

COLORES

AGUSTIN RELA

Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales
Universidad de Buenos Aires

RESUMEN

Referencias a la descomposición de la luz blanca a través del prisma de Newton, el arco iris, los catálogos de infinitas pinturas y los colores primarios de la industria gráfica y de la TV.

EL ARCO IRIS

¿ Cuántos colores tiene el arco iris? ¿ Son siete, según lo establece la tradición (rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil y violetado)? ¿ O son sólo seis? ¿ No hay en realidad infinitos colores? ¿ Están presentes todos los colores? ¿ y dónde está el marrón? ¿ Hay por lo menos algún color puro? ¿ Qué es un color puro? ¿ Qué es un color? ¿ Qué son los colores espectrales, los primarios y los secundarios?

Lo que sí podemos afirmar sin lugar a dudas, es que el arco iris presenta colores, y siempre los mismos. Sin embargo, y a pesar de que un examen poco detenido puede hacernos pensar que se trata de los mismos colores que los que se logran con el prisma, en realidad no lo son: los colores del prisma, si la rendija por la que pasa la luz blanca es muy delgada, son colores monocromáticos, esto es compuestos por radiación de una única frecuencia, o un rango muy estrecho de frecuencias. El arco iris en cambio da lugar a colores resultantes de una superposición de variadas frecuencias, de modo semejante aunque no idéntico al que ocurriría con el prisma si se amplía el tamaño de la rendija: Cada punto del espectro sería incidido por luz proveniente de diferentes lugares de la rendija, y así resultaría una combinación continua de colores puros, que conforman un color compuesto.

DEFINICION DE COLOR

Hay que hacer, desde un principio, la distinción entre el color de un objeto y el color de un haz de luz. Imaginemos un objeto cualquiera, por ejemplo una hoja de papel blanco. Si se hacen incidir sobre ella radiaciones de diferente frecuencia, siempre puras, podrá comprobarse experimentalmente que el objeto blanco devuelve por reflexión casi íntegramente la radiación recibida, para todas las frecuencias empleadas. En el caso ideal extremo, el gráfico reflexión versus frecuencia (o longitud de onda = velocidad/frec.) será una recta horizontal ubicada en el ciento por ciento. Si se tratase de un objeto perfectamente negro, el gráfico de su reflectancia en función de la longitud de onda sería también una recta horizontal, pero esta vez en el cero por ciento. Un cuerpo gris de tono medio dará una recta ubicada en el 50 %. Rectas a diferentes alturas representan diferentes intensidades de gris. El resto de las curvas posibles con dominio en la longitud de onda y rango entre el cero y el ciento por ciento corresponderán a todos los colores imaginables, siempre que exceptuemos a los colores fluorescentes, que son los de los carteles de descuento de las farmacias, que tienen la propiedad de recibir radiación en una frecuencia y devolverla en otra frecuencia diferente, y esto no puede representarse en un gráfico de dos dimensiones. También hacemos abstracción de esos colores metalizados de las ilustraciones de algunas revistas, que poseen esa apariencia por la direccionalidad de la reflexión.

Notemos que esta definición de color pintado (o impreso) es independiente de cualquier co

sideración sobre la naturaleza de la luz blanca, o del verdadero espectro de la luz solar o artificial.

