A més de tot l'esperit científic inculcat, les sessions també són molt útils per ajudar a veure si les matemàtiques són una carrera que fa per tu. Encara que la base és la mateixa, i el salt de nivell no és excessiu, les classes de matemàtiques de l'escola són força diferents de les impartides a la universitat. Algunes de les sessions dels Bojos et mostraven un primer tastet de com seran aquestes últimes, tant amb el temari com amb la manera d'impartir del professor. Cada professor explicava d'una manera diferent (n'hi havia tant de les diverses universitats com d'educació secundària i batxillerat), i l'estil d'aquells que treballen en alguna universitat reflectia la manera d'explicar en aquests centres, la qual cosa et donava una primera impressió de com és una classe d'un grau en Matemàtiques.

En el meu cas concret, si bé aleshores ja tenia clar quins estudis volia cursar, el programa va servir per reafirmar-me en la meva decisió, ja que vaig gaudir de totes les sessions, tant del temari com de les diferents maneres d'explicar-lo emprades per cada professor.

A més del professorat i el temari, els companys van tenir un paper clau a fer d'aquesta una gran experiència. Molts de nosaltres havíem tingut poques oportunitats de compartir la nostra passió per la matèria amb amics i coneguts. Arribar a classe i poder posar-se a comentar les inquietuds i els dubtes matemàtics d'un (uns quants d'ells generats per les sessions de setmanes anteriors) és una de les millors maneres de potenciar el pensament matemàtic.

A més de les matemàtiques, compartíem moltes altres aficions, la qual cosa va afavorir que es formés un molt bon grup des del principi. A banda de ser útil per fer noves amistats, això ens va servir força a l'hora de treballar les sessions, ja que aquestes requerien constantment comentar idees i arribar a conclusions en grup, i tots ens sentíem molt còmodes es treballés amb qui es treballés.

El Bojos per les Matemàtiques va ser una molt bona experiència tant en l'aspecte educatiu com social i personal. D'una banda, em va permetre relacionar-me amb gent apassionada per les matemàtiques, amb la qual encara mantinc contacte (alguns com a companys de carrera, com era previsible). D'altra banda, em va obrir els ulls i la ment a àrees desconegudes de la matemàtica, i em va ensenyar a pensar i observar les matemàtiques d'una manera diferent de la que havia vist fins aleshores. En definitiva, va ser una gran etapa que em va ajudar a formar-me a diferents nivells, i que sens dubte recomano a tot aquell a qui s'ho passi bé amb les matemàtiques.

Cultura i matemàtiques

Matemàtiques a l'art i art a les matemàtiques II: matemàtiques en el color

Maria Alberich
Universitat Politècnica de Catalunya

L'art i les matemàtiques comparteixen una gran quantitat de punts de trobada. En aquest segon article aprofundirem en el diàleg entre les matemàtiques i l'art a partir de la temàtica comuna del color.

Proposo iniciar la nostra observació del color en el marc del diàleg entre les matemàtiques i l'art amb l'obra *Nombres primers, segons, tercers...* d'Icardi exposada al Museu de Matemàtiques de Catalunya (MMACA) en l'exposició temporal «Quan l'art i les matemàtiques es toquen». Amb el nom *Icardi* signen el treball conjunt una parella d'artistes, Imma i Josep Vall, germans, pintora i matemàtic, respectivament.

Aquesta obra explora la factorització dels nombres naturals a través dels colors de l'arc de sant Martí. Recrear aquesta obra amb una paleta de colors personal és una proposta que podem portar fàcilment a l'aula. En podem gaudir molt, tant pel vessant plàstic com pel matemàtic, i és una experiència recomanable, de manera especial per a l'alumnat de primària que ja domina la factorització d'un nombre en els seus factors primers. La proposta d'Icardi en aquesta obra és la següent: quan factoritzem un nombre, comptem el nombre de factors primers que el componen. Si es tracta d'un nombre primer obtenim un sol factor. Si obtenim dos factors (com el 4 o el 6) en diem nombre «segon», si n'obtenim tres (com el 8 o el 12), «tercer», etcètera. Ara prenem la seqüència de nombres naturals 2, 3, 4... i pintem una franja de la mateixa amplària per cada nombre. Triem un color per als nombres primers (per exemple, el violeta en l'obra d'Icardi) i pintem les seves franges corresponents d'aquest mateix color. Després triem un color per als nombres segons (per exemple, l'anyil en l'obra d'Icardi), i així successivament. La paleta de colors del quadre d'Icardi anterior està composta pels colors de l'arc de sant Martí i s'ha triat la seqüència que comença amb els colors freds: violeta, anyil, blau, verd, groc, taronja, vermell. Icardi ha recreat la mateixa idea en una altra obra on s'ha triat la mateixa paleta de colors començant la seqüència pels tons càlids. Podem contemplar-ne l'efecte a continuació.

