



Concepció Arenas

L'exactitud que fa funcionar el món

**Per què les ciències exactes són arreu
encara que no ens n'adonem**



Índex

Presentació	9
Capítol 1. El radar i el diagnòstic de malalties	11
Capítol 2. Les formigues i la pintura artística	19
Capítol 3. Les roses polars i les pomes	25
Capítol 4. Llum d'oli, guerres i infermeres	33
Capítol 5. La pòlio i els vells marins.	45
Capítol 6. La figura en l'art i la natura.	57
Capítol 7. El romanesco i els vasos sanguinis	67
Capítol 8. Mozart i els daus	77
Capítol 9. Les cigales i els codis secrets	87
Capítol 10. Els gens i les sabates de cordons	99
Capítol 11. Delinqüència, ciència i justícia	107

Capítol 12. Ordinadors i més ordinadors	121
Capítol 13. Un nom	133
Bibliografia	137

Presentació

«Les llavors dels grans descobriments es troben flotant al nostre voltant,
però només arrelen en aquelles ments ben preparades per rebre-les.»

JOSEPH HENRY¹

Vivim en un món en crisi. Sentim parlar contínuament de la crisi econòmica, de la crisi dels valors humans, de la crisi de la sostenibilitat dels recursos naturals... Moltes persones diuen que som en una època en què la cultura i el saber no ocupen un lloc primordial. Les humanitats, la filosofia i la música semblen relegades a un segon pla en els currículums docents. Les ciències tampoc se salven d'aquest desinterès pel coneixement. A vegades sembla que només el benestar personal i immediat té prioritat en aquest món que canvia contínuament a un ritme accelerat. Les persones, en el nostre dia a dia, no tenim temps de gaudir d'una posta de sol, d'un àpat tranquil amb la família, d'una estona de riure amb els amics, de seure a llegir un bon llibre que ens faci viatjar. Vivim en la societat de les comunicacions, dels blogs, del Facebook, de fer-nos una *selfie* i compartir-la a l'instant, però a la vegada ens sentim sols, sense amics de veritat, d'aquells amb qui compartir les bones estones i les que no ho són tant. Podem parlar a

¹ Joseph Henry (1797-1878) fou un físic nord-americà que va descobrir el fenomen de la inducció electromagnètica i va construir el primer telègraf electromagnètic.

l'acte amb persones de l'altra punta del món, però, al mateix temps, sembla que tot es desenvolupi de manera independent sense cap interrelació entre si. Enmig d'aquest enrenou, hi ha res que es mantingui inalterable? Hi ha alguna cosa que es mantingui sempre en equilibri i que no es deixi endur per modes o corrents ideològics? Hi ha res que, per exemple, relacioni els radars i les proves diagnòstiques? Que relacioni les formigues i la pintura artística? La poliomielitis i els vells marins? Les cigales i els codis secrets? Mozart i els daus?

Si existís aquest lligam entre la natura, la pintura, la recerca mèdica, l'arquitectura, la literatura, la música, la física..., és a dir, el saber en tota la seva plenitud, valdria la pena dedicar una estona de la nostra vida a descobrir-lo.

D'això tracta el llibre que teniu a les mans. D'intentar descobrir, com qui segueix la trama d'una novel·la policíaca, si existeix aquest lligam entre totes les branques del saber; i al final, només al final del llibre, li donarem un nom. Un nom que ens permeti referir-nos de forma clara i concisa a aquest lligam, a aquest saber que ens envolta pertot arreu i que ens acompanya, malgrat que no en siguem conscients, durant tota la nostra vida.

Per fer aquest camí, el llibre està dividit en petits capítols, formats per dues parts. En la primera es presenten fets o curiositats del món que ens envolta que, malgrat que no ho sembli, estan relacionats; i en la segona, sota l'epígraf «I a més...», s'analitza amb una mica més de detall què hi ha darrere d'aquests fets i què basteix aquestes relacions.

