

Héctor G. Riveros • Lucía Rosas

El método científico aplicado a las ciencias experimentales

trillas 

Héctor G. Riveros • Lucía Rosas

El método científico aplicado a las ciencia/ experimentales

**EDITORIAL
TRILLAS**



México Argentina España
Colombia Puerto Rico Venezuela

F - 210-04-06
Nú. Reg. 04199

001.434
Riv
M

Catalogación en la fuente

Riveros, Héctor G.

El método científico aplicado a las ciencias experimentales. -- 2a ed. -- México : Trillas, 1990 (reimp. 1999).

164 p. il. ; 23 cm.

Bibliografía: p. 159-160

Incluye índices

ISBN 968-24-3893-4

1. Ciencia - Metodología. 2. Diseño experimental. I. Rosas, Lucía. II. t.

D- 001.434'R656I

LC- A182'R5.5

1161

La presentación y disposición en conjunto de
EL METODO CIENTIFICO APLICADO A LAS CIENCIAS
EXPERIMENTALES

son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del editor

Derechos reservados

© 1982, Editorial Trillas, S. A. de C. V.,
División Administrativa, Av. Río Churubusco 385,
Col. Pedro María Anaya, C. P. 03340, México, D. F.
Tel. 6884233, FAX 6041364

División Comercial, Calz. de la Viga 1132, C. P. 09439
México, D. F. Tel. 6330995, FAX 6330870

Miembro de la Cámara Nacional de la
Industria Editorial. Reg. núm. 158

Primera edición, 1982 (ISBN 968-24-1218-8)

Reimpresión, 1984

Segunda edición, 1990 (ISBN 968-24-3893-4)

Reimpresiones, 1991, 1994, 1996 y 1997

Quinta reimpresión, junio 1999

Impreso en México

Printed in Mexico

Esta obra se terminó de imprimir y encuadernar
el 20 de junio de 1999,
en los talleres de Litoadelante y Progreso, S. A. de C. V.
BM2 80 TASS

Introducción

LA HISTORIA DEL hombre durante los últimos ciento cincuenta años, nos presenta un cambio radical en su nivel de vida; son muchos los conocimientos que el ser humano ha logrado acumular y aplicar para su beneficio; uno de esos conocimientos es la electricidad con todas sus consecuencias que en una forma o en otra han venido a modificar nuestro modo de vivir.

En efecto, existe un cambio notable entre las luces eléctricas modernas y las velas y lámparas de aceite; entre el correo a caballo y la comunicación por telégrafo, teléfono o televisión; entre usar la energía de animales de tiro y los motores de combustión interna, etc. Los ejemplos podrían continuar hasta obtener una larga lista, pero entre ellos es interesante señalar que todavía hace cuarenta años la televisión y los viajes a la Luna eran temas de novela de ciencia-ficción.



Fig. 1. El primer descenso del hombre en la Luna.

En fin, puede apreciarse que en estos últimos ciento cincuenta años, los avances de la ciencia han sido asombrosos y, de hecho, esperamos todavía más; sin embargo, toca ahora hacer una pregunta: ¿A qué se debe que la ciencia haya logrado sus mayores descubrimientos en los últimos años de su larga historia? La respuesta es larga. La ciencia como tal no hubiera podido alcanzar por sí sola todos sus descubrimientos; ha desarrollado y necesita del método científico y de la tecnología para continuar sus avances.

En la época moderna, el hombre de ciencia, el científico o investigador, sabe que sus problemas de estudio (investigaciones) y posibles descubrimientos deben cumplir ciertos requisitos impuestos por el método científico; ello le permitirá planear con más eficacia sus experimentos y también elegir el mejor procedimiento para encontrar el resultado buscado.

Respecto de la necesidad de ciencia por tecnología, tenemos que ciencia y técnica son un bello ejemplo de simbiosis en el que los avances científicos permiten diseñar instrumentos más sensibles, con los que a su vez es posible investigar fenómenos antes inaccesibles. Cuando estos fenómenos logran explicarse, se tendrán nuevos conocimientos que otra vez permitirán el diseño de instrumentos todavía más sensibles, y así sucesivamente.

Se mencionó con anterioridad que se esperan **más** avances de la ciencia y, por consiguiente, también de la tecnología; es por eso que todos los gobiernos del mundo gastan parte de su presupuesto en investigación básica y aplicada, siendo estos gastos una inversión a largo plazo, que acabará por ayudar a producir mayores beneficios y satisfacer así las necesidades de poblaciones crecientes.

En nuestros días existe un notorio interés por parte de las autoridades educativas, por enseñar a las nuevas generaciones de estudiantes lo que es el *método científico*; ello obedece a que el hombre moderno necesita entender el medio **que** lo rodea, para no sentirse amenazado por **él**; en

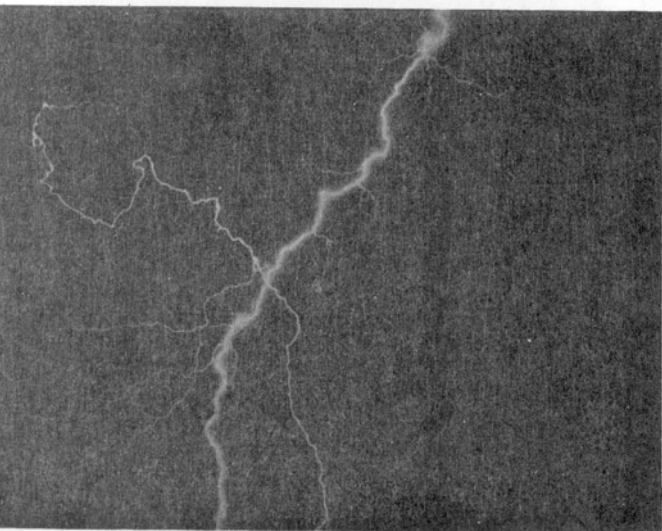


Fig. 2. Los rayos eran mensajes de los dioses.

tal situación, es deseable que todo ser humano adquiera ciertos conocimientos científicos como parte de su cultura. El método científico nos brinda la ocasión de conocer lo que es la ciencia y sus métodos de trabajo; al ignorarlo, se correrá el riesgo de atribuir propiedades sobrenaturales a fenómenos que pueden ser explicables, y colocarnos en la primitiva situación de creer en **magia** o hechicería.

El método científico es único; entenderlo nos ayudaría a comprender mejor al científico que lo aplica, incluyendo que en temas ajenos a su especialidad sea tan ignorante o dogmático como cualquier mortal; puede tratarse de un ser religioso, ateo, capitalista, socialista o comunista, avaro o desprendido; en resumen, un ser humano con todas sus cualidades y defectos, pero que siempre tendrá la seguridad que sus descubrimientos, basados en la aplicación del método científico, serán válidos para todos sus colegas en cualquier parte del mundo.

Las necesidades de ciencia y tecnología, en nuestro país, ya no se satisfacen con enseñar a los estudiantes cómo se verifica una ley científica o cómo usar determinado equipo y maquinaria que resultará obsoleta en un futuro próximo; urge preparar gente capaz de pensar, que entienda los principios básicos de la ciencia o técnica, para que no le detengan las dificultades que se presenten e, incluso en un plan más ambicioso, pueda desarrollar nuevos procedimientos, cualquiera que sea su campo de trabajo.

Sin embargo, todo lo anterior sólo se logrará si el estudiante entiende y aprende a usar el método científico desde que empieza a resolver sus primeros problemas; por tal motivo, este libro está dedicado a los alumnos de enseñanza media superior, que necesitarán del método científico para planear sus experimentos y prever las dificultades que implica el manejo de datos y técnicas gráficas y estadísticas.

El fin primordial del presente libro es presentar al lector el método científico en forma clara y sencilla, pero además se pretende explicar las técnicas más usadas en el manejo de datos, en especial para quienes cursan física, química o biología; por ello, en el capítulo 1 se analiza el significado de **ciencia** y cómo se mide; en el capítulo 2 se expone el método científico y cómo encontrar relaciones a partir de resultados experimentales; en el capítulo 3 se describen los pasos del método experimental y cómo se aplicó en tres descubrimientos de ciencia básica; el capítulo 4 está dedicado al estudio de técnicas gráficas y estadísticas, que son necesarias para interpretar los datos experimentales, y en el capítulo 5 se presentan tres experimentos abiertos que pueden realizarse en un laboratorio de enseñanza media superior, y en los cuales deberá aplicarse el método experimental.

Entender, y sobre todo aplicar el método científico, no es tarea fácil, dominarlo por completo llevará años; sin embargo, podemos tener la seguridad de que, después de su estudio, el alumno analizará sus problemas, incluso los de la vida diaria, en forma más racional y objetiva.

Superemos al humano

¿Cuál será el mecanismo
que induce a la humanidad
a empujar hacia el abismo
a quien muestra creatividad?

¿Por qué ese afán destructivo
hacia la gente que empieza?
¿Por qué matar su semilla
y que su habilidad no crezca?

¿No es acaso el objetivo
presente en la raza humana
el superar sus errores
y sus envidias mal sanas?

Superemos al humano
disfrutemos de la vida
vamos a darnos la mano
sea la gente nuestra amiga.

LUCÍA ROSAS †

Índice de contenido

Introducción	5
Cap. 1. Ciencia y medida	11
1.1. Cómo surgió la ciencia, 13. 1.2. Tecnología, 15. 1.3. Ciencia, 16. 1.4. Hecho, 18. 1.5. Conocimiento científico, 19. 1.6. Hipótesis, 19. 1.7. Ley, 20. 1.8. Teoría, 23. 1.9. Modelos, 24. 1.10. Clasificación de las ciencias, 24. 1.11. Medición de una variable, 26. 1.12. Incertidumbre y error, 27. 1.13. Valor promedio, 29. 1.14. Máximo error posible, 30. 1.15. Valores experimentales, 30. 1.16. Uso de la incertidumbre, 32. 1.17. Acuerdo entre teoría y experimento, 32. Preguntas y ejercicios, 34.	
Cap. 2. Método científico	35
2.1. Definición, 37. 2.2. Postulados del método científico, 39. 2.3. Reglas del método científico, 42. 2.4. Ciencia y técnica, 42. 2.5. Métodos científicos, 45. 2.6. Método de casos, 45. 2.7. Método estadístico, 46. 2.8. Método inductivo, 47. 2.9. Método deductivo, 48. 2.10. Método experimental, 49. 2.11. Análisis gráfico, 50. Preguntas y ejercicios, 52.	
Cap. 3. Método científico experimental	53
3.1. Papel del experimento, 55. 3.2. Pasos del método experimental, 56. 3.3. Descubrimiento de los rayos X, 71. 3.4. Síntesis del amoníaco a partir de sus elementos, 74. 3.5. Los procesos de la fermentación, 78. Preguntas y ejercicios, 81.	