Aquesta experiència plàstica ens evoca tot un seguit de reflexions matemàtiques que hi estan relacionades. Per exemple, podem preguntar-nos si hi ha infinits nombres primers, segons, tercers..., i quantificar com estan distribuïts. Aquesta pregunta dona peu a recordar que Euclides, en el llibre dels *Elements* (300 aC), ja va demostrar que cap llista finita de primers $\{2, 3, 5, \ldots, p\}$ no pot contenir-los tots. Per trobar-ne un de nou, només cal considerar el producte de tots els primers que coneixem i sumar-li una unitat

$$N = 2 \cdot \cdot 3 \cdot 5 \cdot \ldots \cdot p + 1$$

que, o bé serà un nombre primer, o bé tindrà un factor primer diferent dels de la llista. Per exemple, $N = 2 \cdot 3 \cdot 5 + 1$ permet trobar el nou nombre primer 31. Això ens permet saber que hi ha infinits primers i, per tant, també infinits segons, tercers... Icardi, en la presentació de la seva obra, observa que a partir d'un cert nombre hi ha més segons que primers, a partir d'un altre més tercers que segons i així successivament. De fet, podem plantejar-nos quantificar els nombres primers, intentant esbrinar el nombre de primers que hi ha més petits de qualsevol nombre x donat. Definim la funció

$$\pi(x) = \{\text{nombre de primers } \leq x\},$$

que és esglaonada, i salta en una unitat cada vegada que apareix un primer nou. Malgrat que és impossible predir el valor exacte de $\pi(x)$ el seu creixement és força regular, i aquesta regularitat es fa més evident a mesura que el valor de x és més i més gran. Si es construeix una taula de valors prenent com a x potències successives de 10, es pot veure que la raó de x entre $\pi(x)$ està molt a prop de la funció logaritme en base $e, \ln x$. Aquesta relació, coneguda com el «teorema dels nombres primers», va ser estudiada i conjecturada pel matemàtic Gauss l'any 1792, i no va ser demostrada fins al 1896 independentment per Hadamard i de la Vallée Poussin. De fet, un dels problemes matemàtics oberts més importants de l'actualitat, la hipòtesi de Riemann, consisteix a conjecturar que una funció, la qual és un refinament de la funció $\frac{x}{\ln x}$ que hem considerat més amunt, és una bona aproximació de $\pi(x)$. En conclusió, acabem d'experimentar com una obra d'art pot conduir-nos a profundes reflexions matemàtiques. Si us interessa saber-ne més detalls, recomano la lectura de *Números en Núm3ros* de Capi Corrales, la qual pot ser adequada també per a l'alumnat de batxillerat.

Reprenem tot seguit la temàtica del títol d'aquest article, les «matemàtiques en el color». En pensar-hi, segurament ens ve una pregunta al cap: s'hi amaguen realment matemàtiques, en el color? Josef Albers, artista alemany, professor de la Bauhaus, teòric i pedagog del

color va afirmar: «El color és el més relatiu dels mitjans que l'artista utilitza». D'altra banda, l'artista Vincent van Gogh va expressar en una carta al seu germà Theo que sentia «la necessitat de conèixer les lleis del color». Aquesta aparent contradicció mostra les dues cares d'una mateixa moneda: el color permet expressar la subjectivitat de l'artista i a la vegada segueix unes lleis i una lògica. Entendrem aquestes lleis lògiques que governen la teoria del color com les «matemàtiques del color».

És comú interpretar la paraula *relatiu* de la frase d'Albers com a «relatiu a l'artista o a l'observador», és a dir, com a «subjectiu». Possiblement Albers també volia expressar una «llei» del color menys coneguda: la percepció d'un color canvia depenent dels colors que l'envolten. Aprofundirem sobre aquest fet més endavant. Ara mateix, il·lustrem-ho amb l'obra *Arc de sant Martí* del mateix Albers (font de la imatge: la historia del arte.com), realitzada amb *collages* de vidre translúcid i que aconsegueix crear una interessant sensació d'inestabilitat. És diferent de la sensació que hem experimentat amb els arcs de sant Martí d'Icardi de la pàgina anterior?