CAPÍTOL 1

El radar i el diagnòstic de malalties

«Quan tot sembli estar en contra teu,
recorda que els avions s'enlairen amb l'aire en contra i no a favor.»

HENRY FORD

«Els savis no tracten els que ja estan malalts,
sinó que instrueixen els que encara no ho estan.»

Del llibre *Huangdi Neijing*¹

Era un matí tranquil i assolellat de diumenge. La gent estava mandrosa i s'acostava Nadal. De cop, del cel es precipità un infern sobre Pearl Harbor. Havia començat la Segona Guerra Mundial al teatre del Pacífic. Els americans no eren conscients d'un avantatge tècnic que seria crucial en els mesos i anys que vindrien: el radar. D'entrada, els comandaments no en coneixien les potencialitats i els operadors no hi tenien experiència. A més a més, interpretar-ne els senyals no era senzill. Això es va posar de manifest en les primeres batalles entre portaavions, com les del Mar del Corall i de Midway. Els operadors dels centres de combat dels vaixells americans veien senyals

¹ El *Huangdi Neijing*, datat entre els segles III i I aC, és considerat la base fonamental de la medicina tradicional xinesa.

a la pantalla, però no sabien si eren avions enemics que s'apropaven per atacar o dels seus que retornaven d'una missió. Com discernir entre els avions amics o enemics a partir dels senyals que mostrava el radar?

Això mateix és el que passa quan un malalt arriba a una consulta mèdica i el metge li demana de fer-se una prova per tal de tenir un diagnòstic. Com es poden discernir els individus malalts dels sans a partir d'una d'aquestes proves? Com sabem si una prova és millor que una altra? Els radars i les proves diagnòstiques tenen més en comú del que sembla.

Les proves diagnòstiques no són infal·libles i de vegades les diagnosis són incorrectes, ja sigui perquè no es detecta la malaltia o, al contrari, perquè indiquen que sí que es té una malaltia però no és així. Per tant, cal conèixer la bondat de la prova, és a dir, la seva eficàcia, per tal de distingir les persones malaltes de les sanes, igual que calia distingir els avions amics dels enemics. Per saber si una prova diagnòstica és prou fiable, caldrà provar-la en un grup d'individus que sapiguem segur que són malalts i sobre un altre grup d'individus que també sapiguem que no presenten la malaltia. A més, també serà necessària una prova de referència (en el cas dels avions era la comprovació visual del tipus d'avió) i, així, es podrà avaluar el que es denomina *sensibilitat* i *especificitat* de la prova. S'entén per *sensibilitat* la capacitat d'una prova de detectar els malalts, i per *especificitat* la capacitat de distingir els sans. Per tant, el que es busca són proves diagnòstiques amb un alt grau de sensibilitat i especificitat. És a dir, proves amb valors alts de veritables positius (hi ha malaltia i la prova la detecta) i de veritables negatius (no hi ha malaltia i la prova no la detecta); i amb valors molt baixos de falsos positius (no hi ha malaltia però la prova indica que sí) i falsos negatius (sí que hi ha malaltia però la prova diu que no). Les proves amb un grau alt de sensibilitat són útils ja que, d'aquesta manera, si el resultat és negatiu, podrem estar segurs de descartar la malaltia, la qual cosa ens evitarà problemes com la no-detecció de malalties greus però tractables com el càncer o la tuberculosi. També són útils per descobrir la presència d'una malaltia molt poc probable de tenir. D'altra

banda, proves amb una especificitat alta són útils perquè un positiu confirma el diagnòstic i evita errors que poden provocar danys físics, emocionals o econòmics.

