



## Els colors en la taula periòdica

M. del Tura Puigvert Masó

**Resum:** *Contribuint en l'Any Internacional de la Taula Periòdica, presentem una síntesi sobre el color, com a propietat característica de les substàncies químiques, i la seva relació amb la constitució química. Es tracta d'una propietat de la matèria identificada per tothom però, tot i que sembla fàcil de distingir, científicament ha estat difícil de definir i de mesurar. Des d'un punt de vista interdisciplinari resumim les idees bàsiques sobre llum i color i la diversitat dels colors que observem. Des de la química es dona explicació a les causes del color relacionades amb els elements en la taula periòdica i amb la constitució interna de les substàncies simples, dels compostos inorgànics i dels compostos orgànics. A continuació, ens endinsarem en l'obtenció de substàncies acolorides que històricament s'han aplicat a pintura i tintura, els pigments i els colorants, resultat d'un treball de col·laboració entre artesans i artistes. La recerca química ha provocat grans canvis en els colors emprats en pintura i en tintura. El descobriment de metalls de transició va enriquir la paleta dels pintors del segle XIX. Al mateix temps que Mendeleiev escrivia els "Principis de Química" i publicava el seu treball sobre la taula periòdica, a Europa, una generació de químics va fer grans progressos en síntesi orgànica. Una nova col·lecció de pigments i colorants de síntesi van substituir els colors que durant segles s'havien obtingut per trituració de minerals o a partir d'extractes de plantes o d'animals.*

**Summary:** *COLOURS WITHIN THE PERIODIC TABLE. – As a contribution to the International Year of the Periodic Table, the present paper synthesizes existing ideas on the relationship between colour and the chemical composition of matter. Colour is a property of matter that is easy to distinguish, but science has found it difficult to define and measure it. After an opening section introducing the interdisciplinary nature of light and colour, this article focuses on the colour of some well-known materials and provides a review of several substances historically used as pigments or dyes. The evolution of painting and dying was the result of craftsmen working together with artists until chemical research led to major changes in the nineteenth century. New elements discovered between the eighteenth and nineteenth centuries were a source of new pigments. A generation of chemists then discovered how to synthesize hundreds of new chemicals and, as a result of these efforts, a new collection of dyes and pigments emerged in Europe just as the periodic table was being drawn up.*

“El color em posseeix, no tinc necessitat de perseguir-lo...  
El color i jo som una mateixa cosa. Sóc pintor». Paul Klee, 1914

### Llum i color

El color és una propietat característica de les substàncies que ha estat un referent en química analítica, tant qualitativa com quantitativa. Els colors del precipitat i del sobrenedant han estat fonamentals en la marxa analítica de cations i d'anions, practicada en els laboratoris del segle anterior. Reconeixem el precipitat groc del iodur de plom (II), el blau intens de la solució de  $\text{Cu}^{2+}$  amb amoníac, el vermell intens dels ions  $\text{Al}^{3+}$  amb alitzarina.

Es tracta d'una propietat de la matèria reconeguda per tothom però, tot i que sembla fàcil de distingir, científicament ha estat difícil de definir i de mesurar. El tractament de llum i color des de camps de l'activitat humana molt dispars ha ge-

nerat llenguatges propis. En alguns casos es fa difícil trobar significats equivalents a la terminologia emprada en cada àrea.

En sentit estricte, es referim a la llum com la radiació electromagnètica que és susceptible de ser detectada per l'òrgan de la visió humana. Sabem que, de la gran diversitat de radiacions que conformen l'espectre electromagnètic, la llum ocupa tan sols una banda molt estreta, la situada entre els 300 i 800 nm.

Un raig de llum pot ser monocromàtic (format per un sol tipus de radiació, amb la freqüència i longitud d'ona que li són pròpies) o policromàtic (format per diversos tipus de radiació, cadascun amb la seva freqüència i longitud d'ona).

El color és el resultat de la percepció humana de la llum mitjançant un procés neurofisiològic molt complex. En l'epiteli pigmentari de la retina hi intervenen com a receptors 7 milions de cons, molt concentrats en la fòvea, i 120 milions de bastons, repartits per tota la superfície de la retina.

Gràcies a l'òrgan de la visió detectem la llum visible i en percebem el matís, la saturació i la brillantor. Som capaços de distingir 300 longituds d'ona diferents i una varietat cromàtica de més d'un milió de colors. El llenguatge és molt limitat per expressar amb paraules la gran diversitat de les percepcions humanes.

Ara bé, l'ull no és un espectroscopi capaç de detectar cada radiació per separat i, en conseqüència, els noms que atribuïm a cadascun dels colors no tenen una correspondència biunívoca amb la freqüència de cadascuna de les radiacions que estem rebent.

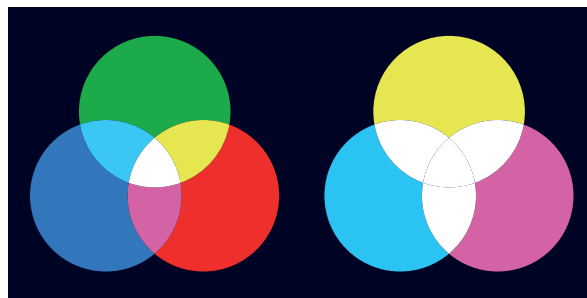
El nostre sistema de visió del color es basa en la tricromia. La retina humana disposa de tres tipus de sensors de color, els quals actuen simultàniament, transmeten l'estimulació nerviosa al cervell i aquest processa la informació en forma de resposta conjunta. El resultat és la percepció del color. El nostre sistema visual no està preparat per discernir la resposta de cadascun dels tres tipus de cons per separat. Normalment una sola freqüència pot estimular un mínim de dos tipus de cons. Ignorem, doncs, si el color que percebem, com a resposta als canvis que han tingut lloc en els cons de la retina, ha estat causat per un sol tipus de radiació o per la suma de diverses radiacions. A cada instant, per a cada raig de llum que rep l'ull, en la retina se sintetitza la informació en forma d'estímul visual i com a resultat es percep un únic color per a cada direcció de propagació.

Distingim entre llum blanca i superfície blanca: una superfície blanca és aquella que pot reflectir tots els colors que hi incideixen. Una llum blanca és aquella que conté, amb intensitats similars, tots els colors. Percebem color blanc quan s'han activat amb la mateixa intensitat els tres tipus de cons de la retina.

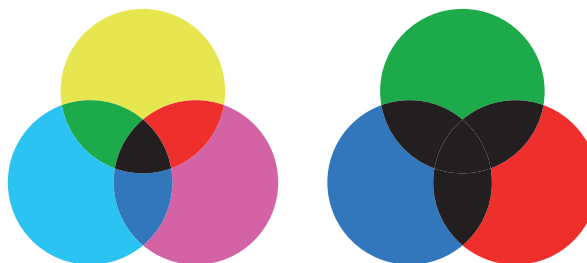
La composició de la llum es pot observar descomponent-la amb un medi adequat. Els fenòmens físics de la dispersió i de la difracció permeten descompondre un raig policromàtic en els seus components monocromàtics. El perfeccionament dels mètodes d'obtenció de la flama i dels instruments per dispersar la llum i mesurar la llum dispersada van ser desenvolupats a mitjans del segle XIX i van permetre desenvolupar l'anàlisi espectroscòpica.

Si en una habitació totalment fosca il·luminem una superfície blanca amb dos focus de diferent color i fem incidir les seves llums en un mateix cercle, el resultat que observem serà l'addició de colors llum. Diem que hi ha hagut una mescla additiva (fig. 1).