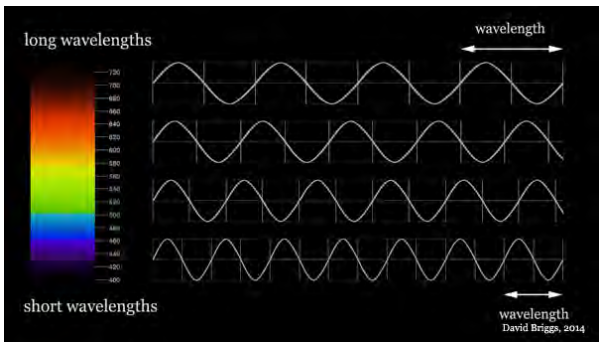
Explicaré a continuació alguns trets bàsics de les «matemàtiques del color» des d'una certa perspectiva històrica i amb esperit matemàtic, qüestionant el que recordem haver après a l'escola, i compartiré algunes curiositats que em semblen prou interessants.

El color és una percepció del sentit de la vista. Plató al segle IV aC la va descriure així:

«El color... és una flama que flueix dels diversos cossos, la qual com que té partícules proporcionades a la vista, produeix la percepció». Plató, *Timeu* 67d (traducció de Josep Vives a la Fundació Bernat Metge).

Malgrat que l'explicació de Plató no té cap fonament científic, podem dir que no es va equivocar gens en el fet de determinar els tres actors indispensables per a l'existència del color: la llum (la flama), l'objecte (els cossos) i l'observador (que percep el color). De fet, actualment el color es defineix com una percepció visual de la llum reflectida pels objectes.

És comú llegir l'afirmació «la llum és color». Tanmateix, això no és cert: el color és una sensació de la nostra ment en resposta a la llum. La llum blanca està formada per fotons que es comporten com ones electromagnètiques. Quan la llum blanca passa a través d'un prisma de vidre o a través de gotes d'aigua en suspensió a l'atmosfera es refracta i se separa en raigs amb longitud d'ona diferent. El sistema humà de percepció visual identifica una part d'aquestes diverses ones amb colors diferents, els colors de l'espectre visible, que podem contemplar a l'arc de sant Martí.



Els colors de l'espectre visible comprenen una gamma contínua de colors, que van des dels raigs d'ona més curta que percebem com a violeta, fins als raigs d'ona més llarga que percebem com a vermell.

Més enllà d'aquest interval, en els dos extrems hi ha els raigs d'ones ultraviolades i infraroges, respectivament, i altres ones, que no són visibles per a l'ull humà. La llum visible és simplement una petita part de l'espectre electromagnètic complet que s'estén des dels raigs còsmics d'alta energia (de longitud d'ona molt curtes), seguits pels raigs gamma, raigs X, ultraviolat, visible, infraroig, microones i ones

de ràdio, fins a les ones d'energies més baixes (de longitud d'ona molt llarga).

No tots els animals perceben el mateix espectre visible que l'ésser humà, i alguns animals perceben colors que nosaltres no podem ni imaginar-nos. Les abelles, per exemple, tenen el seu rang d'espectre visible desplaçat cap a l'ultraviolat respecte al de l'ésser humà. No poden veure les longituds d'ona que nosaltres percebem com a vermelles i en canvi poden percebre radiacions ultraviolades, invisibles per a nosaltres. De fet, moltes flors que són pol·linitzades per les abelles tenen pigments que reflecteixen les radiacions ultraviolades i que elles poden percebre.

Tampoc tots els éssers humans no reaccionem amb la mateixa sensació de color com a resposta a les mateixes longituds d'ona, ja que la sensació de color és el producte de la nostra ment i està fortament influenciada pel nostre psiquisme i la nostra cultura. Per exemple, fixem la nostra atenció en els tons de color que distingim a l'arc de sant Martí. D'acord amb la nostra cultura occidental actual, acceptem amb naturalitat descriure l'arc de sant Martí amb set colors: violeta, anyil, blau, verd, groc, taronja i vermell. Però, si l'espectre visible conté un rang continu de longituds d'ona, per què un nombre finit d'ells ha de ser més especial? Per què exactament set? Ha estat així al llarg de tota la història? Quins colors hi han vist els nostres avantpassats, en l'arc de sant Martí?