Però tornem als avions de la Segona Guerra Mundial. Per donar sentit a les imatges dels radars, es van desenvolupar diferents treballs dins l'àmbit de la teoria denominada de detecció de senyals. Aquesta teoria avalua la capacitat dels aparells per distingir si una marca (senyal) en l'aparell (radar) és un senyal amic, enemic o simplement soroll. L'habilitat per fer aquesta distinció es va anomenar ROC (Receiver Operating Characteristics). No va ser fins a principis dels anys setanta del segle passat que es va veure que l'ús dels mètodes de detecció de senyals podria ser útil en la interpretació de les proves diagnòstiques. Així, aquesta habilitat per detectar vertaders i falsos positius es va identificar, com un valor numèric anomenat AUC, que com a màxim pot agafar el valor 1. D'aquesta manera, si pren valors entre 0,9 i 1 es considera que la prova és excel·lent; entre 0,8 i 0,9, bona; entre 0,7 i 0,8, regular; entre 0,6 i 0,7, pobra, i, per dessota d'aquests valors, és com tirar en l'aire una moneda i decidir que el pacient té la malaltia si surt cara i que està sa si surt creu.

Aquests tipus d'anàlisis també són molt útils, per exemple, en genètica forense. En molts casos no hi ha testimonis oculars dels fets delictius. L'única informació disponible pot ser un vestigi biològic (sang, saliva, semen o d'altres) deixat pel sospitós en el lloc dels fets. Es pot obtenir l'ADN del sospitós i provar d'esbrinar-ne una sèrie de característiques morfològiques i anatòmiques. Una d'aquestes característiques és el color d'ulls. Per això es va fer un treball on es van estudiar milers d'individus europeus respecte a aquest caràcter i es van analitzar quinze marcadors genètics (tècnicament anomenats SNP, l'acrònim de *single-nucleotide polymorphisms* o polimorfismes d'un sol nucleòtid) que se sabia que estaven localitzats en regions del genoma responsables del color dels ulls. Es va obtenir un valor AUC de 0,93 per al color marró i de 0,91 per al color blau. A partir d'aquests estudis es van desenvolupar *kits* de diagnosi per a la predicció

del color dels ulls basat en l'ADN, que el 2010 van ser validats per a ús judicial. També es treballa en la recerca de proves diagnòstiques mitjançant les quals es pugui conèixer l'origen ètnic (i, per tant, l'aspecte general de la persona), el color del cabell, etc., del sospitós a partir de l'ADN que s'hagi trobat en el lloc dels fets.

Actualment, la utilització de les corbes ROC està molt estesa i té un paper molt important en processos de diagnòstic o de classificació en psiquiatria, psicologia, medicina, economia i meteorologia. També tenen gran utilitat en models predictius, com per exemple en el pronòstic sobre el risc d'esslavissades. Un altre cas seria el d'un treball recent (2013) en què científics de la Universitat Autònoma de Madrid han estudiat la predicció dels impactes del canvi climàtic en la distribució de lepidòpters del gènere *Boloria* a la península Ibèrica els anys 2020, 2050 i 2080. La utilització de les corbes ROC i dels valors AUC els ha permès validar models predictius que indiquen que el canvi climàtic està afectant negativament aquest gènere, que podria arribar a desaparèixer.

I A MÉS...

Què és en realitat aquest valor AUC que permet classificar les proves diagnòstiques? Com el podem determinar?

A continuació considerarem un estudi concret dut a terme per membres de l'Hospital de Sant Joan de Déu de Barcelona. En aquest estudi es va avaluar l'efectivitat d'una tira reactiva per al diagnòstic d'infecció d'orina en nens i en adults. La tira reactiva és un plàstic o paper d'uns 5 mm d'amplada impregnat d'uns reactius que es mulla en l'orina i que, segons el color que agafa, indica si hi ha o no alguna mena d'infecció. Per tant, aquesta prova es pot fer al mateix moment de la visita mèdica. Com a prova de referència per assegurar la presència o no d'infecció, es va fer un urocultiu. Un urocultiu és un procediment que permet identificar el nombre i

el tipus de bacteris presents en l'orina, fent-los créixer en un medi de cultiu adequat. Cal recollir l'orina, fer-ne un cultiu microbiològic i analitzar-lo en un laboratori. En aquest estudi es va agafar l'orina de 1.087 pacients pediàtrics i adults i se'ls va aplicar tant la tira reactiva (la prova a avaluar) com l'urocultiu (la prova de referència).