Si en una superfície blanca il·luminada amb llum blanca (que està formada per tots els colors), sobreposem dues pinzellades de pintura de colors diferents o dos filtres transparents dels mateixos colors que les pintures, observarem l'efecte que produeix la subtracció de color. Els materials que componen la pintura o el filtre han restat (absorbits) a la llum blanca part dels seus compo-



**Figura 1.** Síntesi additiva de colors llum incidint sobre superfície blanca.

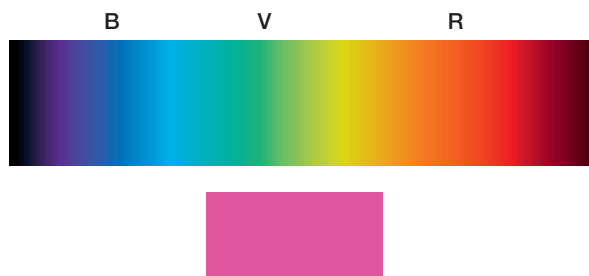


**Figura 2.** Síntesi substractiva de filtres o pigments sobre superfície blanca il·luminada amb llum blanca.

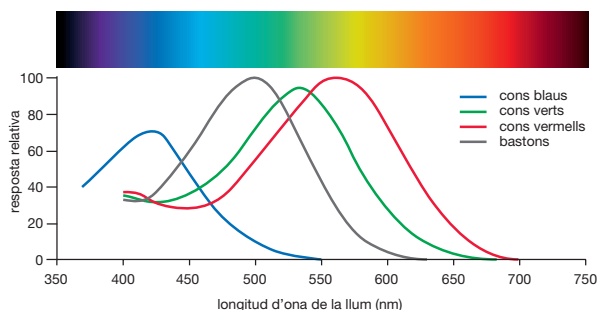
nents i cada pintura reflecteix o cada filtre deixa transmetre aquells colors que no s'han absorbit. Hi ha hagut una mescla substractiva (fig. 2).

Pels mateixos colors de partida, la mescla de llums (addició de colors) donarà un resultat i la mescla de filtres o bé de pigments (subtracció de colors) en donarà un altre (comparar figs. 1 i 2).

De totes les radiacions de l'espectre visible no n'hi ha cap de color fúcsia (color que el nostre cervell dona com a resposta a la mescla de les llums de color blau i vermell) (fig. 3). En canvi, el color groc o el color cian poden ser causats o bé per una radiació pura que ha estimulat alhora dos tipus de rodopsina (dos tipus de cons) o per la mescla de diverses radiacions que han produït el mateix efecte (verd i vermell per al groc i verd i blau per al cian). Quan la retina rep radiació pura de color groc s'estimulen simultàniament els cons sensibles al vermell i els cons sensibles al verd



**Figura 3.** Espectre de la llum visible i bandes B-V-R de sensibilitat dels cons. La percepció del color fúcsia no correspon a cap radiació concreta.



**Figura 4.** Resposta relativa dels cons i dels bastons segons la longitud d'ona de la llum.

(fig. 4). Si la retina rep llum d'una banda fina de l'espectre corresponent al cian, s'estimularan simultàniament els cons sensibles a la zona visible de longitud d'ona més curta (al voltant del blau) i els sensibles a la zona mitjana de l'espectre visible (cap al verd). La resposta és la percepció del color blau verd o cian.

### Llum incident i color dels objectes

Una superfície blanca perfecta és aquella que reflecteix tota la llum que hi incideix. Es veurà blanca sota llum blanca, verda sota llum verda, vermella sota llum vermella, etc. Tindrà sempre el color de la llum incident.

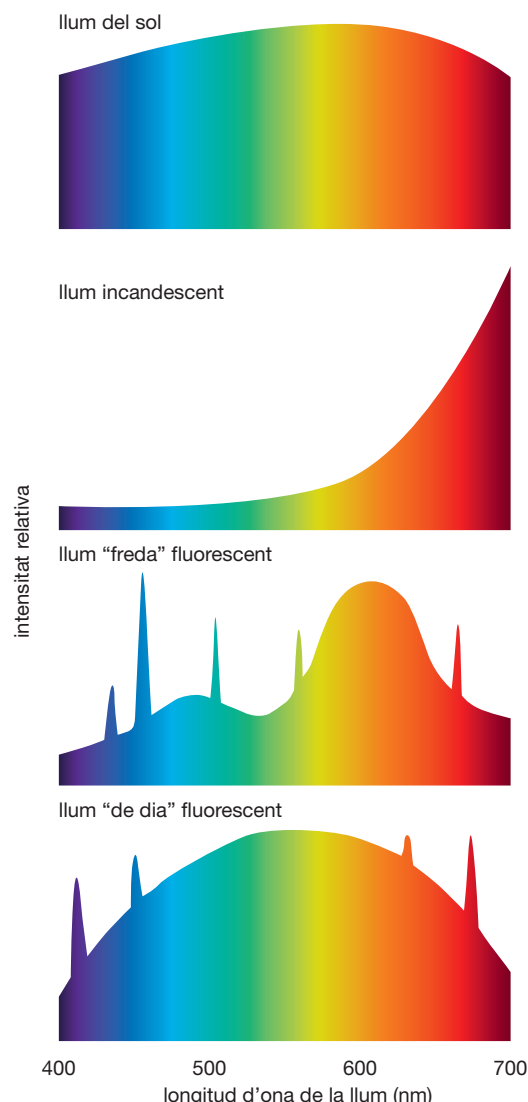
Una superfície negra perfecta és aquella que absorbeix tota la llum que hi incideix. Sigui quin sigui el color de la llum incident, la superfície es veurà totalment negra.

Els únics objectes que es veuen sempre del mateix "color" són els que no tenen color, els negres, tot i que és molt difícil, gairebé impossible, que existeixin el negre perfecte o el blanc perfecte. La resta d'objectes es veuran de diferent color segons com se'ls il·lumini (fig. 5) i segons com se'ls observi.

Les idees que actualment tenim sobre naturalesa de la llum (Font, 2017) i percepció del color (Serra, 2017) són ben diferents de les que es tenien a finals de segle XVIII, quan William Herschel regalava a John Dalton el llibret amb fils de seda tenyida per provar com era l'anomalia de la visió dels colors que patia. La recerca de Dalton va ser el primer estudi científic sobre cromatòpsia o ceguesa als colors, que ara coneixem com a daltonisme (Robinson, 2013). Els progressos en espectroscòpia i les recerques en percepció visual realitzats durant el segle XIX han assentat les bases dels coneixements actuals.

Per poder normalitzar el color dels objectes i fer que sigui reproduïble, cal fixar uns estàndards d'il·luminació i de condicions d'observació. Per il·luminar la superfície, existeixen diversos tipus de focus estàndard. El més usual és el D65, que reproduïx la llum diürna amb temperatura d'incandescència de 6500°C.

El color que percebem d'un objecte pot variar fins i tot amb l'observador. La percepció de cada



**Figura 5.** La composició de la llum incident fa variar el color dels objectes.

individu, a part del seu sistema visual, depèn de la llum incident sobre l'objecte, de la composició física i química, de la textura de la superfície, dels colors circumdants i de l'angle sòlid sota el qual s'observa (fig. 6). Cal evitar la influència de l'entorn ja que els colors circumdants poden pertorbar la percepció del color que s'està observant i també



**Figura 6.** Canvi de color de l'alexandrita segons la il·luminació: sota llum solar i sota llum incandescent (Foto: D. Weinberg CC BY-SA 3.0).