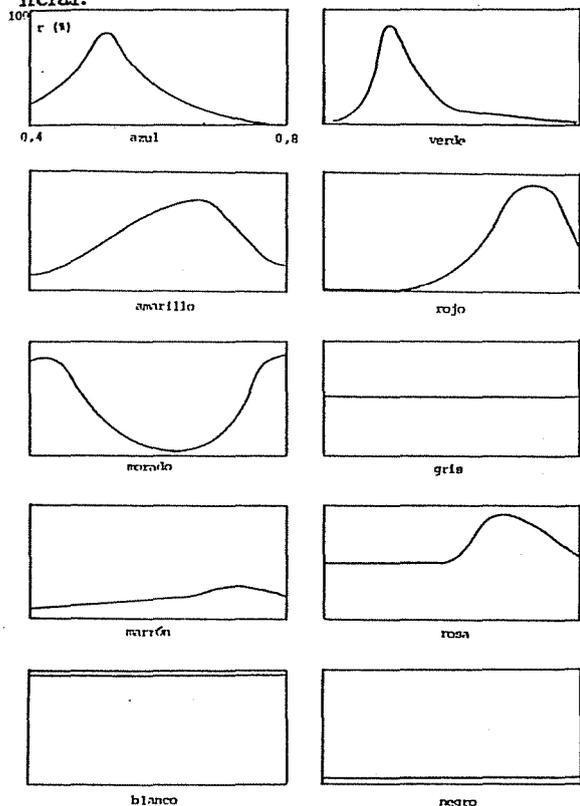


Figura 1: Espectro de reflectancia o transmitancia de algunos colores de nombre muy conocido. Se representa la intensidad de luz transmitida en el caso de filtros, o reflejada en el caso de tintas, en función de la frecuencia de la luz incidente expresada en unidades de 10^{15} Hz.

Pero no sólo se pueden definir los colores de objetos pasivos, sino también los colores de haces de luz. Podemos extender la definición dada para los colores pasivos, y así llamar luz blanca a aquella cuyo espectro consiste en una recta en el 100 %. El inconveniente de esta definición es que llamaríamos luz blanca a una luz que en realidad se nos aparecería como violácea. Esto sucede porque el espectro de la luz solar tiene forma de campana, y no es plano. Es necesario utilizar entonces otra definición, o bien ampliar la anterior de una manera diferente, que es lo que haremos: Del mismo modo en que definimos los colores de cuerpos que reflejan la luz en forma selectiva, podemos definir los colores pasivos de filtros

coloreados. Ahora sí, llamamos, por ejemplo, luz blanca a la luz que pasa a través de un filtro de transparencia 100 % para todas las longitudes de onda, cuando del otro lado se pone una fuente cuyo espectro es igual al de la luz solar, y así para todos los colores de nombre conocido. La figura 1 muestra el espectro (de reflexión o de transmisión, según se trate de paletas o filtros) de algunos colores de nombre conocido.

¿ HAY TANTOS COLORES?

Según lo visto, parecería que para cada curva que pueda imaginarse, habría un color diferente. Pero lo que realmente sucede es que muchas curvas diferentes dan lugar a exactamente el mismo color, interpretando ahora por este término a la sensación subjetiva. Ningún sujeto humano distinguirá entre los dos espectros de la figura 2, y dirá ante ambos cartones o filtros: "amarillo".

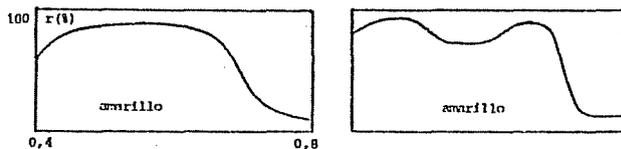


Figura 2: El ojo no es analítico con respecto a las longitudes de onda. Como sólo posee tres grupos de células sensibles al color, mientras éstas estén igualmente excitadas, darán lugar a la misma sensación, y no serán discernidos diferentes espectros.

Esto ocurre porque el ojo, a diferencia del oído, no es analítico respecto de las frecuencias, sino que se basa en una combinación de tres filtros en la mayoría de los sujetos. En consecuencia, un observador, cuando percibe dos colores diferentes, es porque percibe diferencia de intensidad luminosa por lo menos en una de las tres componentes. Es curioso observar cómo dos colores aparentemente idénticos resultan muy diferentes cuando se los examina a través de un filtro de espectro suficientemente estrecho. ¡El filtro "ve" lo que no ve el ojo!

LA CLASIFICACION DE LOS COLORES HUMANOS

Mediante experimentos en los que el sujeto clasifica objetos del mismo color subjetivo de acuerdo a su brillantez, puede encontrarse que los humanos poseemos generalmente tres filtros (son en realidad tres tipos diferentes de células visuales sensibles a colores específicos), correspondientes al azul, verde y rojo. Otros animales tienen cuatro, y otros tres, dos y uno, según la especie y su hábitat. Como es natural, no todos los sujetos poseen exactamente la misma sensibilidad espectral en cada uno de sus filtros, y colores que parecen idénticos a un sujeto, pueden no parecerlo a otro. Pero pueden establecerse tres filtros promedio, y esto simplifica en enorme grado la clasificación de colores, pues cada uno de ellos puede reducirse a sólo tres números. Por ejemplo, el azul sería $(1,0,0)$; el rojo: $(0,0,1)$; blanco: $(1,1,1)$; negro: $(0,0,0)$; amarillo: $(0,1,1)$; gris $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$, marrón: $(0,2 ; 0,4 ; 0,4)$, etc.