El resultat va ser el següent. Hi havia 106 pacients que tenien infecció d'orina (l'urocultiu així ho va indicar), però la tira reactiva va detectar com a infectats només 86 d'aquests 106 pacients; es parla, doncs, de 86 veritables positius. D'altra banda, la tira es va equivocar en 20 individus ja que no va ser capaç de detectar la presència d'infecció quan realment existia; aleshores es diu que hi ha 20 falsos negatius. Per tant, la capacitat de la tira reactiva per detectar els infectats, que és el que es denomina sensibilitat (S), és:

$$S = \frac{\text{veritables positius}}{\text{total de pacients amb infecció}} = \frac{86}{86 + 20} = 0,8113.$$

Expressant aquest resultat en tant per cent, la sensibilitat és del 81,13%. D'altra banda, hi havia 981 individus no infectats (és el que va indicar l'urocultiu). D'aquests, la tira reactiva va dir que 548 no estaven infectats; així, hi ha 548 veritables negatius. Però la tira es va equivocar en indicar que 433 sí que ho estaven; per tant, hi ha 433 falsos positius. Així doncs, la capacitat de la tira reactiva per detectar individus no infectats, que és l'especificitat (E) de la prova, és:

$$E = \frac{\text{veritables negatius}}{\text{total de pacients sense infecció}} = \frac{548}{548 + 433} = 0,5586.$$

Per tant, l'especificitat és del 55,86%.

Per a aquestes dades concretes, és a dir, per a aquests pacients concrets, el 81,13% de les vegades la tira reactiva detecta la infecció. Malauradament, un 55,86% de les vegades s'equivoca en el diagnòstic quan el pacient no està infectat. Sembla, doncs, que caldria millorar l'eficàcia de la tira

reactiva, ja que malgrat que dona un resultat molt ràpid —no com l'urocul-tiu, que cal esperar uns dies—, no arriba a ser prou precisa.

Què es pot dir sobre l'eficàcia de la tira reactiva? Es pot assegurar que sempre detectarà el 81% dels individus malalts i que sempre s'equivocarà en un 55,86% de les vegades quan el pacient no tingui infecció? No es pot assegurar, ja que tots els càlculs anteriors formen part de la descripció de les dades obtingudes sobre 1.087 pacients concrets. Es tracta de la quantificació dels valors obtinguts sobre una mostra, no sobre tota la població. Caldrà fer inferència estadística per deduir l'eficàcia de la prova sobre tots els possibles pacients.

I què es pot dir d'haver agafat l'orina de pacients pediàtrics i adults? Potser la tira reactiva va millor en pacients pediàtrics que en adults o a l'inrevés. Per respondre aquestes preguntes caldria fer una nova inferència estadística i comparar tots dos grups.

Arribats en aquest punt, val la pena parlar una mica més del valor AUC. Com s'ha explicat en un paràgraf anterior, està relacionat amb l'habilitat per detectar vertaders i falsos positius, i com a màxim pot tenir el valor 1. Quan els valors d'una prova diagnòstica segueixen una escala contínua, com pot ser la pressió arterial, per conèixer la validesa de la prova es fan servir les anomenades corbes ROC (Receiver Operating Characteristics). Aquestes corbes es representen en un gràfic en què a l'eix d'ordenades (el vertical) hi ha els valors de sensibilitat i en el d'abscisses (l'horitzontal) uns valors que es relacionen amb l'especificitat, i que es calculen restant el valor de l'especificitat de la unitat (és a dir, $1 - \text{especificitat}$). D'aquesta manera, els valors de mínima sensibilitat i mínima especificitat queden propers a l'origen de les coordenades, on es creuen els dos eixos. Són gràfics com el de la figura 1a). Llavors, el valor AUC (Area Under the Curve) es calcula com l'àrea que queda per dessota la corba. És a dir, seria l'àrea de la regió indicada en gris a la figura 1b).