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89-103	77	78	79	80	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Rn
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

**Figura 7.** Color en la taula periòdica: els símbols encerclats indiquen les substàncies simples acolorides. La resta de quadres de color pels noms d'elements que fan referència a color.

es regula l'angle sòlid sota el qual s'observa. Se seleccionen els observadors que es considera que tenen una visió humana estàndard. La *Commission Internationale de l'éclairage*, des del 1920, en què ja s'havien fixat els primers sistemes colorimètrics en forma de coordenades cromàtiques, és la responsable de regular els estàndards de mesura del color de superfície i de la seva actualització quan van sorgint necessitats noves com són els colors de pantalla o els colors de les impressions.

### El color de les substàncies simples

En condicions estàndard, la major part de les substàncies simples són sòlids grisosos, més o menys brillants. Amb objectius diversos moltes persones han intentat col·leccionar mostres representatives de substàncies simples per a cada element de la taula periòdica i n'han fet un objecte didàctic alhora que estètic. (Gray, 2009, 2017).

Hi ha unes quantes substàncies elementals que, en condicions estàndard de pressió i temperatura, són gasos incoloros: tots els gasos nobles (heli, neó, argó xenó i criptó), l'hidrogen, el nitrogen i l'oxigen.

En els halògens observem una gradació de forces de cohesió i també de color que augmenta amb el nombre atòmic (fig. 7). El fluor és un gas de color groc pàl·lid, el clor és un gas de color groc verdós, el brom és un líquid de color vermellós i el iode és un sòlid molt fosc i brillant que sublima fàcilment passant a gas, de color lila intens. Podem relacionar les forces de cohesió entre molècules i l'estat físic a condicions estàndard amb la magni-

tud dels dipòls momentanis que es formen en les molècules per desplaçament dels centres de la càrrega elèctrica de nivell atòmic. Tant la càrrega elèctrica com la distància entre càrregues és més gran per als àtoms de nombre atòmic més gran i, en conseqüència, el moment dipolar creix amb el nombre atòmic i, amb ell, les forces intermoleculares. El fluor té les molècules més lliures que el iode. El color de cada substància dependrà de l'absorció de radiació visible de nivell molecular, que té a veure amb el nombre d'electrons i la seva distribució en els orbitals atòmics i moleculars. Per això observem que en el grup dels halògens les bandes d'absorció augmenten a mesura que creix el nombre atòmic.

En condicions estàndard, només les substàncies simples brom i mercuri es troben en estat líquid. Però si la temperatura ambient és per sobre de 30°C, hi ha dos metalls, concretament el cesi, que fon a 28,44°C, i el gal·li, que fon a 29,8°C, que són líquids d'aspecte platejat.

En tota la taula periòdica hi ha poques substàncies elementals acolorides. Les més destacades són les formes al·lotròpiques del fòsfor, de l'arsènic, de l'antimoni, del sofre i del seleni. I, a més, el iode, l'or, el coure i el brom.

Les diverses substàncies simples que mostren color diferent al de l'escala de grisos: clor, gas groc-verdós; coure, sòlid vermellós i brillant; brom, líquid marró vermellós; or, sòlid daurat i brillant; fòsfor, al·lotrops blanc, vermell, porpra, lila i negre; arsènic, al·lotrops groc, gris i negre; antimoni, al·lotrops blanc, groc i negre; sofre, al·lotrops grocs; seleni, al·lotrops vermell, negre i gris.

## Elements amb nom de color

Molts elements descoberts a partir de 1750 se'ls anomenà en relació al color dominant dels seus compostos. En implantar-se l'espectroscòpia, alguns elements descoberts per aquesta tècnica porten el nom del color de les ratlles més brillants dels seus espectres d'emissió.

El rubidi va ser descobert per anàlisi espectroscòpica, que Bunsen i Kirchhoff havien perfeccionat a Heidelberg pels volts del 1860. *Rubidius* en llatí significa vermell. El vermell fort és el color de la flama de les sals de rubidi.

El cesi també va ser descobert per Bunsen per espectroscòpia. La paraula *caesia* fa referència al color del cel blau. Blau cel o blau verd és el color de les ratlles més intenses del seu espectre d'emissió.

El zirconi és el metall descobert per l'alemany Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) en la pedra preciosa zircó, formada majoritàriament per  $ZrSO_4$ . El nom de zircó prové de la paraula persa *zargun*, que significa daurat.

El vanadi forma compostos de molts colors diferents. La deessa escandinava de la bellesa i la fertilitat era Freija o Freja, que també s'anomenava Vanadis, per pertànyer al llinatge dels vanir o vanes. De Freija deriva el nom del divendres en moltes llengües europees (Freitag). El vanadi rep aquest nom per la preciositat dels colors dels seus compostos.

El crom va ser anomenat pel seu descobridor Nicolas-Luis Vauquelin a partir de la paraula grega *khroma* que significa color, per la diversitat de colors dels seus compostos i la possibilitat de fer-ne pintures.

Rodi, significa rosa en llatí. El seu clorur és de color rosa.

Iridi, referent a la irisació del seu esclat metàl·lic. La deessa Iris dona nom a l'arc iris o arc de sant Martí, el desplegament de colors de la llum solar.

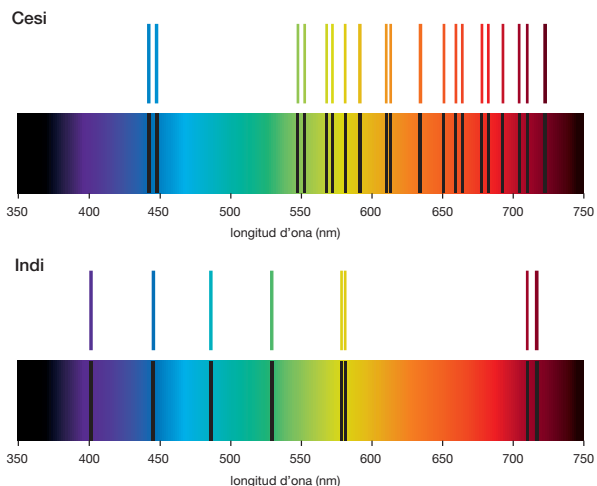
Indi, descobert per espectroscòpia pel treball conjunt de Ferdinand Reich, que curiosament era daltònic, i Theodor Richter, també alemany com Reich. Posteriorment, l'indi va ser aïllat en estat pur per Richter. El seu nom es deu al color porpra dominant en el seu espectre (fig. 8). Indi és el nom del colorant porpra també anomenat anyil.

Tal·li, va ser descobert el 1861 per espectroscòpia de flama per l'anglès William Crookes i el francès Claude-August Lamy. Lamy va aconseguir aïllar-lo el 1862. El nom de tal·li prové de la ratlla verda dominant a l'espectre. És el color dels brots verds, del grec *thallos*.

Bismut, de l'alemany *wismutt* o *weisse masse* i del llatí *bisemute*, nom que significa massa blanca. Es refereix als seus compostos de color blanc.

El nom del lode prové del grec *iodes* que significa color lila. Es refereix al color de l' $I_2$  en estat gasós. El sòlid, de color molt fosc i brillant, sublima fàcilment i es transforma en gas de color lila.

Actini, nom que significa radiant.



**Figura 8.** Espectre d'absorció i emissió del cesi i de l'indi, descoberts el segle XIX. Ratlles blaves dominant en el cesi i ratlles liles dominant en l'indi.