Cap. 4. Medidas y su interpretación	83
4.1. Conceptos cualitativos y cuantitativos, 85. 4.2. Medidas e incertidumbres, 85. 4.3. Estimación del error experimental, 86. 4.4. Clasificación de errores, 87. 4.5. Tratamiento estadístico de datos, 88. 4.6. Combinación de incertidumbres, 98. 4.7. Análisis gráfico, 104. Preguntas y ejercicios, 110.	
Cap. 5. Aplicaciones	111
5.1. Energía solar, 113. 5.2. Obtención de leche búlgara, 128. 5.3. Concentración de plomo soluble en recipientes de barro, 132. Preguntas y ejercicios, 137.	
Apéndice	139
A. Ciencia y filosofía, 141. B. Distribución binomial, 142. C. Distribución normal o de Gauss , 147. D. Propagación de incertidumbres, 150. E. Mínimos cuadrados, 154.	
Referencias bibliográficas	159
Índice analítico	161

Ciencia y medida

- 1.1. Cómo surgió la ciencia
- 1.2. Tecnología
- 1.3. Ciencia
- 1.4. Hecho
- 1.5. Conocimiento científico
- 1.6. Hipótesis
- 1.7. Ley
- 1.8. Teoría
- 1.9. Modelos
- 1.10. Clasificación de las ciencias
- 1.11. Medición de una variable
- 1.12. Incertidumbre y error
- 1.13. Valor promedio
- 1.14. Máximo error posible
- 1.15. Valores experimentales
- 1.16. Uso de la incertidumbre
- 1.17. Acuerdo entre teoría y experimento

La ciencia es un tema que ha ocupado la atención de filósofos y pensadores desde tiempos remotos y no se pretende, de ninguna manera, agregar una definición más a las ya existentes, pero sí mencionar las dificultades que existen para definirla y sobre todo señalar la estrecha relación que tiene con el ser humano.

1.1. CÓMO SURGIÓ LA CIENCIA

La ciencia por sí misma no existe; es un estudio que hace el hombre acerca de todos los fenómenos que le rodean; por tal motivo es posible afirmar, sin temor a equívoco, que: La **ciencia es creación del hombre**.

Pero la creación de la ciencia por el hombre no es algo que haya podido **lograrse** de la noche a la **mañana**; han sido necesarios miles de años de evolución, observación y del desarrollo de tres habilidades que, combinadas entre sí, lo hacen único y superior a todas las formas de vida terrestre. Dichas habilidades son:

- a) Habilidad para pensar (en forma razonada).
- b) Habilidad para hablar (expresar sus ideas).
- c) Habilidad para manejar herramientas.

Cada una de estas habilidades por separado no hacen al hombre superior, pero la combinación de las tres, aunadas al desarrollo del cerebro humano, le han permitido crear un sinnúmero de objetos útiles, ciudades hermosas y expresiones artísticas, como la música o literatura, en las cuales manifiesta toda una gama de sentimientos que forman parte de su ser. Pero si bien es cierto que su creatividad ha sido positiva, no se debe **olvidar** que en su afán por dominar todo, ha creado cosas tan negativas como sustancias tóxicas y armas de guerra cada vez más complejas, que emplea para su autodestrucción. En fin, estos ya son temas que nos alejan de nuestro estudio y es conveniente dejarlos a un lado. El uso que se hace de la ciencia debe preocuparnos, así que debemos asumir nuestra responsabilidad al respecto, como ciudadanos y miembros de esta sociedad.

Es indudable que la habilidad para pensar, hablar y manejar herramientas, no son privativas del ser humano, aunque sí es el mejor dotado y el que obtiene más provecho de ellas; veamos por qué:

En lo que se refiere a la habilidad para pensar, es cierto que el ser humano no posee el cerebro más grande de la naturaleza; el del elefante o el del delfín son mayores que el del hombre; sin embargo, puede afirmarse que ni el elefante ni el delfín tienen la misma capacidad de aprendizaje que el ser humano. ¿A qué se debe? La respuesta no es complicada.

Existen dos cocientes que la explican; uno de ellos relaciona el peso del cerebro con el peso del cuerpo, y el otro, el número de células cerebrales respecto del cerebro, que no están comprometidas en funciones corporales; un estudio realizado en varios mamíferos demuestra que los cocientes más altos corresponden al hombre.

TABLA 1.1

Pesos del cerebro y cuerpo y número de células cerebrales de algunos mamíferos

<i>Animal</i>	<i>Peso del cerebro (en kg)</i>	<i>Peso del cuerpo (en kg)</i>	<i>Número aproxima- do de células cerebrales dispo- nibles para aprender (en millones)</i>	<i>Relación del peso del cerebro con respecto al peso del cuerpo</i>	<i>Millones de células cere- brales por kg de peso del cuerpo</i>
Rata	0.002	0.300	20	0.807	67
Elefante	6.00	7 000	18 000	0.001	3
Delfín	1.75	150	10 000	0.012	67
Gorila	0.60	250	3 600	0.002	14
Chimpancé	0.40	45	3 400	0.009	75
Babún	0.20	20	2 100	0.010	105
Mono macaco	0.10	10	1 200	0.010	120
<i>Homo Erectus</i>	0.90	50	no conocido	0.018	—
<i>Homo Sapiens</i> (hombre)	1.30	60	8 500	0.022	146

Fuente: The Open University, La ciencia: sus orígenes, escalas y limitaciones, McGraw-Hill, México, 1975.

Respecto de la habilidad para hablar, como forma de comunicación, se sabe que gran parte de las especies de animales irracionales tienen su propio lenguaje, e incluso viven en sociedades bien organizadas (quizá mejores que la nuestra [?]), como las abejas o las hormigas, pero tras largos años de observación, no parecen tener mayor interés que la supervivencia. Existen otros tipos de lenguaje: el hablado, por medio de sonidos articulados, que tampoco es exclusivo del hombre, ya que los pericos y las guacamayas también hablan, pero sólo repiten las pocas palabras que logran aprender a fuerza de oír las una y otra vez; en fin, que en este caso no puede afirmarse que semejantes aves posean un lenguaje articulado como forma de comunicación, sobre todo si las palabras aprendidas son un atentado contra el lenguaje.

Entre las formas de comunicación exclusivas del ser humano, tenemos la escritura por medio de grafías y letras, que ha sido decisiva en la evolución del hombre; no sólo porque permite a las personas comunicarse a grandes distancias, sino porque en pergaminos, libros y tablas, pudo el hombre transmitir a las generaciones futuras, sus conocimientos y experiencias; en tal situación, le fue posible buscar nuevos conocimientos y hacer más descubrimientos que a su vez los hizo constar sobre papel. Así, **tene-**

mos que gracias a los conocimientos acumulados durante siglos, el hombre ha podido llegar a su actual estado de evolución.

Las anteriores no son las únicas formas de comunicación; en la actualidad contamos con algunas muy complejas, como el lenguaje en clave o las ondas de radio. Pero el punto importante es que el hombre es la única especie animal que ha evolucionado, lo cual se debe a su capacidad para razonar y al lenguaje como forma de comunicación.

No obstante, el hombre no hubiera llegado al actual estado de evolución sólo con razonamiento y lenguaje; es imprescindible su habilidad manual (vean que sin ella ni siquiera podríamos escribir) y aunque el mono también tiene manos, los movimientos de su pulgar, no le permiten tener un "control fino" sobre los objetos y menos aún sobre herramienta de precisión; dicho en otras palabras, la diferencia entre la mano del hombre y la de un mono, está en la movilidad de su pulgar: el primero ha logrado maravillas en la manufactura de obras de arte y maquinaria, producto de su imaginación; el segundo, a pesar de su habilidad para imitar, como el chimpancé, no podrá competir con el hombre, por fortuna para éste.

Una vez más insistiremos en que las tres habilidades mencionadas, por sí solas, no hubieran permitido evolucionar al hombre; han sido su estrecha relación, donde el lenguaje y la habilidad manual se encuentran superpuestas a esa capacidad de razonar y sintetizar, que sólo tiene el ser humano.

1.2. TECNOLOGÍA

Con las tres habilidades mencionadas antes, el hombre primitivo, que formaba parte de pequeños grupos familiares de cazadores y recolectores de frutos, evolucionó a la sociedad organizada (o desorganizada [?]) en la que lo conocemos. Los primeros inventos, como el uso de herramientas

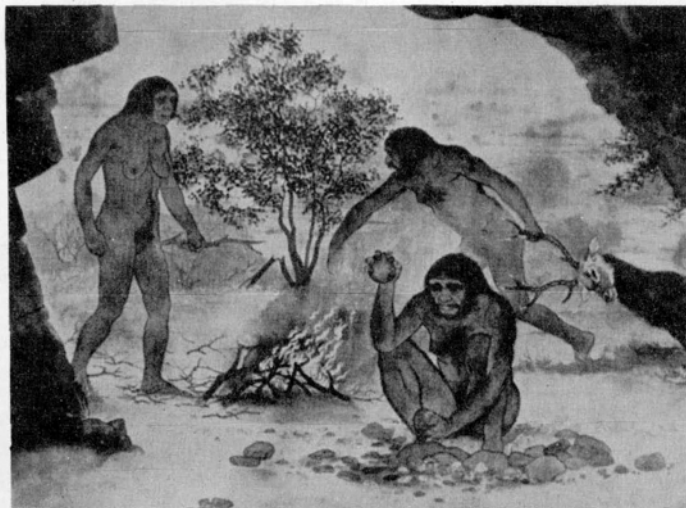


Fig. 1.1. El vivir en sociedad permite distribuir tareas, aumentando el bienestar común.



Fig. 1.2. Las pinturas rupestres muestran el interés del hombre por el arte.

cortantes, el fuego, la rueda, para pasar después a la alfarería y fundición de metales, son producto de una vida en sociedad donde es posible distribuir tareas, lo que después dio origen a la especialización; porque un individuo que realiza siempre el mismo trabajo se hace más diestro en su oficio y si su capacidad de creación se lo permite, puede inventar nuevos procedimientos y técnicas que le faciliten su labor.

Una vez que el hombre vive como ser social, empieza a preocuparse por aplicar sus conocimientos para solucionar los problemas de la colectividad, y es entonces cuando se inicia la ciencia y la tecnología, si por tecnología se entiende: *La aplicación de conocimientos científicos para obtener beneficios.*

Pero ciencia y tecnología no fueron las únicas actividades que se iniciaron dentro de una sociedad, ya que una vez satisfechas las necesidades más urgentes, el hombre tiene tiempo para crear el arte como una forma de expresar sus sentimientos. Tal deducción se desprende del hallazgo de pinturas rupestres que tienen una antigüedad de 20 000 a 40 000 años.

Lo expuesto hasta ahora apoya la afirmación de que la ciencia es creación del hombre. El paso siguiente es señalar las dificultades *involucradas* en su definición; dicho de otra manera, analizaremos algunas definiciones y adoptaremos la que parezca más adecuada, sin querer por ello imponer ningún criterio.