En un dels primers tractats històrics sobre òptica, el químic anglès del segle XVIII Joseph Priestly va escriure sobre l'arc de sant Martí que «l'ordre regular dels colors era una circumstància que no podia haver passat desapercebuda a cap persona (de qualsevol època)». Malgrat que ens pugui semblar un argument raonable, el cert és que hi ha abundants evidències literàries i pictòriques les quals suggereixen que ni el nombre ni l'ordre dels colors no han estat clars per als diferents observadors al llarg de la història ni en les diferents civilitzacions.

Segons John Gage (*Colour and Culture*, Thames & Hudson, 2012), un observador jove de finals del segle XIX (basat en un estudi de l'època) podia reconèixer només quatre colors (vermell, groc, verd i blau) en un arc de sant Martí ben definit. Precisament aquests quatre colors són els més comuns en representacions medievals de l'arc de sant Martí, juntament amb arcs de dos colors, verds i vermells. Cal fer notar que després els estudiosos o comentaristes atribueixen als colors emprats en cada obra un significat místic, especialment en les imatges religioses. Observem, per exemple, la imatge següent (font de la imatge: Gage, *Colour and Culture*) sobre l'aliança de Déu amb Noè, del manuscrit il·luminat del segle VI, *Gènesi de Viena*, el més antic i millor conservat còdex bíblic il·lustrat que ha arribat als nostres dies.

Segons els experts, aquesta representació de l'arc de sant Martí usa un esquema bicolor: al verd de l'aigua se li atribueix el significat del diluvi i a la banda vermella de sota, el foc del dia del judici. En canvi, jo hi observo diverses divisions en les bandes verdes i vermelles, i hi distingeixo, clarament al mig, una banda blanca que separa les bandes de tons verds i vermells. Personalment, se'm fa evident una similitud reveladora entre aquesta imatge i la imatge que la segueix, malgrat que no he trobat constatada aquesta analogia en la bibliografia que he consultat.

Altres artistes van representar un arc de sant Martí amb tres colors, fidels a la descripció d'Aristòtil, que de seguida es va interpretar com un símbol de la Trinitat. Aristòtil va descriure l'arc de sant Martí amb la seqüència observada correctament de colors vermell (*phoinicoûn*), verd (*prásinon*) i porpra o violeta (*halourgón*). En canvi, Virgili, a l'*Eneida*, comenta la impossibilitat de comptar els colors de l'arc de sant Martí, justificant que n'hi ha un miler. El *Vergilius Romanus* és el còdex més antic (segle V) que recull obres de Virgili i es conserva a la Biblioteca Vaticana. A

la imatge següent (font: Biblioteca Vaticana) veiem com l'artista d'aquest còdex ha resolt la representació d'aquests milers de colors condensant-los en tres (vermell, blanc i verd). Tanmateix, cada banda està dividida en unitats més menudes, segurament per expressar aquesta multitud de colors. Llevat que l'ordre està a l'inrevés, no ens recorda sorprenentment aquest arc de sant Martí el que acabem d'observar a la imatge anterior?

La figura següent representa també la història de Noè, extreta d'un *Llibre de les hores* de Normandia de l'any 1430. L'artista podria haver-se assabentat de la investigació sobre la refracció de la llum a través d'un prisma coneguda al segle XIV, perquè representa un arc de sant Martí amb la seqüència dels colors de l'espectre. És interessant que ens fixem en el color del cel d'aquesta miniatura i el comparem amb les miniatures anteriors, ja que és un tema del qual parlarem més endavant (font de la imatge: Gage, *Colour and Culture*).

El llenguatge és una bona manera de valorar la influència cultural en l'experiència visual. Des d'aquest punt de vista es constata que el mateix concepte de color, com a categoria cognitiva, s'ha configurat en algunes cultures i en altres no. Un estudi antropològic de l'any 1971 sobre l'ús cultural del color a les illes de Polinèsia va concloure que l'apreciació dels diferents colors no era un tema d'interès en aquella cultura, ja que no hi havia ni paraules per referir-s'hi. Aquest estudi presentava el testimoni d'un illenc nadiu de Bellona (Polinèsia) que deia: «Nosaltres no parlem gaire sobre color aquí».