Radi, nom equivalent a raig, per la radiació que emet, atès el seu caràcter radioactiu.

Praseodimi, el nom prové de *prasios dydimos* que significa bessó verd. Va ser descobert juntament amb el neodimi, el nou bessó, i es relaciona amb el color verd de l'òxid que es forma en la seva superfície.

Fòsfor, la paraula prové del grec *fos foros*, que significa portador de llum. Va ser descobert a finals del segle XVII a partir de sediments d'orina, obtinguts per evaporació de grans quantitats de líquid. Rep el seu nom per la propietat d'emetre llum en plena foscor després d'haver estat il·luminat amb llum solar, fenomen que a partir d'aleshores coneixem com a fosforescència.

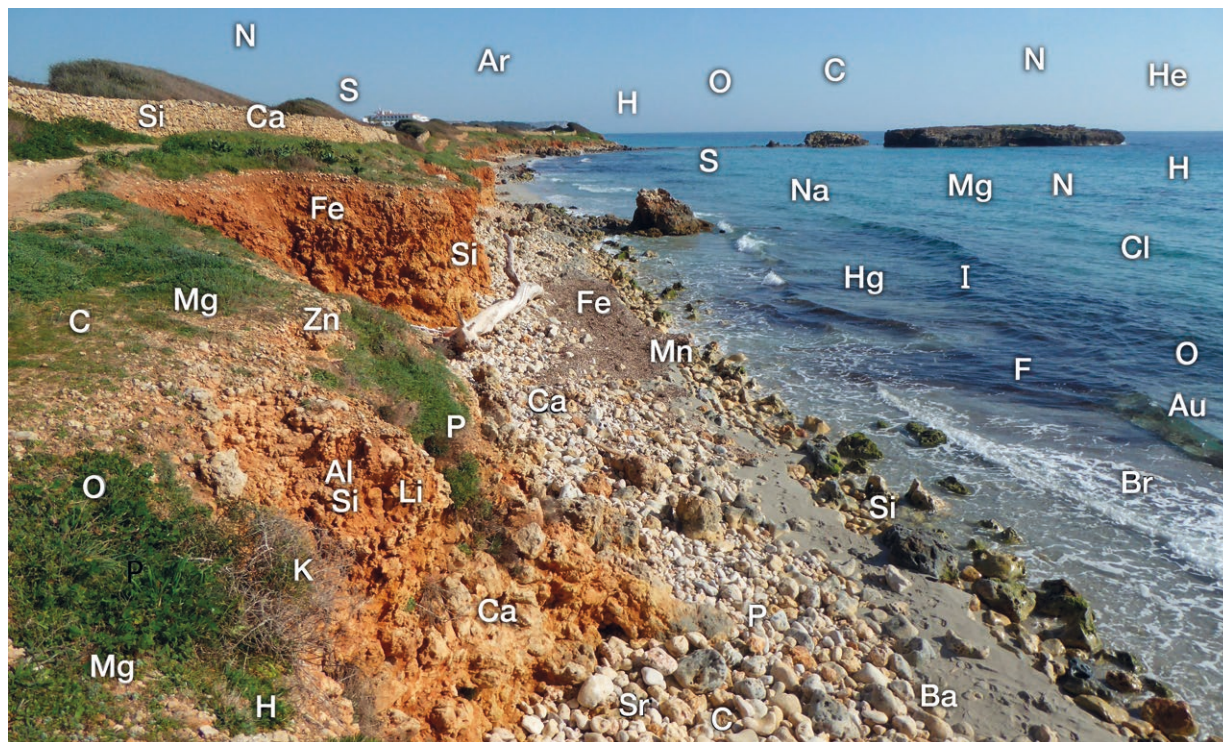
Beril·li, va ser descobert el 1789 per Vauquelin, però no va ser aïllat fins el 1828 per Wöhler. El nom deriva del mineral beril, ja conegut antigament. El nom original d'on prové *beryllos* significa pedra preciosa amb brillantor pàl·lida, color d'aigua de mar.

## Els colors dels focs artificials

Els colors de les bengales i dels focs artificials s'aconsegueixen aportant energia calorífica a les substàncies que es posen incandescentes i que, en presència de l'oxigen de l'aire i altres oxidants, desprenen gran quantitat de llum.

En la composició bàsica dels coets hi trobem com a mínim quatre tipus de components.

Els metalls en pols, que inicialment donen llum pel fet de posar-se incandescentes, però tot seguit en donen molta més quan, amb l'energia d'activació suficient, entren en combustió i desprenen llum i calor. Els metalls que se solen utilitzar en coets i bengales són l'alumini i el magnesi que donen un color platejat, el titani que emet un blanc més intens i el ferro que el veiem de color vermellós. Si es barreja pols de ferro i de titani s'obté una incandescència de color ocre.



**Figura 9.** Química amagada en els colors del paisatge. Fotografia i composició de l'autora.

En els focs artificials, els nitrats i els clorurs de metalls, que són sals fàcilment ionitzables, fan petites flames dels colors característics de cada metall. Les sals d'estronci emeten color vermell; les de bari, color verd; les de coure, color blau; les de calci, color ataronjat i les de sodi, color groc. La barreja de coure i estronci dona color porpra.

La resta de components indispensables perquè els coets funcionin són l'aglutinant i els iniciadors de la combustió. Generalment s'utilitza la dextrina com a aglutinant i la pólvora com a combustible. Per últim, els nitrats, clorats o perclorats se solen utilitzar com a oxidants.

Els colors que observem en els focs artificials són els que observariem en el laboratori en una anàlisi espectroscòpica dels cations metàl·lics. No és res més que l'emissió de llum dels ions metàl·lics que es troben en l'estat excitat per l'escalfor de la combustió inicial.

### **Els colors de terres, pedres precioses i altres gemes**

Ens sorprenem pels colors del paisatge i ens emocionem davant de la riquesa cromàtica, no tan sols pels colors variants del cel i de la vegetació sinó també per l'espectacularitat de determinades formacions geològiques.

Una de les formacions més sorprenents és la de Danxia, a les muntanyes de Qilian, en la província xinesa de Gansu. Té estrats ben diferenciats de colors vermell, ataronjat, ocre, groc, verd, blau i gris. L'antiguitat d'aquesta formació es con-



**Figura 10.** Els colors de la formació geològica de Danxia a les muntanyes de Qilian, en la província xinesa de Gansu (Foto: Han Lei You, CC BY-SA 3.0).

sidera d'uns 24 milions d'anys. Té una extensió de 520 km<sup>2</sup>, que ha pogut mantenir-se al llarg del temps perquè es troba en una zona d'escassa pluviositat (fig. 10).

Un paisatge molt semblant es troba a Perú, a les muntanyes de Vinicunca. Popularment s'anomenen les muntanyes de l'*Arco Iris* pels seus colors gris, marró, verd, ocre roig, groc i blau. Es troba a uns 100 km de Cuzco, prop del pic Ausungat de 6372 m, dins la cordillera de Vilcanota.

Hi ha terres de colors que han estat explotades com a matèries primeres per obtenir pigments, ceràmiques o materials de construcció. A Provença, podem resseguir *Le sentier des ocres*, prop del poble de Roussillon. Fins a finals del segle XIX, des de les muntanyes de Luberon, s'han exportat

els seus ocres arreu. En el seu museu es recorda com els ocres també s'han utilitzat en tintura de fibres naturals. Els tannats de ferro, que s'obtenen barrejant tanins amb els òxids del fang, són una de les tintures més antigues que es coneixen.

