complejos. Estos modelos se centran típicamente en la adaptación global al iluminante promedio. En escenarios donde la iluminación es no uniforme (por ejemplo, sombras fuertes o múltiples fuentes de luz), la adaptación se vuelve local y heterogénea, un fenómeno que los modelos basados en matrices globales no pueden capturar adecuadamente. La investigación actual se dirige hacia modelos de **adaptación espacialmente variables** que intentan simular la interacción retiniana y cortical más allá de la simple compensación del punto blanco, abordando la complejidad del procesamiento visual del color en entornos tridimensionales.

Finalmente, existe un debate continuo sobre la universalidad de las transformaciones de adaptación. Si bien los modelos estandarizados se basan en datos de observadores promedio, la

adaptación cromática puede variar significativamente entre individuos debido a diferencias en los pigmentos maculares, la densidad de los fotorreceptores o el procesamiento neural central. Además, los modelos actuales a menudo fallan en predecir la adaptación completa cuando el iluminante de prueba está muy alejado del iluminante de referencia (por ejemplo, luz monocromática o fuentes de luz con espectros muy inusuales), lo que indica que la linealidad asumida en el espacio LMS puede romperse bajo condiciones extremas. Estas deficiencias impulsan el desarrollo de la próxima generación de modelos de apariencia de color, buscando una mayor precisión biológica y predictiva.

8. Lecturas Adicionales

[Adaptación Cromática \(Wikipedia en Español\)](#)

[CIECAM02 y CAT02: Modelos de Apariencia de Color \(OSA Publishing\)](#)

[Especificaciones del Consorcio Internacional del Color \(ICC\) sobre Conversión de Espacios de Color](#)