Un fenomen semblant a la cultura polinèsia també el trobem a casa nostra. John Gage fa notar que a la cultura mediterrània grecollatina antiga les diferències en el grau de lluminositat haurien estat molt més importants que les diferències entre tons de colors. Aquí també l'estudi de les llengües i la literatura aporten informació rellevant, com la importància de la distinció entre brillant i mat en l'antiguitat per sobre de les distincions de tons de colors. Per exemple, en llatí i les llengües germàniques distingien entre blanc brillant (*albus* i *blanck*, respectivament) i blanc mat (*candidus* i *weiss*, respectivament), distinció que s'ha perdut en els idiomes actuals. En canvi, els historiadors del color sostenen que les llengües grega i llatina tenen pocs termes cromàtics o estrictament cromàtics.

Seguint aquesta mateixa línia d'idees, és interessant la reflexió sobre el color blau que fa l'historiador Michael Pastoureau (*Azul: historia de un color*) i que us resumiré tot seguit. Tot i que l'ús del color blau s'havia estès en la cultura grecollatina, no existia en aquestes llengües antigues un terme per anomenar conjuntament la gamma cromàtica del color blau. A l'antiguitat el color blau va ser un color poc apreciat, excepte per a la cultura egípcia. El

blau no es troba ni a les coves paleolítiques ni quan apareixen les primeres tècniques de tint neolítiques. El color blau és difícil de fabricar i de dominar, i segons Pastoureau aquest és el motiu pel qual no va tenir cap paper en la vida social, religiosa o simbòlica de l'època grecoromana. A Roma el blau era el color dels bàrbars (el color dels seus ulls), dels estrangers. En la llengua grega hi ha confusió de vocabulari entre el blau, el gris i el verd. L'absència del blau en els textos antics va intrigar tant alguns filòlegs del segle XIX que van arribar a creure que el sistema visual dels grecs era incapaç de percebre'l. El llatí tampoc no té termes precisos per al to blau, encara que s'hi troben paraules com *caeruleus* i *glaucus* que evolucionaran i designaran diversos tons de blau. Observem que les llengües romàniques han adoptat la paraula que defineix el to blau de les llengües germàniques (*blau*) o de l'àrab (*azraq*, del qual deriva el mot castellà *azul*).

Segons Pastoureau, el desprestigi del color blau va perdurar a la cultura europea fins a l'alta edat mitjana. El canvi va ser motivat per un canvi profund de les idees religioses: el Déu cristià es converteix en un déu de llum i la llum s'identifica amb el color blau. Per primera vegada a Occident es pinten cels blaus, quan anteriorment eren negres, vermells, blancs o daurats. Això es va reforçar per l'expansió del culte marià: la creença que la Verge Maria habita al cel, associa el color blau amb la verge. A partir del segle XII la verge apareix en les imatges coberta amb un mantell i vestit blau. Com a mostra d'aquesta associació del blau amb la verge que ha perdurat fins als nostres dies recordem l'estrofa del virolai: «...deu-nos abric dins vostre mantell blau». Així la verge es convertí en la principal promotora del color blau.

A continuació podem observar l'escena de l'epifania de les pintures murals de Ferrer Bassa a la capella de Sant Miquel del monestir de Pedralbes, que daten del segle XIV en la plenitud de l'art gòtic (font de la imatge: MUHBA).

Efectivament, la túnica de la verge és del mateix to blau del cel. D'altra banda, el pintor utilitza recursos cromàtics per suggerir una idea de perspectiva en la composició. Les figures del primer pla porten vestits de colors saturats (colors més purs, sense barrejar amb blanc) en contrast amb els tres personatges que s'aproximen a cavall. De la mateixa manera la lluminositat o brillantor predomina en les figures del primer pla, com podem observar en la major claredat de la pell en rostres i mans de la verge, l'infant i els tres reis.

Hi ha una relació curiosa entre la verge i l'arc de sant Martí. Primerament sant Bonaventura (*Laus Beatae Virginis*) al segle XIII, i més tard santa Brígida de Suècia (*Revelacions*) al segle XIV associaren l'arc de sant Martí amb la verge. El pintor Matthias Grünewald es fa ressò d'aquesta associació i l'expressa en la seva obra *Stuppach Madonna* (1517-1519), que podem veure tot seguit (font de la imatge: Gage, *Colour and Culture*).