En la mateixa situació es troba la terra d'Arnhem al nord d' Austràlia, amb mines que van ser explotada fins a principis del segle XX. Allà es troben pintures rupestres fetes amb combinacions d'ocres que probablement tenen una antiguitat propera als 50.000 anys.

Sinope, localitat turca prop del mar Negre, exportava el sinope segellat, ocre preparat per al comerç que es marcava amb un segell. El terme sinòpia inicialment significava ocre roig i posteriorment es va estendre el seu significat al dibuix que es feia en vermell per esbossar una pintura mural.

L'element químic que es repeteix en tots els ocres és el ferro en els seus diferents estats d'oxidació formant òxids, hidròxids, silicats, carbonats, i va acompanyat d'altres metalls en menor proporció.

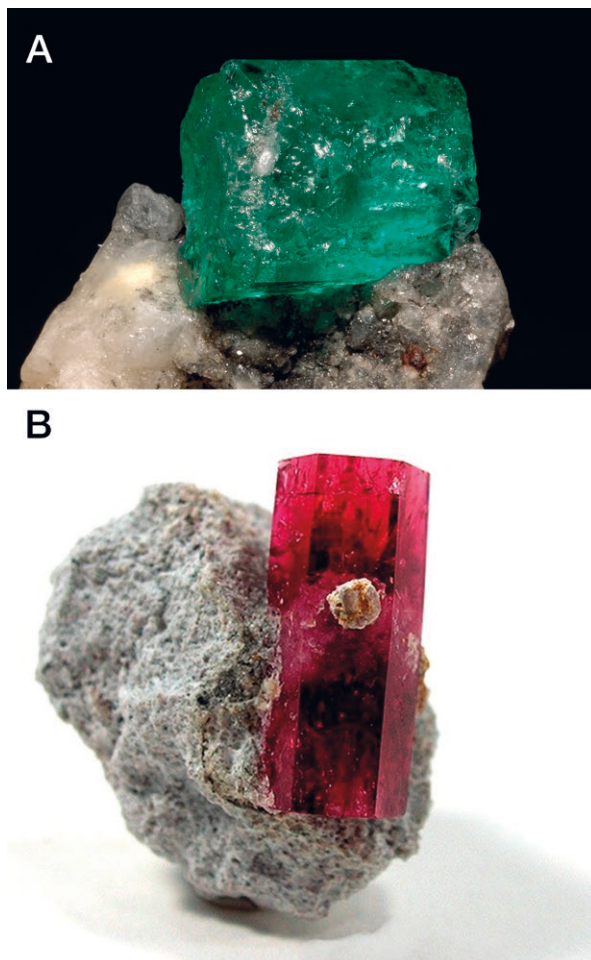
Diamant, el seu nom deriva de la paraula *adamas*, que significa indomable. Per la seva estructura tan compacta, el cristall del diamant és molt poc contaminat (Wilczek, 2015). El cristall totalment pur és transparent i incolor, però les petites impureses poden donar-li color. El bor i el nitrogen són de les poques impureses que té pel fet que tant els àtoms de nitrogen, com els de bor i com els d'hidrogen es poden introduir en la seva estructura cristal·lina. La gamma de colors que el diamant pot adquirir segons la proporció de les impureses és molt variada. A part dels diamants incolor, blaus i grocs, també s'han trobat diamants de color marró, verd, lila, rosa, taronja i vermell. Les impureses de bor li donen el color blau, les de nitrogen donen color groc.

Robí, pertany al grup dels corindons amb una duresa de 9 en l'escala de Mohs. És un òxid d'alumini amb algunes substitucions de l'alumini per  $\text{Cr}^{3+}$  i  $\text{Fe}^{3+}$ . Aquests elements de transició són els que li donen el color. El color més vermellós del robí es deu al crom i el ferro el matisa cap a ataronjat.

Maragda, pertany al grup dels berils, que són silicats d'alumini i beril·li, amb substitucions de part dels ions alumini per ions de crom o de vanadi. El color verd intens (fig. 11A) es deu als ions  $\text{Cr}^{3+}$  i la tonalitat blavosa la causen els ions  $\text{V}^{3+}$ , que són menys abundants. També hi ha maragda roja (fig. 11B), que conté  $\text{Mn}^{3+}$  i maragda rosa, que conté  $\text{Mn}^{2+}$ .

Safir blau, també de la família del corindó té una duresa de grau 9 en l'escala de Mohs. És òxid d'alumini, amb altres òxids metàl·lics de  $\text{Fe}^{2+}$  i  $\text{Ti}^{2+}$ . El color blau es deu al titani.

Podríem dir que la bellesa dels colors de les pedres precioses es deu als ions intrusos que trenquen la puresa de l'ordre existent en les seves xarxes cristal·lines. És a dir, són cristalls amb impureses.



**Figura 11.** Dos colors de la maragda (Fotos: A, domini públic; B, Rob Lavinsky, CC BY-SA 3.0).

Granats, tots ells són silicats de fórmula  $\text{X}_3\text{Y}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  on els ions X poden ser Ca, Fe, Mn o Mg i els ions Y poden ser Al, Cr o Fe. L'almandí, de color molt fosc, és un granat d'alumini i ferro amb una part de magnesi, manganès o calci. L'andradita és un granat de calci i ferro amb parts de crom, de color que va des de groc a negre, passant per verd maragda. L'espesartita és un granat d'alumini i manganès amb substitucions de ferro, de color groc carbassa. La grossulària és un granat d'alumini i magnesi amb parts de Cr i Fe, de color entre el roig i el lila. La uvarolita és un silicat de Ca i Cr, de color verd maragda.

En la gamma de colors dels corindons, dels berils i dels quars, observem uns patrons de color que es deuen a la presència d'ions de metalls de transició: els ions ferro (III) per als colors ocre, els ions ferro (II) per als verdosos, els ions coure (II) per als blaus i verds, els ions cobalt (II) per als blaus i roses, el manganès (II) i manganès (III) per als roses, el manganès (IV) per al negre, l'or (III) per al vermell, el cadmi(II) per al groc i ataronjat. Ara bé, la força del camp cristal·lí circumdant influeix en les transicions electròniques d-d i en les transferències de càrrega dels metalls de transició. El

mateix crom (III) és el causant del color verd de les maragdes i del color vermell del robí ja que en el robí el camp cristal·lí més intens causa transicions d per una banda d'energia més ampla. (Ball, 2001).

Algunes gemmes no presenten diversitat de colors ja que no deuen el color a les impureses sinó al compost químic majoritari, són idiocromàtiques. El peridot és  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{SiO}_4$ , de color verd oliva amb tonalitat més o menys intensa. El jade és un silicat de calci, magnesi i ferro, de color verd. La malaquita és el dihidroxicarbonat de coure (II), de color verd. La turquesa és de color blau, pel fosfat bàsic d'alumini i coure. El blau de cobalt és format per l'òxid doble d'alumini i cobalt (II) o aluminat de cobalt,  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ .

Un cas especial és el color del quars fumat (fig. 12), que es deu a la substitució d'alguns ions  $\text{Si}^{4+}$  per la suma d'ions  $\text{Al}^{3+}$  i un dels ions monopositius  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  o  $\text{H}^+$ . Però simplement la presència d'aquest tipus d'ions com a impureses no explicaria l'aparició de color ja que, per seves estructures electròniques, es caracteritzin per donar composts incolors. Per ressonància electrònica paramagnètica (EPR) s'ha demostrat la presència de radicals lliures de tipus  $[\text{AlSiO}_4/\text{h}^+]$  en els cristalls de quars fumat. Les proves de laboratori amb calor i radiació gamma confirmen que el quars fumat pot haver-se generat en l'interior de la Terra per formació de radicals lliures en el si dels seus cristalls, quan estaven sotmesos a calor i radiació ionitzant procedent de materials radioactius circumdants (Martins i Soares, 2005).