1.3. CIENCIA

Siempre que buscamos el significado de alguna palabra para conocer su definición, acudimos a un diccionario; en nuestro caso, *¿cómo se define la palabra ciencia?*

Los diccionarios más usuales dan las siguientes definiciones de ciencia:

Conjunto de conocimientos organizados sistemáticamente en un todo lógico y coherente."^a

Conocimiento exacto y razonado de ciertas cosas.^b

Conjunto de conocimientos referentes a un determinado objetivo que se tiende a organizar racional o sistemáticamente.^c

Son tres respuestas que dan un indicio de la dificultad que representa definir "algo"; todas tienen el defecto de ser demasiado amplias. Para darnos cuenta de ello, basta reflexionar un poco.

Respecto de la primera definición, tenemos que casi cualquier cosa puede ser ciencia, ya que no se refiere a ningún tipo específico de conocimiento, incluso el directorio telefónico cumple la definición, porque es un conjunto de conocimientos (que son nombres, direcciones y números telefónicos), organizados sistemáticamente (por orden alfabético) que además es lo más lógico para la pronta localización de personas.

En igual forma, la segunda y tercera definiciones pueden incluir el directorio telefónico, por lo que tales definiciones no son aceptables. ¿Qué hacer entonces?

Como se mencionó al principio de este capítulo, definir ciencia no es fácil y si ya vimos que las definiciones de los diccionarios más accesibles no funcionan, pasemos ahora a revisar las definiciones de un libro científico como es: *La ciencia, sus orígenes, escalas y limitaciones*,^{1*} escrito para The Open University, McGraw-Hill, México (1975) donde se citan, entre otras, las siguientes definiciones:

El ensayo de descubrir y explicar el funcionamiento del mundo de la naturaleza.

La aplicación de ciertas reglas de procedimiento e investigación.

Las instituciones sociales dentro de las cuales se desarrollan estas actividades.

De estas acepciones, la primera se parece un poco a la que posteriormente emplearemos; la segunda definición confunde ciencia con método científico y la tercera llega al grado de identificar la ciencia con las instituciones donde se lleva a cabo.

Con los ejemplos de definiciones que hemos visto queda constancia de que al definir "algo", sobre todo si ese "algo" es tan delicado como la ciencia, cada concepto debe analizarse lo más ampliamente posible y explicarlo con palabras precisas, para obtener mayor claridad al comunicar nuestras ideas.

Ahora revisemos la opinión de algunos filósofos y científicos sobre el tema. Ackoff dice en su libro:

^a *Diccionario enciclopédico Bruguera*, Editorial Bruguera, México, 1979.

^b *Diccionario pequeño Larousse*, Editorial Larousse, Francia, 1975.

^c *Enciclopedia universal Nauta*, Editorial Nauta, España, 1978.

* Este número alude a las referencias bibliográficas que se encuentran al final del libro

La extensa literatura que ha tratado de definir o caracterizar a la Ciencia, está llena de puntos de vista inconsistentes y demuestra que una definición adecuada no puede obtenerse fácilmente. Parte de la dificultad se tiene del hecho que el significado de Ciencia no es fijo sino dinámico. La Ciencia está en desarrollo, igual su significado; toma nuevas acepciones y significados según las épocas.

Este sencillo párrafo señala que la principal dificultad para definir ciencia, estriba en el hecho de ser algo dinámico, en constante evolución, de manera que las definiciones sólo han sido temporales y lo mismo sucederá con cualquier otra que demos, ya sea ahora o dentro de algunos años, con el tiempo se volverá obsoleta. Pero aun así es interesante conocer los significados que la palabra ciencia tiene para diferentes personas.

Ahora daremos la definición de ciencia que se adoptará en este libro. Rosenblueth,¹ en su libro *El método científico*, dice:

Podemos admitir que la *ciencia es el conocimiento ordenado de los fenómenos naturales y de sus relaciones mutuas.*

En esta definición se recalca que no es sólo la descripción ordenada de un fenómeno, sino la búsqueda (y encuentro) de las relaciones de las cuales depende, de qué lo afecta y qué no lo afecta.

Ahora bien, existe otra definición de ciencia muy aceptable en el libro *Biología: La vida, sus formas y sus cambios*,¹ donde se dice:

Ciencia es la exploración de los objetos y fenómenos del **Universo** material, para desarrollar explicaciones ordenadas (conceptos) de estos objetos y fenómenos; además, las explicaciones deben ser comprobadas.

Respecto de esta definición no haremos comentarios, ya que es en sí bastante explícita. La mencionaremos como una alternativa a la de Rosenblueth, y no es la intención de este libro imponer ninguna, pues no tendría sentido; recordemos que tanto la ciencia como su definición, se encuentran en constante desarrollo.

1.4. HECHO

Hecho es una afirmación acerca de un fenómeno natural, que se acepta como correcta; por lo general se obtiene por observación directa. Por ejemplo: "si se suelta una piedra, ésta cae al suelo". Ahora bien, la ciencia en sus principios era sólo un conjunto de hechos; a partir de ellos, la capacidad de razonamiento del hombre le permitió encontrar explicaciones que, después de ensayarlas en un largo camino de errores y aciertos, lo condujo a obtener conocimientos e incluso a elaborar leyes. Dicho en pocas palabras: La ciencia comenzó su evolución de hechos a conocimientos científicos; por ejemplo:

Es un hecho que el barro se endurece cuando se encuentra debajo de una fogata, pero de la fabricación de vasijas de barro cocido a las bellísimas figuras de porcelana, donde se necesita de los conocimientos de mezcla de arcillas especiales en la proporción adecuada, hay un largo camino de evolución.

Otro ejemplo es el movimiento de los astros, ya que de la observación del movimiento de los planetas con respecto a las estrellas, a las leyes de Kepler y a la Ley de la Gravitación Universal, también hay un largo camino de evolución en el conocimiento científico.

1.5. CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

Podemos decir que el conocimiento adquirido por experiencia diaria sirve de punto de partida al conocimiento científico. La observación de que "los planetas se mueven respecto a las estrellas" fue realizada por diversas civilizaciones antiguas, y puede explicarse a cualquier persona sin necesidad de entrenamiento formal en ciencia. Así expresado, no es un conocimiento científico, porque no hay precisión en el lenguaje. En cambio, sí lo es cuando se dice:

"Los planetas se mueven en órbitas elípticas alrededor del Sol, el cual se encuentra en uno de sus focos." Este enunciado contiene palabras como órbita, elíptica, y foco (no confundir con bulbo luminoso) las cuales tienen un significado preciso en un libro de ciencia; y su verificación requiere equipo y procedimientos especializados. Luego, se puede decir que:

El conocimiento científico es preciso, usa lenguaje especializado, se obtiene después de hacer un análisis disciplinado y ordenado de los fenómenos naturales y debe estar sujeto a comprobación.

Así se podrían citar más ejemplos donde la característica común a todos, es la observación de "algo" que llamó la atención de algún hombre y lo hizo buscar una explicación posible de por qué pasaba eso. En lenguaje moderno, llamamos hipótesis a dichas posibilidades de explicación; y no debemos caer en el error de pensar que la creación de una hipótesis es trivial, ya que dada una situación o fenómeno, el escoger los factores relevantes y su relación con el fenómeno, exige un fuerte esfuerzo mental por parte de la persona.

1.6. HIPÓTESIS

Hipótesis es una afirmación que se plantea tentativamente, como guía para la investigación. Las hipótesis dadas están sujetas a comprobación para ser aceptadas o rechazadas; en general se inducen de hechos u observaciones.

Lo que en realidad sucede cuando se crea una hipótesis es pasar de una situación particular a una general, proceso que se conoce con el nombre de inducción; pero tal proceso no termina ahí, porque una vez hecha la hipótesis, supuesta general, al aplicarse a otro fenómeno similar y extraer

consecuencias de ella, es de hecho regresar a una situación particular, proceso que se conoce como deducción. Esto en sí marca el método de trabajo con el que se crea la ciencia y consiste en una sucesión de procesos inductivos y deductivos.

1.7. LEY

Ahora bien, una hipótesis cuyas predicciones se han visto confirmadas muchas veces, se llama Ley, para significar la confianza que tenemos en ella, por ejemplo la Ley de la Gravitación Universal, o las Leyes de la Herencia de Mendel. Pero conviene tener presente que todas las leyes son abstracciones de la realidad, en las que aparecen los factores relevantes de la situación o fenómeno, pero en las que se omite una variedad de otros factores que harán su aparición en cualquier situación real. De hecho, las leyes sólo representan modelos idealizados de la naturaleza, en el mismo sentido que un arquitecto construye la maqueta de un conjunto residencial antes de construirlo.

Ley (científica) es una expresión que afirma, en forma cualitativa o de preferencia cuantitativa, relaciones funcionales entre dos o más variables. Por ejemplo, la segunda ley de Newton dice: "Un cuerpo sometido a la acción de una fuerza neta se mueve con una aceleración que es proporcional a la magnitud de la fuerza y en la misma dirección y sentido."

Para tener una idea del trabajo que hay detrás de la formulación de una ley, mencionaremos algunos datos sobre el descubrimiento de las Leyes de la Herencia de Mendel:

Antes de formular sus leyes, Mendel ⁵ tenía ciertas ideas sobre el problema de la herencia, que le sirvieron como hipótesis de trabajo para planear sus experimentos. Para realizarlos escogió la planta del chícharo (guisante), porque en ella podía controlar la fertilización, por medio del corte de sus estambres; dicho de otra manera, Mendel sabía (por sus conocimientos en botánica) que en el chícharo la fertilización por otra planta es muy difícil, ello le permitía mezclar variedades puras con características bien definidas; el análisis de las variedades que resultaban de esas mezclas, poco a poco lo condujo a descubrir las leyes sobre la herencia, que llevan su nombre. Mendel trabajó ocho años en este problema y estudió cerca de 21 000 plantas.

Pero a pesar del esfuerzo realizado y del gran número de variedades de plantas que estudió, los resultados de sus trabajos ni siquiera fueron reconocidos al principio (se decía que por falta de evidencia); fueron necesarios más estudios por otros investigadores para dar validez a sus leyes. En la actualidad, gracias a estas leyes, existen centros dedicados al desarrollo de nuevas variedades de granos, ya sea para obtener plantas que produzcan más, o para que su contenido de proteínas sea mayor, o que soporten climas o suelos considerados no aptos para la agricultura.