Dos curvas espectrales de reflectancia corresponderán a colores objetivos complementarios, si sumadas punto a punto dan la curva del blanco. De modo análogo, el color subjetivo complementario del (x, y, z) será el color $((1-z), (1-y), (1-x))$.

La totalidad de los colores subjetivos puede clasificarse entonces en un espacio de tres dimensiones, por ejemplo un cubo de arista unitaria (ver figura 3). Los tres ejes coordenados permiten representar por un punto a cada color de componentes x, y y z . El origen de coordenadas es el negro, el vértice opuesto es el blanco, hay además tres vértices que son el rojo, verde y azul; y los otros tres vértices representan los colores $(0,1,1)$; $(1,0,1)$ y $(1,1,0)$, que son el amarillo (verde más rojo), el magenta (azul más rojo) y cian (verde más azul). El centro del cubo es el gris, y un par cualquiera de colores complementarios estará representado por dos puntos dispuestos a igual distancia del centro, y alineados con éste.

¿¿COMO PUEDE SER??

Esta descripción, que es familiar a los técnicos en artes gráficas y visuales, choca por lo general con nuestra pequeña cultura cromá-

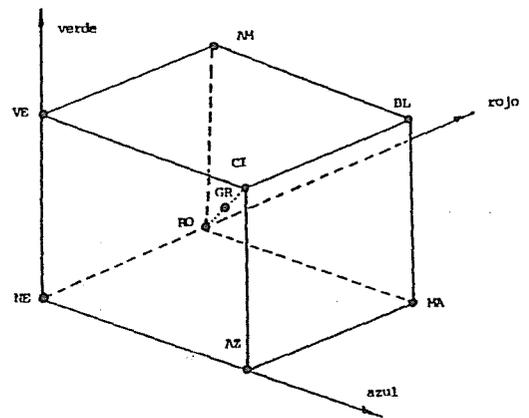


Figura 3: Todos los colores subjetivos son clasificables en un cubo de arista unitaria. Las abreviaturas representan los colores blanco, negro, gris, rojo, verde, azul, magenta, amarillo y cian. Los puntos simétricos respecto del centro del cubo, representan colores complementarios.

tica. Siempre nos han dicho que los colores primarios son el rojo, azul y amarillo, y que verde más rojo da marrón y no amarillo, y que azul y rojo no es magenta sino violeta oscuro, y azul más verde da turquesa, como infinidad de veces lo comprobamos con nuestras témperas y lápices de colores. Es que, por una parte, es necesario distinguir entre la adición de luces y la adición de tintas. En el primer caso, ambas curvas espectrales se suman para dar lugar al color resultante. En el segundo, ambas curvas se multiplican punto a punto. En una pantalla de TV de color se añade una luz de un color a otra de color diferente, mientras que en una impresión se superponen dos filtros (las tintas), cada uno de los cuales absorbe o destruye parte de la luz que refleja totalmente el papel blanco que sirve de fondo. Pero aún teniendo en cuenta esta diferencia, y aceptando que los primarios de proyección son el azul, verde y rojo, los primarios de impresión resultan ser sus complementarios: amarillo, magenta y cian, y no el amarillo, rojo y azul, que sólo se aproximan. Para comprobarlo tomemos una lupa o pequeño microscopio y examinemos diferentes zonas de una ilustración de semanario. En zonas próximas al blanco, o de colores muy claros se podrán apreciar distintamente los

tres colores primarios. En zonas más oscuras aparecen manchas superpuestas y la observación se torna difícil.

El color amarillo es bien conocido; el magenta es una especie de rosa muy intenso, semejante al de la flor de la planta Santa Rita; el cian es un celeste intenso, algo verdoso. Si en una impresión se utilizan otras tintas, la fidelidad cromática del resultado es defectuosa, o al menos, será defectuosa para los seres humanos.

ESCALA DE VALORES

Para la conversión a blanco y negro, en TV se suele atribuir el valor 1 al color primario azul, el 2 al rojo y el 4 al verde. Combinando estas cifras, pueden obtenerse números del cero al 7, según la siguiente escala:

0	negro
1 azul	azul
2 rojo	rojo
3 rojo y azul	magenta
4 verde	verde
5 verde y azul	cian
6 verde y rojo	amarillo
7 verde, rojo y azul	blanco

Estos colores aparecen ordenados en la placa de señal de la emisora, y con la ayuda de una lupa podemos comprobar esta ley de composición. Tornando a extrema izquierda el control de crominancia, las 8 bandas de color se transforman en bandas de grises ordenados desde el negro hasta el blanco, pasando por tonos intermedios progresivos.