### Els colors dels vidres, vitralls i ceràmiques

La tècnica de fer vidre és coneguda des de l'antiguitat. Disposem de vidres egipcis i vidres romans molt antics. Conservem petits objectes domèstics i grans vitralls de catedrals gòtiques, on podem valorar fins a quin punt els mestres vidriers dominaven la tècnica de fer vidres transparents i de colors vistosos (fig. 13).

El color ha acompanyat sempre la producció de vidre, primer per manca de coneixement sobre com produir vidres incolors i, posteriorment, cercant la bellesa dels colors. Ja els egipcis utilitzaven l'òxid de coure modificat amb òxids de ferro i de manganès per acolorir el vidre i els vidriats de la ceràmica. (Phillips, 1948)

La sorra i gairebé mig centenar de components minoritaris es barregen al forn per efectuar la vitrificació. Com que el punt de fusió de la sílice és  $1700^\circ\text{C}$ , s'hi afegia sosa per fer de fundent i rebaixar el punt de fusió i així el vidre es podia obtenir en un forn de carbó. Primerament s'emprava el carbonat de sodi i posteriorment, cap el 1300 aC, la calç viva va reemplaçar la sosa. La composició bàsica del vidre és, doncs, sílice, calcària i àlcals de sodi i de potassi, silicats de calci i de sodi. Si la proporció de  $\text{SiO}_2$  és molt elevada el punt de fusió de la mescla serà molt alt i es requerirà un forn molt potent.



**Figura 12.** Cristall de quars fumat de la col·lecció del col·legi Maristes Valldemia de Mataró (Foto: Martí Mataró en l'exposició *Ciència viscuda* del Museu de Mataró).

Els vidres antics tenien la coloració verdosa per la presència dels ions ferro inclosos en la sorra. A vegades tenien color blau per les impureses dels ions coure i cobalt. Per compensar el color verd s'afegia diòxid de manganès o de seleni. Per aclarir el vidre també s'hi afegia estany. El plom i l'antimoni produïen vidres de color groc. Les impureses d'or causaven el color vermell.



**Figura 13.** Vitralls de la basílica de Saint Denis. Segle XII. (Foto: domini públic).

El blau de les ceràmiques àrabs contenia sals de cobalt procedents de Pèrsia. Els compostos de cobalt també han estat la base dels secrets del color blau de la porcellana xinesa i el blau precios dels vitralls i de les porcellanes europees.

Pot interessar que les ampolles siguin fosques per preservar el contingut interior dels efectes nocius de la radiació incident. Encara avui, el  $\text{Fe}^{3+}$  i el  $\text{Cr}^{3+}$  són els ions que donen color a les ampolles verdes. En canvi el color ambre s'obté amb sofre, ferro i carboni.

Els causants de color en els vidres tradicionals han estat: blau, el  $\text{CuO}$  o bé el  $\text{CoO}$ , segons l'antiguitat del vidre; verd, el  $\text{FeO}$ ; verd fosc, el  $\text{Cu}_2\text{O}$ ; grog mel, el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; grog opac, els compostos d'antimoni; vermell opac, el  $\text{CuO}$ ; porpra o ametista, el  $\text{MnO}$ ; blanc opac, el  $\text{SnO}$ ; negre, grans quantitats de  $\text{Fe}$ ,  $\text{Cu}$  i  $\text{Mn}$ ; incolor, petites quantitats de  $\text{MnO}_2$ .

Colors dels vidres actuals, en relació als ions metàl·lics que contenen:  $\text{Fe}^{2+}$ , color verd;  $\text{FeS}$ , color marronós;  $\text{Cu}^{2+}$ , color blau;  $\text{Cr}^{3+}$ , verd;  $\text{Ni}^{2+}$ , color gris;  $\text{Au}^{3+}$ , color vermell intens;  $\text{Cu}^{2+}$  i  $\text{Sn}^{2+}$ , color vermell porpra;  $\text{Mn}^{2+}$ , color lila;  $\text{Cu}^{2+}$ , color blau;  $\text{U}^{2+}$ , color verd;  $\text{Nd}^{2+}$ , color fúcsia;  $\text{Er}^{2+}$ , color fúcsia;  $\text{Sc}^{2+}$  i  $\text{Cd}^{2+}$ , color granat;  $\text{CdS}$ , color groc.

## Pigments i colorants

Al llarg dels segles, acumulant els sabers dels homes i les dones que han experimentat amb les substàncies acolorides, els humans hem après a obtenir pigments i colorants. Primerament es tractava d'obtenir de la natura substàncies amb el color prou estable, concentrar-les i fer-ne pols. Amb el temps hem après a separar les substàncies pures acolorides a partir de tractament físic i químic de matèries minerals i d'extractes de vegetals i d'animals. Hem aïllat les substàncies pures i hem identificat la seva composició i estructura química. A partir de la segona meitat de segle XIX, no tan sols hem après a sintetitzar substàncies acolorides que ja existien a la natura sinó que els equips de recerca, coordinats amb l'enginyeria de fabricació, han sintetitzat compostos nous, útils com a colorants i com a pigments. Entre els pigments i colorants de síntesi, fruit dels progressos de la química del segle XIX, podem ressaltar el blau ultramar, el cromat de plom, el sulfur de cadmi, la malveïna, l'alitzarina i l'anyil.

Fem un repàs dels principals pigments i colorants que han estat la base de les pintures i tintures tradicionals des dels que s'obtenien per mètodes artesanals a partir de minerals, animals o vegetals.

## Pigments i colorants negres

El *khol*, a base antimoni polvoritzat finament, s'utilitzava per a maquillatge d'ulls i cara, per protecció i per tatuatge. Està documentat el seu ús en camuflatge, en dibuixos de cerimònies, com

senyal de dol o de guerra. En alguna època s'ha utilitzat plom i fins i tot plata per dibuixar. Els òxids de ferro i de manganès són presents en les terres d'ombra, que provenen de la regió italiana d'Umbria.

La presència de carboni dona el color negre al carbonet detectat en les pintures rupestres, el negre de fum de la tinta xinesa i el grafit de les mines de llapis. A Egipte, per pintar es feia servir el negre de carbó vegetal i el sutge. El betum, el sutge i el quitrà, tots són materials negres que no hem deixat d'utilitzar.

Entre els colorants més o menys foscos procedents de vegetals i animals també s'ha utilitzat la tinta de sípia, el pal de tinta o de Campetxe, les agalles i l'escorça de molts d'arbres i la pell de les nous.

Una altra manera d'aconseguir un bon color negre en tintura és per superposicions en tintades successives de colorants blau, vermell i groc. El resultat de la tintura amb anyil, seguida de gransa i de safrà, aconsegueix una bona absorció de tots els colors. En aquesta tècnica també s'ha utilitzat el pal de tinta.

## Pigments i colorants blaus

El blau egipci, trobat en tombes egípcies, s'ha datat el seu ús des dels 2300 aC fins a finals de l'Imperi Romà. El seu color s'explica per la composició química que s'aconsegueix en la vitrificació de tetrasilicat de calci i coure, el  $\text{CuCaSiO}_4$ . Se sintetitza escalfant fortament un compost de calci (calcita) i un compost de coure (malaquita) amb el carbonat de sodi i sorra.