Así que para llegar a formular una ley o aceptar una hipótesis como ley, se necesitan años de dedicación y esfuerzo, pero no sólo eso, sus predicciones deben cumplirse cada vez que se aplique y basta que falle

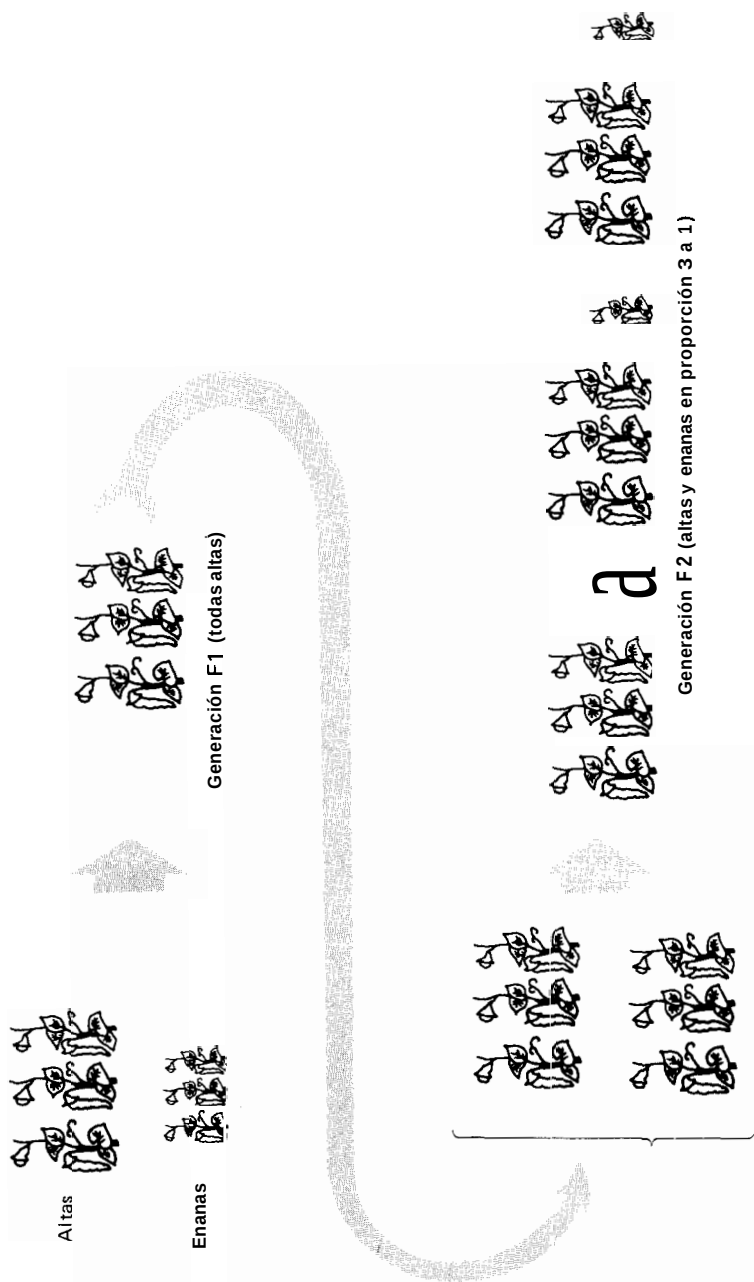


Fig. 1.3. Mendel cruzó plantas altas puras con enanas, y en la primera generación todas resultaron ser altas. Cruzó después las plantas híbridas de la primera generación, y en la segunda generación obtuvo plantas altas y enanas en la proporción 3 a 1. (Tomado de **Biología tres**, Rosado y coautores, Trillas, 1978).

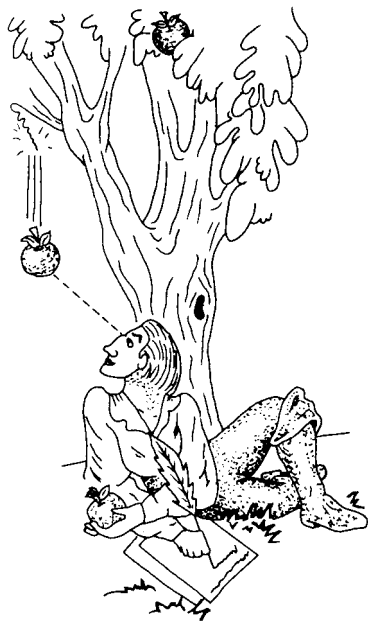


Fig. 1.4. Se dice que así fue como Newton descubrió la Ley de la Gravitación Universal. ¿Tú qué crees? (Tomado de Physical Science, Williams y Doerhoff, McGraw-Hill.)

una sola vez para desecharla y empezar a buscar una ley nueva, mejor que la anterior.

La ciencia se apoya en las leyes que sus científicos formulan y éstas pueden expresarse en lenguaje verbal con palabras y letras o, aún mejor, en lenguaje matemático. Una ciencia que logra traducir sus leyes a ecuaciones, además de lograr una presentación precisa y compacta, tiene la ventaja de facilitar el trabajo de obtener consecuencias de esas leyes, cuando se aplican a problemas bajo diferentes circunstancias. En sí, las matemáticas desempeñan un papel muy importante en el desarrollo de cualquier rama de la ciencia; los ejemplos más notables son la física y la química; tanto es así que dichas ciencias lograron el auge que ahora tienen gracias a que pudieron formular sus leyes y teorías en lenguaje matemático. Cuando una ciencia se apoya en las matemáticas para resolver sus problemas, sus soluciones serán más precisas y sobre todo estará en posibilidades de predecir lo que sucederá en diversas circunstancias.

Un ejemplo de ley que ha sido formulada en lenguaje matemático, es la Segunda Ley de Newton, que dice:

Un cuerpo sometido a la acción de una fuerza neta, se mueve con una aceleración proporcional a dicha fuerza y en la misma dirección y sentido.

En lenguaje matemático se expresa:

$$\vec{F} \propto \vec{a} \quad \text{o} \quad \vec{F} = m\vec{a}$$

donde F es la fuerza
 a es la aceleración
 m la masa del cuerpo, que es la constante de proporcionalidad.

La formulación matemática de esta ley dice esencialmente lo mismo que su enunciado en palabras.

Ahora bien, una ley tiene términos explícitos, como en este caso son: masa, fuerza y aceleración, pero existen otros que están implícitos y es importante tener en cuenta porque en un momento dado pueden afectar la validez de la ley, por ejemplo, no se dice que dependa de su temperatura, volumen, composición... ni de las fases de la Luna; en este caso particular se sabe que sólo es válida en sistemas macroscópicos, ya que falla al aplicarla a fenómenos microscópicos como es el caso de partículas atómicas, donde se debe aplicar la mecánica cuántica... ¡lo que constituye otro problema!

Todavía nos queda por comentar que para llegar a la segunda ley de Newton," fue necesario establecer los conceptos de masa, aceleración y fuerza, que llevaron muchos años de trabajo, sobre todo la idea a aceleración, que no es un concepto obvio, así también hubieron de encontrarse métodos confiables para medir los valores de F , m y a , antes de poder enunciar dicha ley.

1.8. TEORÍA

Teoría es un sistema de leyes con relaciones mutuas. Una teoría es tanto mejor cuanto mayor sea la fracción del Universo en que se aplica.



Fig. 1.5. Maxwell mostró que los fenómenos eléctricos, magnéticos, y ópticos eran consecuencia de su teoría electromagnética, la que publicó a mediados del siglo pasado. Las aplicaciones de la teoría electromagnética han cambiado nuestro modo de vivir.

Por ejemplo, la Teoría electromagnética está contenida en las cuatro ecuaciones de Maxwell, y la fuerza de Lorentz, con las cuales podemos interpretar los fenómenos electromagnéticos, incluyendo los problemas de cargas en reposo y fuerzas en campos magnéticos. Otro ejemplo es la teoría cinética de los gases, que nos permite calcular las propiedades de los gases a partir del conocimiento que se tiene acerca de qué están constituidos por moléculas, que se mueven de acuerdo con las leyes de la mecánica y con probabilidades de choques regidos por leyes estadísticas.

1.9. MODELOS

Modelo es una abstracción idealizada de un objeto o de un evento en estudio.

Construir modelos es una de las tareas primordiales del científico, pero, ¿por qué necesita elaborar modelos? La respuesta es sencilla: Porque dado un evento (natural) complejo, no es posible estudiarlo en todos sus aspectos para comprenderlo, por ello es necesario simplificarlo e idealizarlo para su análisis.

Existen dos tipos de modelos: los teóricos o formales y los materiales o reales.

Modelo formal es la expresión simbólica (en términos lógicos) de un sistema idealizado, con las propiedades esenciales del sistema original. Cualquier ley o teoría es un modelo formal de los fenómenos en que se aplica.

Modelo material es la sustitución de un sistema real por otro más simple, que tiene algunas propiedades más simples que el modelo original. Por ejemplo: las características de vuelo de un avión se determinan usando pequeños modelos a escala en túneles de viento; un mapa nos presenta en pequeña escala los accidentes geográficos relevantes de una región. Si el mapa presentara todas las características, tendría el tamaño de la región, ¡lo que lo haría inútil!

Un ejemplo de modelo formal es el Sistema Solar, representado por las leyes de Kepler, las cuales a su vez pueden deducirse de la Ley de la Gravitación Universal y las Leyes de la Mecánica.

1.10. CLASIFICACIÓN DE LAS CIENCIAS

Para su estudio, las teorías se agrupan según su campo de aplicación, en las diferentes ciencias particulares que conocemos como: física, química, biología, sociología, etc., y reservamos la palabra ciencia para referirnos al conjunto formado por todas ellas. Esta clasificación facilita su estudio, aunque cada vez encontramos en mayor número, ejemplos de fenómenos que podrían clasificarse en más de una ciencia, dando origen a ciencias como biofísica, fisicoquímica, geofísica y otras. No perdamos de vista que estas clasificaciones "nuestras" no afectan a la naturaleza en la cual sus fenómenos son interdisciplinarios.

Existen diversas clasificaciones de las ciencias, propuestas por diferentes autores, de las que mencionaremos las siguientes: la tradicional ³ clasifica en ciencias de observación, como la astronomía; y de experimentación, como la química. M. Bunge ⁷ las divide en dos amplias ramas: las formales, como la lógica y las matemáticas y las factuales, que a su vez las subdivide en naturales (como la biología, física, química y psicología individual) y las culturales (como la psicología social, sociología, economía, ciencia política, historia material e historia de las ideas).

También es frecuente clasificarlas en tres grupos:

- a) Ciencias exactas, como la matemática.
- b) Ciencias naturales, como la física, química, astronomía.
- c) Ciencias humanas, como la sociología, ciencias políticas.

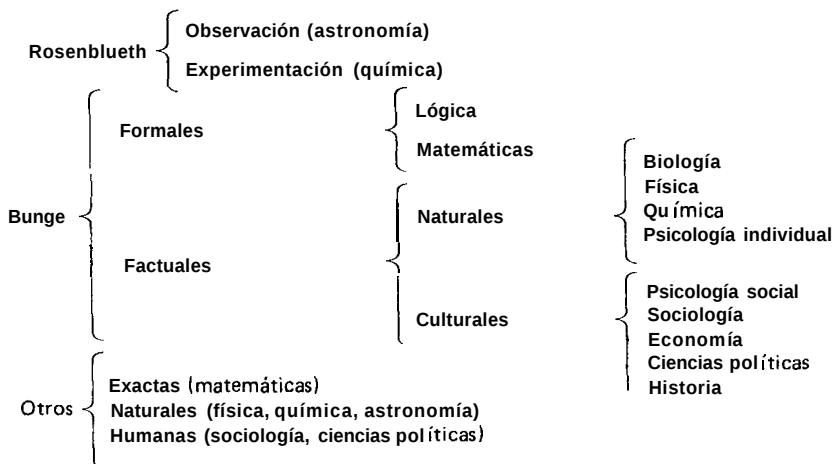


Fig. 1.6. Diversas clasificaciones de las ciencias, propuestas por diferentes autores. No es fácil definir la frontera entre varias ciencias.