LOS CATALOGOS DE PINTURAS

Todos hemos visto alguna vez un catálogo de pinturas, en el que los colores aparecen agrupados por semejanza, y si tuvimos la suerte de poseer un juego de gran cantidad de lápices de colores, nos habremos encontrado sin duda ante el problema de cómo ordenarlos en hilera. Por supuesto, al anaranjado va junto al amarillo, pero si hay dos amarillos, uno claro y otro oscuro, ¿dónde ponemos el claro, junto al anaranjado, o para el lado del verde? El ordenamiento lineal resulta imposible, e incluso también lo es el ordenamiento bidimensional.

La única forma continua de ordenar todos los colores es usar un espacio de tres dimensiones.

Un catálogo de todos los colores imaginables tendrá la forma de un libro de infinitas páginas, cada una de ellas dividida en cuadrillos infinitesimales. Si alguien marca en el catálogo los colores del prisma de Newton, o colores espectrales puros o monocromáticos, marcará un punto en cada página (o quizás un número finito de puntos). Cerrado el libro, quedará formada una curva que atraviesa las páginas. Lo mismo ocurre si ordenamos los colores del arco iris o los de las pompas de jabón, o los de los anillos de Newton: todos esos casos corresponden a familias de infinitos colores, ya no puros, pero que son ordenables en función de un único parámetro numérico: en el caso del arco iris, ese parámetro podría ser el radio angular de la posición que le corresponde en el arco; en el caso de los anillos de Newton o el de las pompas de jabón, el parámetro de ordenamiento puede estar dado por el espesor de la lámina, o por la diferencia de camino óptico en unidades de longitud. Los infinitos colores que corresponden a estos casos resultan así ordenables en un espacio de una sola dimensión (la curva que atraviesa las páginas), por eso podríamos afirmar que el arco iris tiene infinitos colores, pero "menos" que los infinitos colores imaginables.

CONVERTIR UN CUBO EN UNA LINEA

El razonamiento anterior parece fallar al considerar que todos los puntos de un cubo pueden ordenarse sobre una de sus aristas, mediante una correspondencia biunívoca. Efectivamente, tomemos un punto cualquiera del cubo (x, y, z) . Cada uno de los números de esa terna puede representarse en forma decimal, con cero, coma, y un número infinito de cifras decimales. Ahora construyamos un cuarto número real usando a esos tres. El procedimiento para construirlo es escribir cero, coma, la primera cifra decimal de x , la primera de y , la primera de z , la segunda de x , la segunda de y , la segunda de z , la tercera de x , ...etc. Es como si barajáramos los tres números, pero ordenadamente. El cuarto número así construido se puede representar en un segmento unitario; y viceversa, "desmezclando"

cifras.

Entonces: ¿Cómo es eso de que los colores del arco iris son ordenables en un espacio de una dimensión, mientras que todos los colores imaginables son ordenables en un espacio de tres dimensiones? ¡Acabamos de ver que estos últimos también son ordenables en una sola dimensión! La solución de esta aparente paradoja está dada por la continuidad de la clasificación. La transformación de R3 en R1 recientemente descrita rompe la continuidad que había en R3. Si imponemos continuidad, esto es: que los colores parecidos estén próximos, entonces la transformación no es posible.