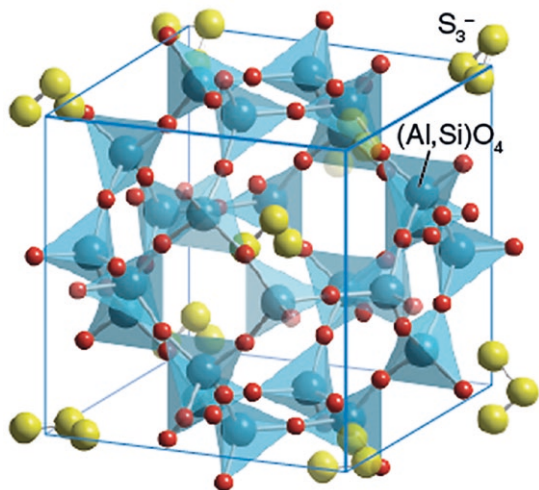
El blau ultramar és el pigment que s'obté a partir de les porcions minerals més acolorides del lapislàtzuli, que són les que corresponen a la latzurita, triturant-les finament. El lapislàtzuli provenia d'Afganistan i, via Orient Mitjà, arribava fins el port de Venècia. És per això que al pigment se l'anomenava blau ultramar.

El seu color blau resisteix perfectament el medi bàsic però, quan es posa en contacte amb medi àcid, el color desapareix i es desprèn una olor forta d'àcid sulfhídric.

La fórmula de la latzurita és  $3\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 2\text{Na}_2\text{S}$ . En contra del que podria semblar a primer cop d'ull, la latzurita no conté cap metall de transició en la seva composició. El color blau del lapislàtzuli correspon a l'espectre d'absorció del sofre en forma de  $\text{S}_3^{2-}$ . Actualment hem pogut identificar l'estructura cristal·lina i hi reconeixem els radicals  $\text{S}_3^{2-}$  ordenats regularment amb els altres components (fig. 14).

Com el blau ultramar resultava molt car, freqüentment trobem pintures on es complementava amb atzurita, mineral de coure molt més barat.

El 1826, el francès Jean Baptiste Guimet i, dos anys més tard, l'alemany Christian Gmelin van inventar el procés d'obtenció del blau ultramar sintètic. Actualment la producció d'aquest



**Figura 14.** Estructura del blau ultramar. En groc, es representen els radicals trisulfur, amb un electró desaparellat, que són els causants del color (imatge: N. Greeves CC BY-SA 2.0-UK).

pigment és barata. És el blauet que s'ha utilitzat per emblanquir roba i paper, compensant els tons groguencs. S'utilitza en pintura (el blau que va patentar el pintor Yves Klein), i per donar color a detergents, materials de construcció i plàstics.

L'atzurita, com la malaquita, és un carbonat bàsic de coure. S'ha utilitzat en pintura i en maquillatge d'ulls. El problema en pintura és que amb el temps el color blau pot degenerar a verd malaquita.

El blau de cobalt de les porcellanes i el blau dels vitralls gòtics era un secret ben guardat. A l'edat mitjana no s'havia descobert el cobalt, però aquells vitralls blaus que contenien sals de cobalt són els que han mantingut tota la intensitat del color al llarg dels segles.

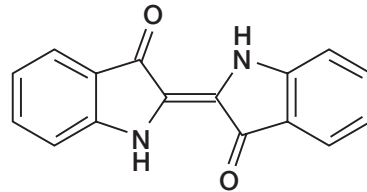
Anyl o indi. Les plantes tintoreres van ser la font principal dels colorants blaus fins que, a partir de la segona meitat del segle XIX, van aparèixer els colorants de síntesi. La *Indigofera tinctoria* i altres varietats d'*Indigofera* es conreen a Índia i Sumatra. Les fulles fermentades i tractades adequadament experimentaven la transformació de l'indican a indoxil i per oxidació passava a indi. El pastell o glast, la *Isatis tinctoria*, és una planta tintorera que a l'Edat mitjana i fins a finals de segle XIX va ser conreada a Europa per produir el colorant blau. Tolosa de Llenguadoc era la capital del pastell, la planta *Isatis tinctoria* de la qual s'obtenia el cèlebre blau de Toulouse. La producció d'indigotina sintètica va ensorrar l'economia basada en grans plantacions de tintoreres.

### Pigments i colorants vermells

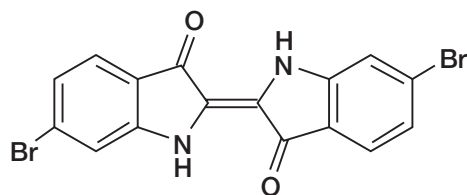
L'ocre vermell és el primer pigment vermell i el més opac dels pigments.

El cinabri és el sulfur de mercuri. Prop d'Almadén s'han trobat pintures prehistòriques amb

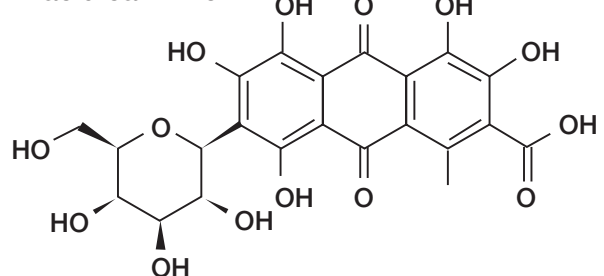
anyil



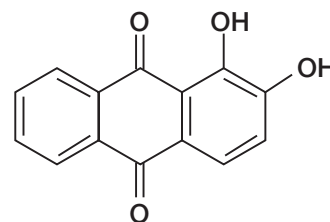
porpra de Tir



àcid carmínic



alitzarina



**Figura 15.** Fórmules moleculars d'un pigment blau, l'anyil i tres pigments vermells, el porpra de Tir, el carmínic i l'alitzarina.

vermelló. És el vermell dels frescos de Pompeia i Herculano i el dels tallers dels miniaturistes medievals.

El mini és l'òxid de plom (II) i plom (IV),  $Pb_3O_4$ . Existeix com a mineral i es pot obtenir per l'efecte de la calor sobre el carbonat de plom. Pel seu color els romans l'utilitzaven juntament al cinabri.

Porpra de Tir, un colorant de la família de l'indi és el porpra que s'extreia de la mucositat glandular del cargol de mar *Murex brandaris*. De 12.000 moluscs s'obtenien uns 1,5 grams de colorant.

Pal de Brasil, anomenat en portuguès *pau brasil*, o pal de color de brasa, ja que el colorant vermell s'extreia de la fusta de diverses espècies d'arbres del gènere *Caesalpinia*. Segons el mor-

dent emprat a la tintura es podia obtenir diferents colors (Rico, 1999).

La henna o alhenya, que encara s'utilitza per acolorir els cabells i la pell és el colorant que s'obté de l'arbust *Lawsonia inermis*, triturant les fulles i la tija.

El carmí deriva el seu nom dels insectes *kermes*. A més dels *kermes*, s'han explotat una gran varietat d'insectes, com les cotxinilles o caparretes del cactus nopal. Segreguen un líquid vermell contra els depredadors, que conté l'àcid carmínic. El carmí és la sal soluble de l'àcid carmínic.