Así como es difícil clasificar un fenómeno dentro de cierta ciencia, también lo es clasificar ciertas ciencias, como en el caso de la psicología y la historia, que diferentes autores clasifican de diferentes maneras. Podemos mencionar que esta es una preocupación más de los filósofos que de los científicos, ya que éstos últimos han escrito poco sobre el tema.

Aunque cada rama de la ciencia tiene sus propios problemas y los resuelve con reglas y procedimientos especiales, desarrollados por los científicos según sus necesidades, existen ciertos rasgos comunes que facilitan su estudio. El estudio de los diferentes métodos desarrollados y aplicados en las ciencias, lo denominan los filósofos *metodología de la ciencia* y constituye un vínculo entre la filosofía y la ciencia. Eli de Gortari ⁸ dijo: "Para integrar la concepción del universo, la filosofía ordena los resultados científicos, hace una interpretación crítica y armoniosa de ellos y estructura, luego, la síntesis que representa la imagen racional y objetiva que tenemos del universo", o sea que toca al filósofo hacer la interpretación crítica de

los resultados científicos y de los métodos que se usan para obtenerlos. Para más detalles véase el apéndice A.

Así como se presentaron problemas para definir ciencia, también se observan para hacer una clasificación de ella; no está por demás aclarar que las clasificaciones de ciencia aquí presentadas, no son las únicas; existen otras que, dependiendo del lector, quizá puedan ser más adecuadas; lo que sí se quiere hacer notar es la dificultad que entraña el definir y clasificar a la ciencia, y la casi imposibilidad de uniformar los criterios al respecto, debido a las diferentes corrientes filosóficas y que algunas de ellas son irreconciliables entre sí.

Ahora bien, dado que son muchas las leyes que expresan relaciones numéricas de ciertas variables, o provienen de medidas experimentales, o constituyen predicciones a comparar con resultados experimentales, es necesario partir de lo que implica el proceso de medir una variable, que será el siguiente tema de estudio.

1.1.1. MEDICIÓN DE UNA VARIABLE

Existen ocasiones en nuestra vida diaria en que es necesario medir algunas cosas como la longitud de un mueble, la superficie de una pared, o pesar los ingredientes para elaborar un pastel; en general, cualquier acto de medir lo realizamos mecánicamente y pocas veces o ninguna nos detenemos a reflexionar en lo que significa medir.

Siempre que se mide "algo", a lo que llamaremos variable, lo que en realidad se hace es comparar la magnitud de la misma, con un patrón aceptado como unidad de medición; este patrón de medición puede incluirse en cintas métricas, relojes, balanzas, etc., según sea el caso, y dicha comparación implica contar cuántas unidades del patrón de medición caben en nuestro objeto o variable por medir.

Otra de las cosas sobre la que poco reflexionamos, es la necesidad de tener patrones de medida. Se podrían inventar o definir unidades arbitrarias para medir, tales como dedos, cuartas, pies o brazadas, en las que se usan diferentes partes del cuerpo humano, pero tienen la desventaja de ser de uso personal, ya que no sería conveniente, por ejemplo, comprar alambre por cuartas, o medir la distancia focal de una lente en dedos; somos miembros de una sociedad y necesitamos interaccionar con ella; por ello, se ha convenido en utilizar unidades de medición establecidas o unidades patrón como el metro, kilogramo y segundo, con las cuales nos podemos entender en todos los campos de nuestra vida: social, comercial, técnico y científico. Pero lo importante en este curso es que:

Medir implica comparar y leer una escala

Y además:

Una medida es el resultado de una operación humana de observación.

1.1.2. INCERTIDUMBRE Y ERROR

Ahora bien, dado que una medición⁹ es el resultado de una operación humana de observación, no es una verdad absoluta, sino que contiene cierto grado de incertidumbre; dicho en otras palabras: al medir o leer una escala, damos una interpretación muy personal de la lectura, es muy difícil que dos personas reporten la misma medida de una variable, siempre habrá una ligera diferencia que indicará los límites dentro de los cuales se encuentra una medida y la llamaremos incertidumbre. Debemos aclarar que muchos autores prefieren llamar error a la incertidumbre de una medida, pero es preferible usar la palabra error para significar una equivocación en la lectura, escritura o procedimiento por parte del observador; además, puesto que los errores (equivocaciones) pueden detectarse al repetir una medida, consideraremos que no contribuyen a la incertidumbre.

Dado que existe confusión sobre el tema de la incertidumbre de una medida, analizaremos algunos ejemplos que pongan de manifiesto: de qué depende, cómo se determina y cómo se usa.

Comencemos por saber de qué depende la incertidumbre de una medida; para ello imaginemos la siguiente situación:

Durante un juego de fútbol se rompió el vidrio de una puerta y sabemos que para evitar problemas con el dueño, es necesario reponerlo; para ello tomamos una cinta métrica y medimos el ancho y largo del marco donde encaja el vidrio. Las lecturas que obtenemos podrían ser 65.4 cm y 97.8 cm, respectivamente; pero como el costo del vidrio se reunió apuradamente por cooperación de los jugadores, la persona que toma la lectura debe verificar que los lados del marco sean paralelos, por lo que mide el largo y el ancho en sus extremos y en medio, o sea, tres lecturas para cada uno. Si las tres lecturas para el largo y el ancho son las mismas, ello indica que el marco es un rectángulo de forma regular.

Ahora bien, como la persona no debe cometer error al leer, a riesgo de que si lo hace tendrá que pagar de su bolsa el vidrio, tiene la duda acerca de qué tanto pudo equivocarse al medir. En otras palabras, ¿cuál es la incertidumbre en la medida?

Repasemos lo que hizo al medir: colocó la raya del cero de la cinta en el borde interior del marco, estiró la cinta perpendicular al marco hasta el borde interior opuesto; observó que la raya del milímetro más cercana era la cuarta, y su lectura fue de 65.4 cm; con ello lo que puede asegurar es que 65.4 cm es el valor más cercano al valor real, ya que 65.5 cm sería mayor y 65.3 cm es menor. Así, de hecho, al medir, lo que se determina es un intervalo dentro del cual está el valor buscado; por ejemplo: en el caso que nos ocupa, el intervalo se puede tomar de 65.35 cm a 65.45 cm, si se hace la razonable suposición de que al medir, el borde del marco no puede encontrarse ni más allá de 0.5 mm de la raya cuatro, ni a menos de 0.5 mm de la misma, porque entonces la estimación de la lectura sería diferente de 65.4 cm.

Así que para expresar que la incertidumbre es de 0.5 mm a ambos lados de la raya cuatro, se dice que el ancho es 65.4 ± 0.05 cm (fig. 1.7).

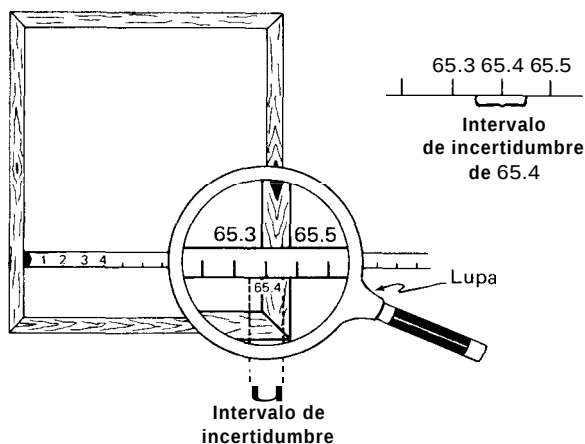


Fig. 1.7. Vista ampliada del intervalo de incertidumbre en una medida. En este caso se tomó que Δl = la mitad de la mínima división de la escala.

Pero esto nos conduce a una reflexión importante: sólo podemos estar seguros de las cifras que aparecen y no debemos agregar ninguna más, ni siquiera ceros después del punto que parecería no afectarla matemáticamente, porque implicaría mayor precisión en la medida. Así, si alguna persona dice que el ancho medido en el marco de la puerta es de 65.40000000 cm, podremos rebatirla y contestar que es falso, ya que ese número de ceros indica que la lectura se hizo con una precisión comparable al diámetro de los átomos y eso es imposible, al menos con una cinta métrica. En consecuencia, de ahora en adelante sabremos que escribir, por ejemplo, 65 es diferente de 65.0 porque el intervalo de incertidumbre en el segundo es diez veces menor que el primero.

Este sencillo ejemplo indica que aun en el supuesto caso de que una medida se repita al leer varias veces, tiene una incertidumbre, asociada con la mínima división de la escala; todavía existe la posibilidad de medir con mayor precisión para reducir la incertidumbre, pero no es conveniente porque:

1. Con el uso de una lupa se podría ampliar la escala para leerla con mayor precisión, pero entonces aparecerían las irregularidades del marco de la puerta, lo que podría dar origen a una diferencia significativa al medirlo en distintas posiciones.

2. Aun en el caso de que el marco estuviera muy regular en sus bordes, no se requiere medir con tanta precisión, ya que un vidrio con las dimensiones exactas del marco, es probable que no entre y por lo tanto no pueda colocarse. ¿Por qué?

Porque así como hay incertidumbre al medir, también la hay para cortar, lo que influiría para que el vidrio pudiera ser ligeramente mayor o menor que el tamaño requerido; si es menor entrará en el marco sin dificultad, pero si es mayor habrá problemas porque entonces no cabría aunque sólo sea por un milímetro y rebajar un milímetro a lo largo del vidrio ¡no es particularmente sencillo! Para evitar tropiezos, los bordes de

los marcos de puertas y ventanas tienen un ancho de 5 a 10 mm, así que podemos quitar tres o cuatro milímetros en las medidas de largo y ancho del vidrio y asegurar así la entrada del vidrio en el marco, con facilidad. Como última observación diremos que se debe tomar en cuenta el estado del marco donde se colocará el vidrio: si es muy irregular, se tomarán más medidas para notar la diferencia y decidir lo más conveniente, quizá sea posible usar la más pequeña o calcular un promedio de ellas.

En fin, si existen dificultades para medir una longitud, es de esperar lo mismo cuando se trata de otras mediciones en las que se lea una escala: como en las balanzas, cronómetros, amperímetros, etc., en todas ellas, además de la incertidumbre asociada con la mínima división de la escala, tiene otra debida a la calibración original del aparato de medida; en general, esa incertidumbre la determina el fabricante y la reporta en el folleto de manejo del aparato. De ahora en adelante usaremos (porque así se acostumbra) la palabra precisión para referirnos a la incertidumbre en una medida; diremos que una medida tiene mucha precisión cuando su intervalo de incertidumbre sea pequeño, o que es de poca precisión cuando su intervalo de incertidumbre sea grande.