Per calcular aquesta àrea es necessiten conceptes un xic més complexos, com les integrals. Les integrals apareixen en moltes situacions pràctiques,

com per exemple en el càlcul d'àrees i volums de formes irregulars. Tenen una gran aplicació en la hidràulica, on es fan servir per a calcular volums de líquids i conèixer-ne la força i la pressió; i en geologia, per exemple per calcular les àrees d'inundació en un projecte d'embassament, el volum de terra que cal remoure per fer un camí, l'espessor mineralitzada d'un camp de petroli o els volums de les reserves d'hidrocarburs. Un altre camp d'aplicació és la medicina. Utilitzant integrals es pot calcular, per exemple, el nivell mitjà d'insulina segregada per una persona durant un temps determinat i després d'haver ingerit sèrum amb glucosa. També permeten calcular la quantitat de sang bombada pel cor en un minut, el valor de metabolisme basal de l'home o d'un altre organisme durant un cert temps o la quantitat de medicament que resta en el sistema sanguini al cap d'un temps determinat d'haver-lo ingerit. A més, les integrals són necessàries per poder determinar el nombre d'infectats en una epidèmia, si es coneix la velocitat d'infecció en un instant concret; o per determinar la grandària d'una població de bacteris sabent la velocitat d'augment de la població en cada instant; o bé per determinar l'hora de la mort si es coneix la temperatura d'un cadàver.

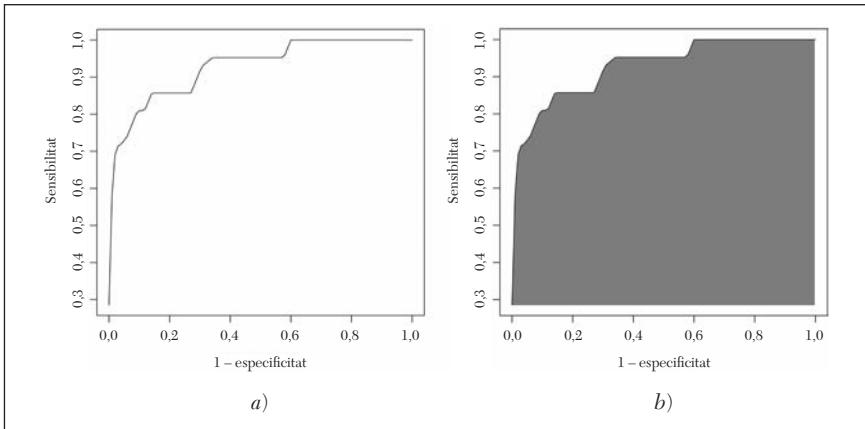


Figura 1. *a)* Corba ROC representant els parells de punts (1 - especificitat, sensibilitat). *b)* L'àrea per sota la corba ROC (part grisa) dona el valor d'AUC.

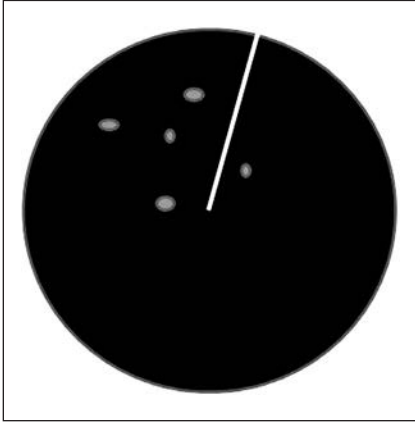


Figura 2. Representació d'un radar, amb senyals que fan pensar en formigues.

El càlcul d'una integral pot ser força complex, però fins i tot sense saber què és una integral es pot calcular mitjançant algun programa informàtic. Dels programes informàtics, però, ja se'n parlarà més endavant.