Observem la similitud en els colors del vestit de la verge de Grünewald i la de Ferrer Bassa, vestit vermell i túnica blava. Al quadre de Grünewald es veu l'arc de sant Martí, envoltant els caps de la verge i l'infant Jesús, que a primer cop d'ull ens pot semblar estrany: la zona superior de l'arc de sant Martí és més pàl·lida, simulant la lluminositat del fenomen atmosfèric, i contrasta amb la zona inferior més saturada i ressaltada formada pels dos colors del vestit de la verge, el vermell i el blau. Així, l'alteració de l'ordre dels colors de l'arc de sant Martí i la seva saturació són

els recursos cromàtics que usa el pintor per emfatitzar l'associació de l'arc amb la verge.

Reprenem ara la pregunta de per què distingim exactament set colors en l'arc de sant Martí. La resposta la trobem en la influència de l'obra de Newton, que no només va determinar set colors en l'espectre, sinó que també va presentar-los per primera vegada en forma de roda i no sobre un segment. Quan es refracta la llum blanca a través d'un prisma es distingeixen colors formant bandes contigües. És natural representar aquests colors en forma de segment.

No ens sembla estranya la representació dels colors en forma de cercle? Què tenen en comú els colors de longitud d'ona més curta amb els de longitud d'ona més llarga per posar-los junts en un cercle? Ens hem adonat que hi ha un color a la roda de colors que vam aprendre a l'escola, el magenta, que no apareix a l'espectre?

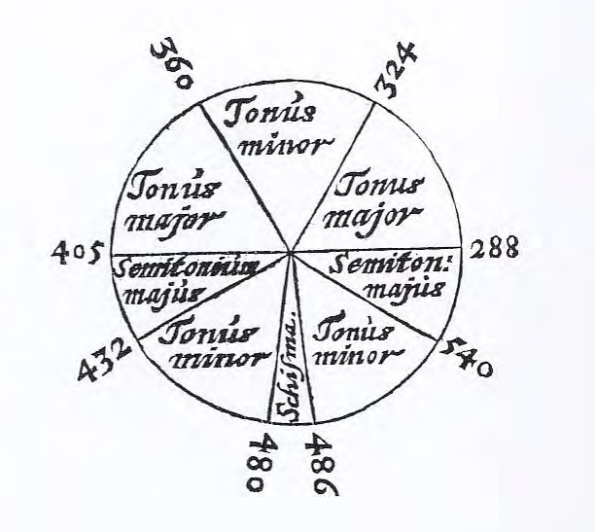
En la seva obra *Opticks* del 1704, Newton va presentar el seu diagrama circular dels set tons de color de l'espectre, ordenats i amb una proporció determinada. La forma circular resultava adequada per modelitzar la suma de llums de colors: el color resultant de sumar llums de colors diferents correspondria al «centre de masses» de les llums components, ponderades segons els seu «nombre de raigs» relatiu al total.

D'aquesta manera, cal interpretar el diagrama de Newton en l'espai bidimensional, és a dir, com un cercle: els colors sobre la circumferència serien colors «intensos i florits fins al grau màxim», és a dir, totalment saturats, mentre que els altres colors perdrien saturació a mesura que s'apropessin al centre de la circumferència. El centre representaria el color blanc. El cercle de Newton és, doncs, la primera representació gràfica bidimensional de la saturació i del to dels colors. La coordenada del to està marcada amb set separacions que porten el nom de set colors de l'espectre (violeta, anyil, blau, verd, groc, taronja, i vermell), els quals encara avui en dia considerem que componen l'arc de sant Martí. És molt curiosa la proporció de cada separació, la qual, tot i que és coherent amb la seva funció de modelar l'addició de colors llum, segueix exactament la seqüència d'intervals de l'escala musical. Vegem a continuació una imatge de l'escala musical dòrica, una de les antigues escales modals tradicionals (diferent de les modernes escales tonals que van adoptar-se a partir del segle XVIII), que apareix en l'obra *Compendium Musicae* de René Descartes del 1650, i en la qual es va inspirar Newton per al seu diagrama.