1.13. VALOR PROMEDIO

En el ejemplo del marco de la puerta se mencionó que al usar un instrumento más preciso (lupa) para aumentar la sensibilidad nos permitirá observar las irregularidades del borde, que producirían variaciones en las mediciones; eso quiere decir que si midiéramos diez veces el ancho, obtendríamos diez valores distintos. No se piense que se trata de una situación exagerada; de hecho es común que al hacer una medición o un experimento, se encuentren valores diferentes cada vez que se repita; por ejemplo, para caracterizar la elasticidad de una pelota, se podría medir la altura a la que rebota cuando se suelta desde un metro. Si repetimos el experimento diez veces, obtendremos diez resultados distintos.

Las observaciones anteriores nos conducen a una pregunta que es típica de las ciencias naturales: ¿cuál es el valor representativo de un conjunto de valores, obtenidos en las mismas condiciones?, y asociada con esta pregunta, tenemos otra: ¿cuál es la incertidumbre en esos casos?

Para contestar la primera pregunta es necesario considerar los fines para los que se requiere el valor representativo, y cuáles pueden ser las causas por las que difieren las medidas; por ejemplo: si se quiere encontrar el tamaño mínimo de la broca que se necesita para colocar cierta cantidad de remaches, basta medir el diámetro de éstos y elegir el diámetro del mayor de ellos, como la medida que buscamos. Pero si lo que se desea es caracterizar el grupo de remaches para su venta, entonces el valor representativo será el valor medio o promedio, que se obtiene al sumar todos los diámetros y dividir entre el número de remaches medidos. Cuando se usa el valor medio o promedio, se supone en forma implícita que las causas de error originan desviaciones pequeñas alrededor del promedio, y que tales desviaciones pueden ser positivas o negativas con igual probabilidad;

en otras palabras: el número de remaches con diámetros mayores que el valor medio, es igual al número de remaches con diámetro menor que el valor medio.

1.14. MÁXIMO ERROR POSIBLE

Respecto a la segunda pregunta, acerca de cuál es la incertidumbre en ese tipo de medidas, puede interpretarse de dos maneras: una de ellas se basa en la teoría de probabilidades, que nos dirá qué tanto se alejan los diámetros medidos, del valor medio, pero esta incertidumbre la estudiaremos más adelante. La otra interpretación que analizaremos ahora, utiliza una definición consistente con la que se hizo al escoger la mitad de la mínima división de la escala, que garantiza que el valor "real" del objeto medido esté dentro del intervalo reportado. Para ello, se repite una medida varias veces para tener un número suficiente de lecturas; así, el intervalo de incertidumbre o de error estará delimitado por las lecturas máxima y mínima. Al intervalo así definido se le llama máximo error posible: es preferible que el número de medidas sea grande, para tener la seguridad de que cualquier lectura posterior quede dentro del mismo intervalo.

Ahora bien, además de las causas de error ya señaladas, existen otras relacionadas con el observador y su procedimiento experimental, ello quiere decir que es posible que la persona tenga tendencia a leer valores altos o bajos en forma sistemática, o ser más o menos cuidadosa, o también las lecturas pueden afectarse por factores externos como humedad, temperatura, presencia de luz, etc., que no se esperaba que influyeran en las medidas.

Lo anterior nos conduce a pensar que la incertidumbre de una medida depende de:

1. El objeto o fenómeno por medir. Sus características determinan la repetibilidad en las medidas o un conjunto de valores; es decir, si al repetir varias veces una medición, se obtienen resultados iguales o diferentes.
2. El instrumento de medida. Su buen o mal funcionamiento, así como su precisión y sensibilidad contribuirán en menor o mayor grado en la determinación de la incertidumbre.
3. El observador es el que manipula los instrumentos y decide el procedimiento experimental.

Estos tres factores se pueden resumir en que:

La incertidumbre en una medida depende de lo que se mide, con qué se mide y quién lo mide.

1.15. VALORES EXPERIMENTALES

Veamos ahora cómo se determina la incertidumbre o error en una medida.

Dado que todo valor experimental es incierto, una medición debe incluir un valor representativo y un intervalo de incertidumbre que contenga el valor "real"; es decir, una magnitud experimental M se expresa como:

$$M = m \pm \Delta m$$

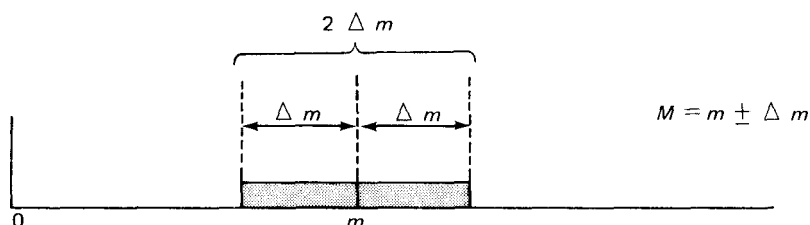


Fig. 1.8. Cuando medimos, determinamos un intervalo, cuyo ancho nos representa la incertidumbre en la medida. Medidas posteriores deben caer dentro de este intervalo.

dónde m es el valor representativo y Δm es el semiancho del intervalo de incertidumbre o error, cuando el valor representativo está centrado en dicho intervalo (fig. 1.8). En la mayoría de los casos se escoge como valor representativo al promedio aritmético (suma de todos los valores, entre el número de valores) y Δm se determina según la repetibilidad de la medida, en la siguiente forma:

a,) Si la medida repite, el intervalo de incertidumbre o error será:

$$\Delta m = \frac{\text{mínima división de la escala}}{2}$$

b) Si la medida no repite, el ancho total del intervalo de incertidumbre o error $2 \Delta m$, será:

$$2 \Delta m = \text{lectura máxima} - \text{lectura mínima}.$$

Esta determinación supone que el valor representativo o promedio quedó centrado en el intervalo; de no ser así, se darán diferentes límites según se use el signo (+) o el signo (-).

Dada la simplicidad de estas determinaciones, se usa una sola cifra significativa para expresar la incertidumbre, como ya se vio en el ejemplo del marco de la puerta donde la medida fue $(65.4 \pm 0.5 \text{ cm})$.

Más adelante veremos cómo tomar en cuenta la incertidumbre asociada a la calibración del instrumento de medición; por ahora se supone que es tan pequeña que no vale la pena considerarla y aunque parezca arbitrario, sucede con frecuencia en medidas de poca precisión.

1.16. USO DE LA INCERTIDUMBRE

Una vez que se conoce cómo calcular la incertidumbre, el siguiente paso es saber cómo usarla; para ello daremos los siguientes ejemplos:

1. Si se quiere calcular la cantidad de pintura necesaria para pintar una habitación, bastará medir las dimensiones de las paredes con una precisión de decenas de centímetros, ya que en las latas de pintura se estima en metros cuadrados la superficie que pueden cubrir.
2. Si se trata de instalar muebles en un baño, será necesario medir con una precisión de milímetros para asegurar que las tuberías encajen en los orificios adecuados y no correr el riesgo de hacer hoyos más grandes o forzar la tubería.
3. Cuando hay que decidir si los cilindros de un coche requieren ser rectificadas, deberán medirse con una precisión de milésimas de pulgada, ya que desgastes de ese orden de magnitud, reducen la potencia del motor.
4. Si se trata de comparar dos modelos que predicen el periodo de un oscilador armónico, y la diferencia predicha es de 0.003 s, se requiere que la medida tenga una incertidumbre inferior a 0.001 s.

De los ejemplos anteriores, se concluye que la incertidumbre de una medición deberá estar acorde con el uso que se le vaya a dar; por lo que: *antes de medir, se debe saber para qué se mide*. En otras palabras, el simple hecho de medir requiere consideraciones previas, determinadas fundamentalmente por el propósito de la medición y sólo después de saber cómo y para qué se usarán los valores numéricos obtenidos, se podrán escoger los instrumentos y el proceso de medición.

1.17. ACUERDO ENTRE TEORÍA Y EXPERIMENTO

La incertidumbre, asociada a toda medida, tiene implicaciones de gran alcance, en especial cuando los datos numéricos se usan para inducir una ley. En sí, una ley equivale a una predicción que esperamos se cumpla no sólo en un número infinito de casos, sino además en la interpolación (para valores intermedios entre los valores experimentales) y la extrapolación (para valores medidos fuera del intervalo experimental). Cuando se dice

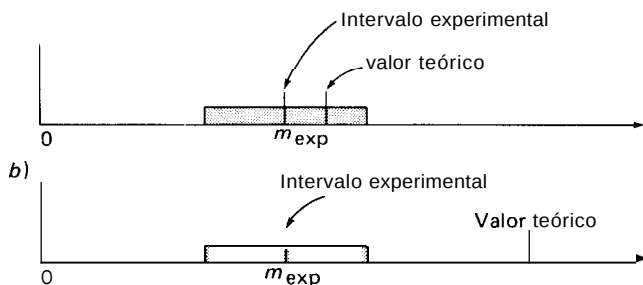


Fig. 1.9. a) Hay acuerdo entre teoría y experimento. b) Hay desacuerdo entre teoría y experimento.

que un experimento verifica o prueba una ley, equivale a decir que los valores calculados al aplicar dicha ley, se encuentran dentro del intervalo determinado por las medidas experimentales. En tales casos sólo se puede decir que hay acuerdo entre teoría y experimento, pero no es posible asegurar que se ha probado esa ley; a propósito del tema, es oportuno relatar la siguiente anécdota:

En 1915, A. Einstein predijo en el marco de la Teoría General de la Relatividad, que al pasar un rayo de luz tangente al borde del Sol, sería desviado hacia el centro, como si la gravedad solar distorsionara el espacio; la desviación sería tan pequeña, 1.72", que fue necesario esperar el eclipse de Sol del 29 de mayo de 1915 para medirlo, aprovechando la posición de una estrella que estaba en el borde solar. Así fue como llegaron a Brasil y Africa, expediciones preparadas para medir un desplazamiento angular tan pequeño; sus resultados confirmaron la predicción de la teoría y la noticia invadió el mundo científico. El matemático Littlewood (quien a su vez lo supo del científico Edington), se lo comunicó con la siguiente nota a Bertrand Russell:

Querido Russell:

La teoría de Einstein está completamente confirmada. El desplazamiento predicho era 1.72" y el observado es $(1.75'' \pm 0.06'')$.

Suyo:

J. E. L.

Tal acontecimiento pone de manifiesto la imposibilidad de hablar acerca de que una medición esté de acuerdo o no con una teoría sin la determinación simultánea de su incertidumbre.

Se ha mencionado que cuando se aplica una ley para calcular algunos valores y éstos quedan dentro del intervalo determinado por medidas experimentales, se dice que hay acuerdo entre teoría y experimento pero no comprobación de la ley; porque probar una ley en el sentido estricto de la palabra, implica demostrar que se cumple en todos los casos posibles, lo que no es posible hacer debido a que el número de ellos sería infinito.