TEMAS SUELTOS

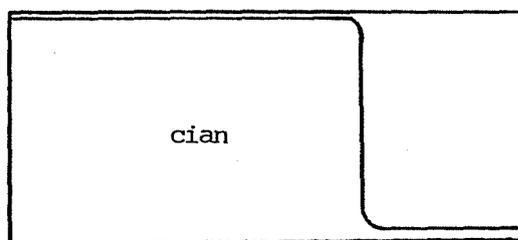
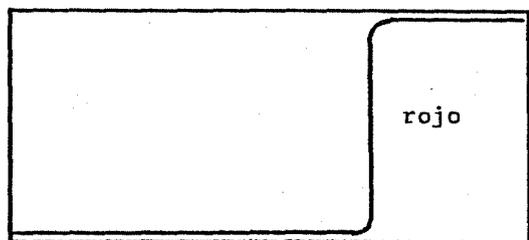
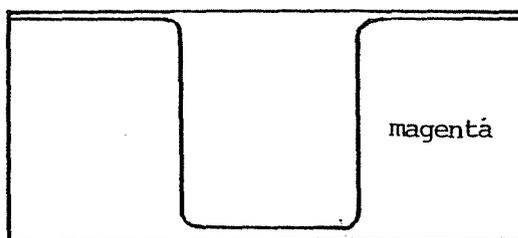
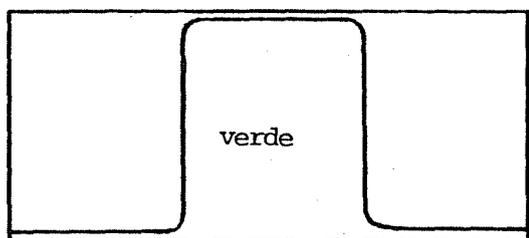
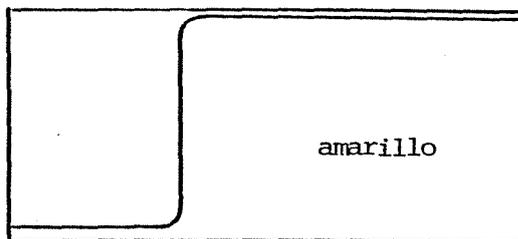
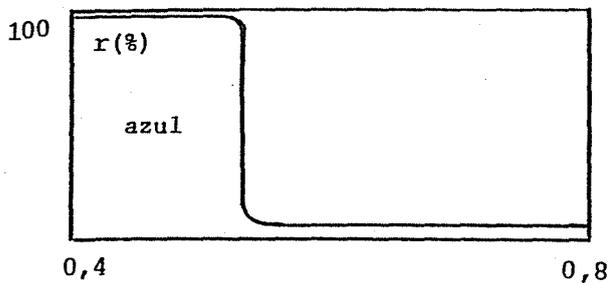
- Si se mira insistentemente (un minuto) una mancha de color y seguidamente se transporta la vista a una hoja de papel blanco bien iluminada, aparece el color complementario, debido a la llamada fatiga cromática, que consiste en que las células son más sensibles cuando tuvieron descanso previo inmediato.
- La tabla 1 da la lista de colores que corresponden a varias diferencias de camino óptico en interferencias de láminas de jabón o anillos de Newton, sin corrección por índice de refracción. Esto da un método directo para medir espesores. Cierta categoría de concursos de aeromodelos impone el vuelo en un ambiente interior, libre de corrientes de aire. Los aeromodelos son muy livianos, tienen el aspecto de libélulas, y se los construye con delgadísimas varillas y una lámina que los aficionados preparan coagulando productos químicos en la superficie del agua de una bandeja. El espesor óptimo lo distinguen por sus visos dorados. Saben que el color azul o morado corresponde a un espesor demasiado pequeño y el material sería difícil de manipular.
- Para observar los colores de interferencia en láminas de agua jabonosa no es necesario ningún artificio. Simplemente, cuando nos lavamos las manos con agua y jabón, formamos un aro con los

dedos índice y pulgar de ambas manos, y creamos en el aro la pompa mediante el procedimiento de juntar primero los dedos. Si mantenemos la lámina en un plano vertical, comprobaremos cómo a los pocos segundos engrosa en su parte inferior y adelgaza en la superior, presentando vistosos colores cuya lista está en la tabla 1. Poco antes de romperse, en la parte superior aparece una banda negra, que corresponde a un espesor menor que la longitud de onda del violeta, y por esa razón es invisible.

- Ciertos insectos, que al igual que los humanos poseen tres filtros o su equivalente celular, son capaces de distinguir entre colores que a nosotros nos parecen idénticos (por ejemplo, flores verdes sobre pasto verde), además de ser sensibles a frecuencias que nos están vedadas.
- Si usamos anteojos cuyos vidrios son de diferente color, veremos los objetos como aterciopelados (el terciopelo es muy direccional y dirige luz de intensidad diferente a uno u otro ojo). Ese efecto nos permitirá distinguir entre colores que sin los anteojos nos parecerían iguales. El daltonismo resulta así corregible, aunque este método requiere condiciones favorables de iluminación.
- La figura 4 esquematiza la composición aditiva de luces y la multiplicativa de tintas. Los gráficos espectrales están idealizados: en la práctica es muy difícil hallar sustancias que respondan a ese tipo de curvas, y las de uso común tienen espectros de forma acampanada.