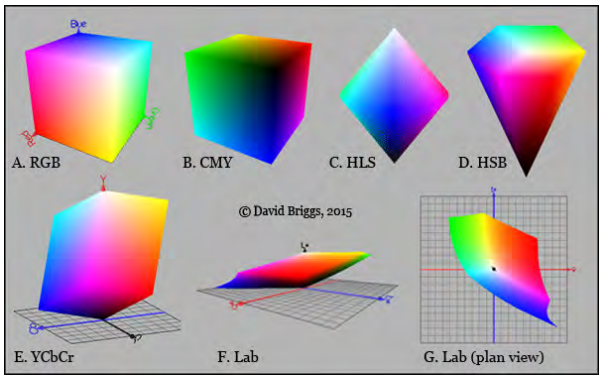
El mateix Newton va justificar la seva divisió «musical» de l'espectre de llum blanca amb aquestes paraules:

> «... no només perquè s'adequa molt bé amb el fenomen, sinó perquè també involucra quelcom de l'harmonia dels colors..., en concordança amb l'harmonia dels sons. Fins i tot semblarà ben trobada l'afinitat entre els colors més perifèrics vermell i violeta, els extrems dels colors, de la mateixa manera

que succeeix amb els extrems de l'octava (que es poden considerar unísons)».

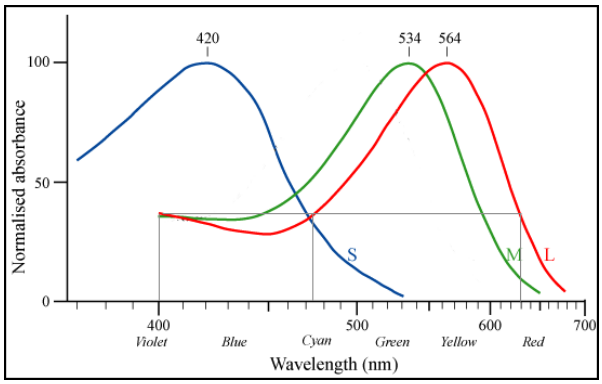


A l'escola s'aprèn que hi ha tres colors primaris per mesclar pintures i també sabem que les pantalles utilitzen tres colors primaris per barrejar llums: el vermell, el verd i el blau. Fins i tot, ens pot semblar familiar la nomenclatura RGB (*red* de vermell, *green* de verd, i *blue* de blau) per referir-se a una parametrització de l'espai de colors en l'espai tridimensional segons la magnitud de les variables R, G i B, les quals poden prendre qualsevol valor entre zero i u. De fet, la gran majoria de les representacions de l'espai de colors són tridimensionals: algunes mesuren en els seus tres eixos de coordenades (que poden ser cartesianes o cilíndriques) les magnituds de to, saturació i brillantor (o lluminositat, claredat o valor, que vindrien a ser termes equivalents), d'altres la proporció de la composició d'un color respecte a tres colors primaris, i algunes darreres s'obtenen per transformacions isomorfes de variacions o combinacions de les anteriors. Però ens hem preguntat mai per què el nombre tres és tan especial?



L'explicació de per què els colors primaris estan agrupats de tres en tres rau en la manera com funciona el sistema de la visió humana, el qual consta de tres processos: l'òptic, el retinal i el cerebral. En el sistema òptic és important el grau d'opacitat del cristal·lí, que segons l'edat de la persona influeix en la percepció dels colors. De fet, el cristal·lí limita el rang de l'espectre visible que som capaços de percebre. Persones a les quals s'ha hagut d'extreure el cristal·lí i no ha estat reemplaçat per una lent plàstica substituta han demostrat percebre ones de la zona ultraviolada de l'espectre.

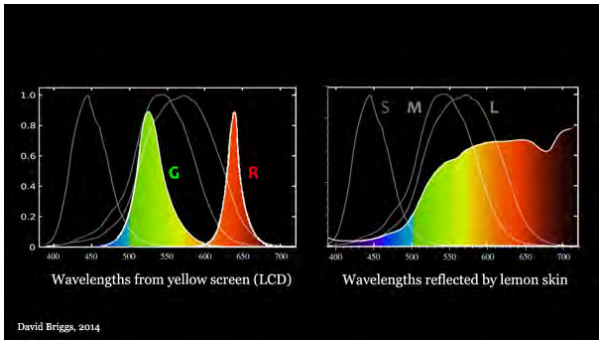
La capa posterior de la retina conté unes cèl·lules fotoreceptores, cons i bastons, que envien la informació al cervell a través del nervi òptic. El fet fisiològic clau que determina la nostra percepció del color és que hi ha tres tipus de cons a la retina humana. Cada tipus té un fotopigment específic amb una corba d'absorció característica que és més sensible a una determinada longitud d'ona: llarga (L), mitjana (M) o curta (S). Per aquest motiu s'acostuma a qualificar l'ull humà de receptor tricromàtic.