Puede suceder que al aplicar una ley, el valor calculado no se encuentre dentro del intervalo determinado experimentalmente, ello prueba la no validez o aplicabilidad de la ley al caso en cuestión; en tal situación, es necesario modificar o desechar por completo la ley propuesta, lo que obliga a trabajar más para encontrar las pistas que indiquen una nueva relación o modelo. A continuación se harán nuevas hipótesis de trabajo que servirán como guía provisional y cuando estas hipótesis se cumplan para muchos casos, entonces serán aceptadas como leyes. Pero la frontera de demarcación entre hipótesis y leyes nunca estará bien definida; puesto que en toda ley siempre existe el elemento de duda, cuando fallan al medir con mayor precisión o aplicarse a nuevas situaciones. ¿Se les debe considerar entonces como hipótesis?, o ¿son modelos simplificados del mundo real?

Se debe reflexionar que una ley es una abstracción en la que se eliminan todas las variables que se estiman superfluas y se relacionan las que se consideran relevantes a nuestro **problema**. Una ley que tomara en cuenta todas las variables de una situación real, no sería demasiado útil, ya que sería prácticamente imposible reproducir un número infinito de variables, porque de hecho un experimento no se puede repetir cada vez en todos sus detalles.

Existen algunas leyes que a pesar de fallar en ciertas circunstancias, se les sigue llamando leyes, por ejemplo:

Las leyes de Newton de la mecánica clásica no son aplicables a cuerpos con velocidades muy grandes (cercanas a la velocidad de la luz) o cuando los cuerpos tienen muy poca masa (micropartículas). En cambio, la Teoría de la Relatividad de Einstein se aplica a cuerpos con altas o bajas velocidades, y la mecánica cuántica describe el movimiento de micropartículas (átomos) o macropartículas (cuerpos grandes); pero sucede que tanto la Teoría de la Relatividad como la mecánica cuántica, aplicadas a cuerpos macroscópicos con bajas velocidades, se reducen a las Leyes de Newton, que son mucho más sencillas de utilizar, razón por la cual siguen vigentes para predecir el movimiento de los cuerpos que nos rodean.

Para finalizar con los conceptos básicos de este capítulo, recalcaremos que se llama teoría a un conjunto de leyes referidas a una misma zona del conocimiento, y no es extraño encontrar que algunas leyes se puedan derivar de otra ley más general, por ejemplo:

Las leyes de Kepler, para el movimiento planetario, es posible deducirlas de la Ley de la Gravitación Universal y las Leyes de Newton; a su vez la Ley de la Gravitación Universal se considera una consecuencia de la Teoría de la Relatividad.

Como podrá observarse, los conocimientos en la ciencia no son aislados, se relacionan unos con otros, aún en diferentes ramas del conocimiento, como lo es la física y la astronomía, o la química y la biología o la matemática y la física, etc. En capítulos posteriores se tendrá oportunidad de aplicar los conceptos que en éste se han estudiado. En el capítulo 4 se hace un resumen del concepto de incertidumbre o error, y cómo se combinan las incertidumbres al aplicarse en diversas fórmulas.

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. Suponga que tiene que convencer a un niño de 10 años que la Tierra es redonda. ¿Qué argumentos o demostraciones usaría?
2. ¿Cuál es la definición de ciencia que usaremos?
3. Mencione alguna dificultad para definir el concepto de "ciencia".
4. ¿Qué entiende por hipótesis?
5. ¿Qué entiende por medir?
6. ¿De qué depende la incertidumbre o "error" en una medida?
7. ¿Cómo se expresa un valor numérico medido experimentalmente?
8. Mida con su regla el ancho de este libro y expréselo en centímetros, incluyendo su incertidumbre.

2

Método científico

- 2.1. Definición
- 2.2. Postulados del método científico
- 2.3. Reglas del método científico
- 2.4. Ciencia y técnica
- 2.5. Métodos científicos
- 2.6. Método de casos
- 2.7. Método estadístico
- 2.8. Método inductivo
- 2.9. Método deductivo
- 2.10. Método experimental
- 2.11. Análisis gráfico

El estudio del método científico no es reciente, numerosos hombres de ciencia y sobre todo filósofos se han dedicado a su análisis; ya Galileo, Newton y Descartes, por mencionar algunos, se preocupaban no sólo por los problemas que pudiera resolver la mente humana, sino, además, por el procedimiento para resolverlos; ellos se percataron de que dicho procedimiento debía basarse en "ciertas reglas" para que condujera a resultados veraces y confiables. Puede decirse que tales reglas, son sentido común organizado y se aplican a problemas científicos, técnicos e incluso de la vida diaria, y de su estudio se ha obtenido lo que se llama método científico.

2.1. DEFINICIÓN

Para iniciar nuestro análisis sobre el método científico, lo definiremos como:

El conjunto de reglas que señalan el procedimiento para llevar a cabo una investigación.

Ahora bien, ese conjunto de reglas debe partir de principios muy claros, lógicos y evidentes, llamados *postulados* del método científico, que servirán para dar validez lógica a las reglas del método científico.



Fig. 2.1. Además de sus contribuciones filosóficas, Descartes creó los sistemas "cartesianos" de coordenadas, lo que dio origen a la geometría analítica.



Fig. 2.2. Newton formula las leyes que rigen el movimiento de los cuerpos y la Ley de la Gravitación Universal, con lo que puede deducir las leyes de Kepler que se aplican a los movimientos de los planetas. Además de ser uno de los creadores del cálculo diferencial.

Una vez aclarado que el método científico consiste en un conjunto de reglas apoyadas en ciertos postulados, vamos a hacer un poco de historia sobre el tema y dar algunos ejemplos.

Si revisamos la bibliografía sobre el método científico, encontramos que según la época y el autor, tanto las reglas como los postulados difieren; ello se debe (como señalamos en el capítulo anterior)' a que la ciencia está en constante evolución y a que los puntos de vista de los autores (aun de una misma época) divergen por cuestiones ideológicas.

Entre los primeros estudios serios sobre el método científico, tenemos el *Discours de la Méthode pour bien conduire la raison et chercher la vérité dan less Sciences*, hecho en 1637 por Descartes, mejor conocido como *Discurso del método* y donde el autor pone de manifiesto su preocupación por los problemas que puede resolver la mente humana con base en hechos accesibles.

Poco tiempo después, Isaac Newton formuló las *Reglas del método*, aunque más que reglas constituyen postulados acerca de la naturaleza, por derivarse de principios evidentes; dichas *Reglas del método* son:¹⁰

- I. De las cosas naturales no se deben admitir más causas que las reales y suficientes para explicar los fenómenos.
- II. Por lo tanto, efectos naturales del mismo género tienen la misma causa.
- III. Aquellas cualidades de los cuerpos que no se pueden aumentar ni disminuir, y aquellas que se vuelven a encontrar en todos los cuerpos sobre los cuales es posible realizar experimentos, deben ser consideradas cualidades universales de los cuerpos.

Como puede verse las *Reglas del método* de Newton son en realidad postulados, como ya mencionamos, y su método de trabajo queda implí-

cito en su frase "hypotheses non fingo" (no hago hipótesis), que consistía en:

- a) Atenerse a hechos empíricamente comprobados.
- b) Generalizarlos por inducciones sucesivas.
- c) Describir la *naturaleza* sin hacer afirmaciones que no estén apoyadas en hechos experimentales.

Así, tenemos que para Isaac Newton, creador de la Ley de la Gravitación Universal, le basta que exista la fuerza de gravitación, que actúe de acuerdo con su ley y que sea suficiente para explicar los movimientos de los planetas y las mareas, pero él mismo dice:

"Sin embargo, no he logrado deducir de los fenómenos la razón de estas propiedades de la gravedad y no hago hipótesis, ya que todo aquello que no se deduce de los fenómenos se convierte en hipótesis, y en la filosofía experimental no caben ni hipótesis metafísicas ni físicas o de las cualidades ocultas o mecánicas."

Las palabras de Newton al explicar por qué no hace hipótesis se pueden entender en nuestros días si cambiamos la palabra hipótesis por especulación, entendiendo por esto último argumentos basados en "cómo deben ser las cosas" o "la voluntad de Dios".

En la época actual usamos la palabra hipótesis con el sentido de interpretación plausible o tentativa, y ocupa un lugar importante en nuestros esfuerzos por crear un conjunto de teorías para explicar cómo funciona la naturaleza; dichas teorías se generan a partir de los descubrimientos de ciertas leyes, las que a su vez se obtuvieron de experimentos basados en hipótesis. Así, nos percatamos de que el avance de la ciencia moderna tiene su origen en hipótesis de trabajo fructíferas, las cuales se formulan de la observación de un fenómeno de la naturaleza o al tratar de resolver algún problema.

Ya que hemos definido método científico como *el conjunto de reglas que señalan el procedimiento para llevar a cabo una investigación*, y además mencionamos que tales reglas deben partir de principios lógicos y evidentes para darles validez, llamados Postulados del método científico, nos ocuparemos de ellos a continuación.

2.2. POSTULADOS DEL MÉTODO CIENTÍFICO

Mencionamos con anterioridad que los postulados pueden diferir de un autor a otro; por tal motivo no es conveniente ni adecuado tratar de imponer ningún criterio. En nuestro caso particular adoptaremos los de A. Rosenblueth, quien hizo un resumen claro de esos postulados en los cuales se basa la ciencia moderna. De tales postulados destacan los siguientes:

a) **"La existencia de un Universo o realidad exterior: la materia o sustancia de los filósofos."** Aunque este Universo se nos manifieste a través de los órganos de los sentidos, existe independientemente de nosotros, y buscamos los atributos objetivos y relaciones susceptibles de ser observadas por diferentes observadores, sin preocuparnos de elucubrar acerca de la naturaleza íntima de esta realidad externa, o sea lo que los filósofos llaman la esencia. En los fenómenos naturales la ciencia estudia el cómo suceden, pero no nos puede decir el por qué suceden. Por ejemplo: en la atracción gravitatoria entre dos planetas sabemos que la fuerza de atracción es proporcional a su masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, lo cual nos describe cómo es la atracción gravitatoria, pero no podemos contestar a la pregunta de por qué se atraen. Estas preguntas caen en el área de la filosofía o de las religiones, de acuerdo con las inclinaciones personales del interlocutor.

b) **"La posibilidad de hacer observaciones, abstracciones y juicios."** Lo que nos permite aprender de la naturaleza es la observación de su comportamiento, haciendo hipótesis acerca de las causas o relaciones entre los elementos observados (abstracciones) y llegando a conclusiones compatibles con los hechos observados y con el cuerpo de conocimientos conocidos (juicios). Si no existiera esta posibilidad no podríamos interpretar y entender lo que estamos leyendo.