Dèiem al començament d'aquest capítol que, quan es va començar a utilitzar el radar, no se sabia com interpretar-ne els senyals. Aquests senyals, segons com es mirin, poden semblar petites formigues. Tot seguit parlarem, doncs, de formigues.

CAPÍTOL 2

Les formigues i la pintura artística

«Entenent la base física de la ment i coneixent quina part de la nostra naturalesa genètica és la que ens fa sentir plaer i dir que alguna cosa és bella, és possible arribar a explicar com es produeix l'art.»

EDWARD O. WILSON¹

Edward O. Wilson, biòleg, etòleg i entomòleg nascut el 1929 a Birmingham (Alabama), el 1996 va ser nomenat un dels cent científics més influents de la història. De ben petit va quedar fascinat per les formigues i el seu comportament. Aquesta afició, que després es convertiria en la seva professió i gran passió, es va originar quan, a l'edat de set anys, va perdre l'ull dret en un accident de pesca. Arran d'això va haver de mirar els insectes amb lupa, en especial les formigues. Aquests animals han fascinat molts científics, ja que tenen un cervell molt petit però poden arribar a tenir comportaments molt complexos, que han estat el centre de molts estudis. Per exemple, s'ha demostrat que els individus de l'espècie *Cataglyphis fortis* del desert del Sàhara s'orienten recordant la direcció i la distància que recorren quan

¹ Edward O. Wilson (1929) és professor emèrit de la Universitat de Harvard i conservador honorari del Museum of Comparative Zoology. Ha rebut nombroses beques, distincions i premis.

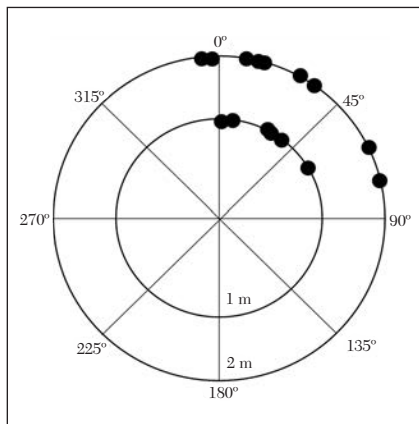


Figura 3. Representació del moviment de formigues des del seu formiguer (centre del cercle). Cada punt representa una formiga.

surten del formiguer a buscar menjar. Per les altes temperatures que s'assoleixen en aquest desert, és molt important que sàpiguen tornar ràpid al formiguer un cop han aconseguit el menjar. El seu moviment es pot representar amb un gràfic com el que es mostra a la figura 3. Cada punt representa una formiga; les dues circumferències indiquen distàncies d'1 m i 2 m respectivament, i els graus de la circumferència externa indiquen la direcció que han pres des del formiguer.

Aquesta mena de gràfics també s'utilitzen, per exemple, en estudis sobre el moviment de les estrelles de mar en el fons marí, sobre el vol dels coloms missatgers des del colomar o sobre el rumb d'un avió que acaba d'enlairar-se, entre molts altres casos. Però aquest tipus de gràfic no només és útil en el món de la biologia o de la física, sinó que també s'utilitza en altres àmbits com el de la pintura.

És clar que hi ha pintures que ens fan pensar en diferents autors o corrents artístics. És el que passa quan veiem una pintura de Monet o Renoir: la ment se'ns en va de seguida cap al corrent de l'impressionisme. En canvi, moltes pintures de Picasso fan pensar en el cubisme. Això és així perquè hi ha una sèrie de trets diferencials, pel que fa a tema, color, tipus de pinzellada, etc., que permeten identificar una obra pictòrica amb un autor, un estil o una època determinada. Entre altres coses, això fa possible efectuar la datació d'obres, fer estudis d'autoria quan és dubtosa o quantificar l'evolució d'un autor concret en el decurs del temps. Hi ha diferents característiques que cal tenir en compte a l'hora de classificar una pintura, com per exemple la llumi-