En la imatge podem observar que per a cadascun dels tres colors primaris de la mescla de llum (blau, verd i vermell) hi ha un tipus de con que respon més que els altres dos. Anàlogament, cadascun dels tres colors primaris de la mescla de pigment té la propietat d'absorbir un d'aquests colors primaris de la llum. Cal fer notar que els cons no són capaços, per si sols, de detectar una longitud d'ona determinada. Per exemple, l'excitació d'un con L podria respondre a una petita quantitat d'ones de la zona groga de l'espectre, o bé a una gran quantitat d'ones d'una de les tres zones d'igual resposta marcades a la figura: de 630 nm (vermella), de 475 nm (cian) o bé de 400 nm (violeta). D'altra banda, un raig monocromàtic

groc ocasionaria una resposta predominant dels cons tipus L i M per sobre de la resposta dels cons tipus S.

El nostre cervell i certes cèl·lules ganglionars de la retina duen a terme un processament comú de la resposta relativa dels diferents tipus de cons. Aleshores es creen tres senyals: un senyal de brillantor global, i dos senyals que quantifiquen el predomini entre els oposats blau i groc, i entre els oposats vermell i verd. Per exemple, la visualització del color groc es correspondria amb un senyal predominant groc en la característica blau-groc i a un senyal zero en la característica vermell-verd (és a dir, que verd i vermell estan compensats i no predomina cap de tots dos). Aquest processament de la resposta relativa dels nostres cons fa que vegem el mateix color, malgrat que les proporcions d'ones que arriben al nostre ull siguin ben diferents. Vegem un exemple en el gràfic següent extret del portal web *The dimensions of colour* del professor d'art i artista David Briggs, el qual us recomano visitar si voleu aprofundir en el tema del color.



A la figura hi estan representats els espectres de dues combinacions d'ones diferents que nosaltres veiem iguals i de color groc. La combinació de l'esquerra correspon a les ones de llum d'una llimona reproduïda per la pantalla d'un ordinador, mentre que la combinació de la dreta correspon a les ones de llum reflectides per la pell d'una llimona il·luminada pel sol. Per tant, queda clar amb aquest exemple que el color, en aquest cas el groc, no és una característica de la llum, sinó una resposta del nostre cervell.

Així les diferents ponderacions dels senyals de predomini d'oposats són l'origen del cercle de colors. Les ones monocromàtiques de l'espectre són capaces de produir gairebé totes les combinacions. El color magenta és una combinació dels senyals blau i vermell, provinents per mescles d'ones dels dos extrems de l'espectre.

Hi ha persones que només tenen dos tipus de cons (daltonisme) i, per tant, el seu cervell només pot crear un sol senyal de predomini entre oposats. Per a aquestes persones el seu espectre visual només té dos colors. La percepció visual dels matisos de brillantor fa que aquestes persones es desenvolupin sense dificultats.

Els cons només s'activen quan els nivells d'il·luminació són prou alts, com la llum del dia, i són els que possibiliten la nostra visió policromàtica. En canvi, els bastons són sensibles a nivells d'il·luminació molt baixos i gràcies a ells som capaços de veure-hi amb llum escassa. Contenen un pigment, que és sensible a les ones de la zona de l'espectre del verd-blau. Per aquest motiu la nostra visió és pràcticament monocromàtica quan és fosc, i el color que menys distingim és el vermell. Les longituds d'ona reflectides pels objectes són les mateixes, però nosaltres no percebem els colors. Aquí tenim un altre motiu que respon a la pregunta de per què el color es defineix com una percepció visual de la llum reflectida pels objectes, i no com una longitud d'ona determinada.

Cada tipus de font lluminosa (blanca, de tungstè, de neó, de vapor de sodi, de vapor de mercuri, etcètera) emet ones diferents i, per tant, té un efecte diferent en la il·luminació d'un objecte. Finalitzem aquest article amb una darrera evocació de l'arc de sant Martí, que mostra la varietat de colors que pot emetre una font lluminosa per l'excitació del gas de neó.