L'alitzarina s'extreia de les arrels de la gransa o rogeta. És la *Rubia tinctorium*, que en el món àrab es coneixia com a *alizari*. Es tenyien les robes amb mordents metàl·lics per donar solidesa i color viu a la tinció.

El 1820 Jean Jaques Colin i Pierre Robiquet van separar i purificar l'alitzarina. El 1869, arriba la guerra de patents per produir industrialment l'alitzarina sintètica (Ball, 2001). La seva comercialització va posar fi a les plantacions de gransa.

### Pigments i colorants grocs

L'orpiment és el sulfur d'arsènic. Etimològicament significa pigment d'or pel seu color groc. S'utilitzava per pintar pergamins malgrat la seva toxicitat.

El groc de Nàpols, és l'antimonat de plom, obtingut el segle XVII a partir d'un material que es recollia a la falda del Vesuvi. Més tard es trobà la manera de fabricar-lo per fusió de matèries primeres que contenen antimoni, potassi, plom i clorur de sodi.

Un groc important a finals de segle XVIII és el *Patent yellow*. El 1770 Scheele obté oxiclurur de plom, groc clar. El 1780 es patentà com a pigment groc a Anglaterra i també es produïa a França.

També se sintetitza el cromat de plom. El 1765 Vauquelin va descobrir el crom i va proposar el cromat de plom com a pigment. El 1816 es munta la primera fàbrica de colors de crom a França i el 1822, a Manchester.

Els colors de cadmi se sintetitzen després que el cadmi fos descobert el 1817 per Stromeyer, professor de Gotinga, quan va analitzar una mostra sospitosa d'òxid de zinc medicinal, anomenat calamina. El nom de cadmi és derivat de calamina. El color dels pigments de CdS depèn de les impureses i pot ser verd clar, groc, taronja, vermell intens o vermell fosc. Segons la quantitat de Se que substitueixi al S, el color canvia a marró, taronja o vermell. Actualment ja no es barregen compostos de Cd a les pintures i a les tintes per la seva toxicitat.

El groc indi, s'obtenia a partir de l'orina de vaca que s'havia alimentat amb fulles de mango.

El safrà és el colorant que s'extreu del safrà dona un groc molt estable i valorat en el món àrab.

La cúrcuma era originària de l'Índia. Barrejant cúrcuma amb anyil s'obté el color verd.

De la gandalla o galda, la planta *Reseda luteola*, s'extreu el colorant groc de les seves arrels. És un tint molt resistent, que fins el segle XIX s'ha explotat a tota Europa. Barrejat amb blaus pot donar lloc a verds brillants.

La gutagamba és la resina de l'arbre *Garcinia hanburyi* que s'extreu de manera semblant al cautxú.

### Pigments i colorants verds

Els pigments verds i sobretot els colorants verds estables han estat difícils d'aconseguir. Hi ha pocs minerals verds idonis per fer pigments i pocs colorants que resistixin l'acció de la llum el calor i els agents químics.

Les terres verdes contenen argiles verdes amb clorita, glaucònia i celadonita. El verd veronès o verd bentònic s'obtenia de les terres verdes prop de Verona. Conté silicats i carbonats i s'hi detecten els elements Si, O, Mg, Al, S, Ca, Fe i K.

El blau malaquita era malaquita polvoritzada, carbonat bàsic de coure. Molt estable a la llum. Des del segle III aC fins el segle V dC també va servir per fabricar tintes.

El verdet o llepó, és l'acetat de coure (II), amb òxid i hidròxid, que es forma en la superfície de coure i els seus aliatges. És verinós i es pot utilitzar com a fungicida. Pigment molt utilitzat fins el s. XIX en pintura a l'oli.

Verd viridiana o verd anglès, és òxid de crom (III). És el color de les finestres angleses.

Malgrat l'abundància de la clorofil·la, que no és bona ni per pintar ni per tenyir, hi ha tan pocs pigments verds que s'ha hagut de recórrer a la barreja de blau i groc per aconseguir el color verd. Cap a mitjans del segle XVIII, es van difondre les receptes de tenyir en dos banys consecutius, primer amb indi i després amb galda. Els teixits verds es venien més cars per la dificultat de tenyir-los bé. A la llarga els teixits perdien el groc i es tornaven blaus.

S'ha tenyit amb barreja de blau indi i groc de galda o de safrà o de cúrcuma. Els indis d'Amèrica del Nord feien bullir els teixits amb cicuta i l'òxid de coure que obtenien de monedes velles.

Com a pigments verds a Índia, a part de malaquita, s'emprava indi amb ocre groc i, també, lapislàtzuli amb orpiment. A Xina, es barrejava malaquita amb orpiment. A Mèxic, a Teotihuacan, entre els anys 300 i 650, van realitzar frescos amb malaquita barrejada amb guix per aclarir-li el to.

Un aprofundiment en els coneixements científics actuals ens permet explicar científicament el color més enllà de la composició centesimal i la configuració electrònica dels elements que formen cada substància. Els avenços en espectroscòpia i en química estructural relacionen l'absorció i emissió de cada tipus de radiació amb els canvis produïts a nivell atòmic en l'interior de les estructures cristallines i en les complicades molècules orgàniques.

## Conclusió

Tant els colors de les substàncies incandescentes o en combustió, com els colors dels minerals, les gemmes, els vidres, els pigments i els colorants depenen de la composició elemental, però també de les transicions electròniques permeses a nivell atòmic i molecular i la seva capacitat d'interacció amb la llum. Podríem dir metafòricament que els colors de les substàncies tenen les seves arrels en els elements de la taula periòdica.

## Bibliografia

- Aldersey Williams, H. 2013. *La tabla periòdica. La curiosa història de los elementos*. Ariel, Barcelona.
- Ball, P. 2001. *La invención del color*. Turner, Fondo de cultura econòmica.
- Brock, W.H. 1992. *Historia de la química*. Alianza editorial. 1998.
- Delamare, F., Guineau, B. 1999. *Los colores*. Ediciones B. 2000.
- Finlay, V. 2002. *Colores*. Ed. Oceano. 2004.
- Gray T. 2009. *The elements. A visual exploration of every known atom in the Universe*. Black dog and Leventhal publishers. Inc. New York, USA.
- Gray T. 2017. *The photographic periòdic table of the elements*. Consultat el 20 octubre 2019 des de <http://periodictable.com/index.html>
- Martins Nunes, E.H., Soares Lameiras, F. 2005. The optical absorption of gamma irradiated and heat-treated natural quartz. *Materials Research*, 8(3): 305-308. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000300014>
- Phillips, C.J. 1948. *El vidrio, artifice de milagros*. Ed. Reverté, Barcelona.
- Robinson A. (coord.). 2013. *Los grandes científicos. Una epopeya del descubrimiento*. Lunwerg editores, Barcelona.
- Font, J. 2017. Naturalesa de la llum. Una breu introducció a la fotoquímica. *L'Atzavara*, 27: 5-18.
- Salvador, N., Butí, S., Pradell, T. 2007. La química de l'art. *Revista de la Societat catalana de Química*, 8: 29-37.
- Serra i Camó, L. 2017. La llum, els ulls i l'evolució. *L'Atzavara*, 27: 65-76.
- Rico Arce, L. 1999. El palo de Brasil. *Ciencias*, 54, abril-junio, 42-44. Consulta 30 setembre 2019 des de <https://www.revistaciencias.unam.mx/en/105-revistas/revista-ciencias-54/886-el-palo-de-brasil.html>
- Wilczek, F. 2015. *El mundo como obra de arte*. Crítica, Ed. Planeta, Barcelona.