BIBLIOGRAFIA

- M. BOUASSE - 1923 - *Interférences Z.* Garrière - Paris - Librairie De la grave.
- CLARENCE RAINWATER - 1971 - *Luz y Color* - Daimon - Provenze.



adición de luces; 3 luces

multiplicación de tintas; 3 filtros

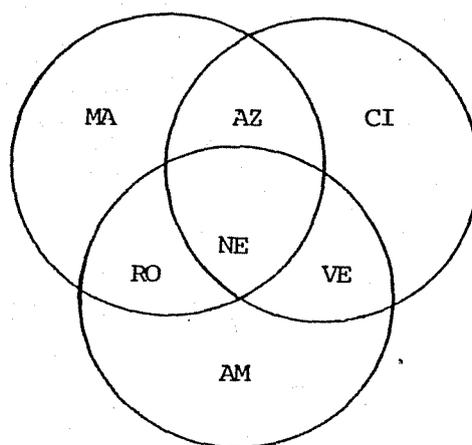
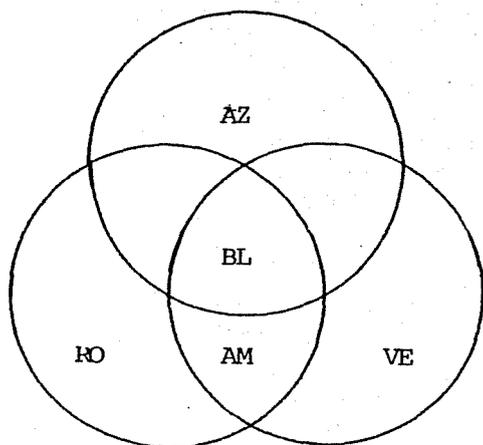


Figura 4: Esquema de adición de luces y multiplicación de tintas. En la parte superior, los espectros de los colores, idealizados.

$$RO + AZ = MA$$

$$VE + AZ = CI$$

$$RO + VE = AM$$

$$CI * AM = VE$$

$$CI * MA = AZ$$

$$MA * AM = RO$$

TABLA 1

Colores observados por interferencia entre dos rayos de luz blanca, en función de la diferencia entre sus caminos ópticos en el vacío.

Diferencia entre caminos ópticos en nanometros	Interferencia en fase (transmisión)	Interferencia en contra-fase (reflexión)
000	blanco	negro
040	blanco	gris plumizo
158	blanco pardusco	gris lavanda
218	marrón amarillento	azul grisáceo
234	marrón	blanco verdoso
259	rojo claro	blanco
267	carmín	blanco amarillento
275	ladrillo oscuro	amarillo pálido
281	violeta oscuro	amarillo pajizo
306	índigo	amarillo claro
332	azul	amarillo vivo
430	azul grisáceo	amarillo pardusco
505	verde azulado	naranja rojizo
536	verde pálido	rojo anaranjado
551	verde amarillento	rojo intenso
565	verde muy claro	púrpura
575	amarillo verdoso	violeta
589	amarillo dorado	índigo
664	anaranjado	celeste
728	naranja pardusco	azul verdoso
747	carmín claro	verde
826	púrpura	verde muy claro
843	púrpura violáceo	verde amarillento
866	violeta	amarillo verdoso
910	índigo	amarillo
948	azul oscuro	anaranjado
998	azul verdoso	naranja rojizo vivo
1101	verde	rojo violáceo desvaído
1128	verde amarillento	violeta azulado claro
1151	amarillo sucio	índigo
1258	color carne	azul algo verdoso
1334	rojo pardusco	verde marino
1376	violeta	verde brillante
1426	borravino	amarillo verdoso
1495	azul verdoso	rosa claro
1534	verdiazul	carmín
1621	verde alimonado	carmín purpúreo
1658	verde amarillento	gris violáceo
1682	amarillo verdoso	azul grisáceo
1711	amarillo grisáceo	verde marino
1744	magenta grisáceo	verde azulado
1811	carmín	verde
1927	gris rojizo	gris verdoso
2007	azul grisáceo	gris claro
2018	verde	rojo encarnado
2338	rosa pálido	verdiazul pálido
2668	verdiazul pálido	rosa pálido