c) **"La validez de la lógica."** Es la que nos enseña a distinguir entre razonamientos correctos e incorrectos, ayudándonos a sistematizar nuestros procesos mentales. Conviene recalcar que aunque la inducción como método para inferir cosas no se pueda probar lógicamente, constituye una de las herramientas indispensables de las ciencias naturales u observacionales.

d) **"La existencia de uniformidad o regularidad en la naturaleza."** Creemos que la naturaleza de las cosas no cambia, que la mesa de ayer es la misma que la de hoy, etc., y que las relaciones entre ellas también se mantienen, de modo que la observación de que el Sol salió ayer, antier, etcétera, hacen plausible la predicción de que saldrá mañana; en otras palabras, todas las inducciones que hacemos están basadas en este postulado, que implica que la naturaleza no cambia de modo caprichoso su comportamiento, lo que nos permite expresar algunas de sus leyes en forma matemática.

e) **"La necesidad de someter a prueba experimental todas las hipótesis, leyes y teorías."** Este postulado no se aplica a las ciencias exactas o formales, a las cuales sólo se les pide que sean autoconsistentes, sin contradicciones internas. Este postulado que nos parece tan natural, fue establecido gracias a los trabajos de Galileo (1564-1642), quien demostró que ciertos conceptos aceptados en la ciencia de sus días eran contradichos por la prueba experimental. En nuestros días nos sirve para evitar la formulación de hipótesis que sólo explican una observación, pero que no constituyen una aportación al no ser aplicables en ninguna otra situación. Al observar que cualquier canica que soltemos cae al suelo, podemos hacer la hipótesis de que caen al suelo porque así es su naturaleza o así está escrito; pero no es una hipótesis fructífera en el campo de la ciencia, ya que es más una afirmación acerca de por qué cae, más que acerca de

cómo cae. Esta última pregunta tiene sentido científico y la responde la Ley de la Gravitación Universal. Las preguntas acerca de la "esencia" de las cosas, caen en el ámbito de las especulaciones filosóficas o religiosas. De modo que cuando en las ciencias naturales se usa en una explicación, la palabra "por qué", en el fondo, se hace referencia a una ley que describe cómo se relacionan las variables de un fenómeno.

Antes de 1905 se creía en la existencia de un tiempo y espacio absolutos, en el que sucedían todos los eventos que observamos. Esto era un postulado implícito en el tratamiento de la mecánica clásica, pero que se aceptaba como obvio a *priori*. Esta creencia fue destruida por la Teoría de la Relatividad en la que el tiempo y el espacio no transcurren de modo independiente, o sea, que la duración de un evento o el tamaño de un objeto depende del sistema de referencia que se use para su descripción. En un principio, esta teoría se usó para explicar el experimento de Michelson-Morley pero sus predicciones, deducidas de su aplicación a otras situaciones, se han visto estruendosamente confirmadas (como la equivalencia entre masa y energía usada en la bomba atómica). En el experimento de Michelson-Morley se trataba de medir la velocidad de la Tierra midiendo la velocidad de la luz moviéndose en la misma dirección o en direcciones opuestas. De acuerdo con la mecánica clásica la velocidad medida debía ser mayor cuando la Tierra y la luz se movieran en direcciones opuestas, siendo la diferencia la velocidad de la Tierra en su órbita. Aunque este experimento se realizó en diversas circunstancias, no fue posible detectar cambio alguno en la velocidad de la luz. Y este resultado fue conocido desde 1887 y aunque se formularon muchas hipótesis para explicarlo, no fue sino hasta 1905 en que Einstein dio a conocer su Teoría de la Relatividad en la que figura como postulado básico que la velocidad de la

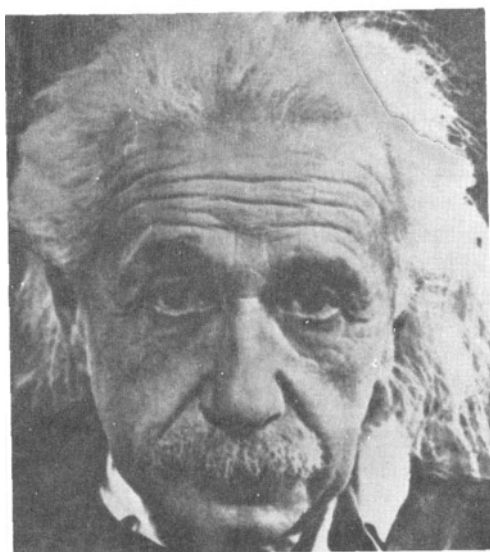


Fig. 2.3. Einstein revolucionó los conceptos de espacio y tiempo, que siempre se habían considerado independientes. La teoría de la relatividad relaciona las medidas de observadores diferentes. También unificó los conceptos de masa y energía, demostrando que son equivalentes.

luz es una constante universal, la cual no depende de la velocidad del sistema en que se le mide, y esta es la razón por la cual no son independientes las medidas de longitudes y tiempos.

Toda esta discusión acerca del tiempo y el espacio absolutos, es para justificar la afirmación de que los postulados mencionados y no demostrados, podrían ser modificados si se demuestra que son falsos. Pero como lo mismo pasa con todas nuestras leyes y teorías, no debe aumentar nuestra incomodidad el saber que nuestros conocimientos no son verdades absolutas, debe hacernos más humildes cuando los compartamos con quien sabe menos.

2.3. REGLAS DEL MÉTODO CIENTÍFICO

Una vez conocidos los postulados más importantes del método científico, toca el turno a las reglas del método científico; un posible enunciado de ellas es el siguiente:"

- a) Analizar el problema para determinar lo que se quiere, formando las hipótesis de trabajo para dar forma y dirección al problema que se está investigando.
- b) Coleccionar los hechos pertinentes.
- c) Clasificar y tabular los datos para encontrar similitudes, secuencias y correlaciones.
- d) Formular conclusiones por medio de procesos lógicos de inferencias y razonamientos.
- e) Probar y verificar conclusiones.

Esta manera de expresar las reglas del método científico la hizo **Eiglbner**. Distintos autores las enuncian de diferente manera, pero esencialmente son las mismas; de hecho, como se mencionó al principio, se puede decir que son "sentido común": hecho método; se les puede reconocer en los trabajos de los científicos, y en la actualidad se aplican también en la planeación de desarrollos tecnológicos, en la producción industrial e incluso en la resolución de problemas caseros (ver Arana).¹²

Las reglas del método científico son una guía valiosa para el investigador, pero no constituyen una receta de aplicación universal. Ayudan de un modo efectivo a resolver problemas, pero su aplicación indiscriminada (sin tener un objetivo) no conduce necesariamente a la formulación de nuevas leyes.

2.4. CIENCIA Y TÉCNICA

Cabe mencionar ahora que la ciencia busca el conocimiento por sí y no le preocupa (porque no es su objetivo) el uso que el hombre dará a esos conocimientos; es la técnica la que se encarga de aplicarlos con el fin de obtener beneficios o perjuicios para la sociedad en que vivimos.

En nuestros días la relación ciencia-técnica es tan íntima que muchas veces suelen confundirse los objetivos. Dicho en otras palabras, si la técnica no proporcionará equipo cada vez más complejo y sensible, la ciencia (en especial la experimental) no hubiera logrado sus notables avances, y a su vez, si la ciencia no suministrara nuevos conocimientos la técnica quedaría estancada; de hecho, se puede decir que ciencia y técnica han estado unidas desde sus orígenes.

Mencionaremos algunos ejemplos donde se manifiesta en forma clara la unión ciencia-técnica:

En la antigüedad, Arquímedes se hizo famoso al resolver el problema de la cantidad de oro contenida en la corona del rey; en él, Arquímedes aplicó el conocimiento de densidad de un material (ciencia).

Muchos años después, Galileo aplicó sus conocimientos científicos para diseñar un medidor de la frecuencia del pulso, basado en las leyes del péndulo. También perfeccionó el telescopio, donde la aplicación de las leyes de la óptica geométrica dio como resultado un aparato que permitió a los comerciantes venecianos conocer el nombre del barco que aparecía en el horizonte, varias horas antes de que llegara al muelle. Este conocimiento les permitía saber qué mercancía llegaba y especular con sus precios.

Ejemplos como los anteriores abundan en la historia de la ciencia; sin embargo, todavía queremos mencionar uno más, por sus características especiales; nos referimos a Benjamín Thompson a quien se le encargó el problema de reorganizar el ejército bávaro. Lo notable de la situación estriba en que el problema se presentó hace dos siglos y Thompson, para resolverlo, postuló que "la investigación científica debía preceder al desarrollo tecnológico", actitud con la cual se adelantaba por mucho a su época.

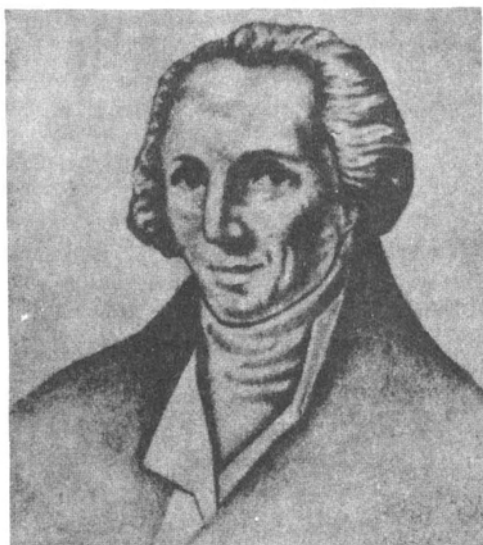


Fig. 2.4. Benjamín Thompson, Conde Rumford, estableció los fundamentos de la termodinámica, y demostró la transformación de trabajo en calor. Inició la era de la investigación tecnológica aplicando sus conocimientos en la solución de problemas prácticos.

Debido a la mala organización del ejército bávaro, Thompson se encontró con un grupo que a pesar de ser muy numeroso era casi inútil como fuerza de combate, lo que se debía a la desmoralización y mal pertrechamiento de sus miembros. Así, puso en práctica su postulado de investigar primero, científicamente, antes de pasar al desarrollo tecnológico; la tarea no fue fácil. Preparar su programa de reorganización le llevó varios años porque estudió hasta el último detalle del funcionamiento del ejército. Del análisis del presupuesto concluyó que los principales problemas por resolver eran vestuario y alimentación, donde los gastos eran mayores. Empezó su trabajo con el problema del vestuario; para ello investigó la conductividad térmica de diferentes telas, teniendo que definir métodos y procedimientos para medirla. Durante su estudio descubrió las corrientes de convección del calor y relacionó el poder aislante de una tela con la cantidad de aire atrapado en sus intersticios. El siguiente paso fue la aplicación de sus conocimientos (desarrollo tecnológico), tarea difícil porque tuvo la necesidad de fundar sus propios talleres de confección de telas y ropas, en los cuales empleó a los mendigos de la ciudad, ya que los industriales establecidos boicotearon sus esfuerzos por conseguir obreros calificados.

Sus trabajos relacionados con la alimentación tuvieron fuertes repercusiones sociales. Aunque partió de la hipótesis equivocada de que el agua era un gran alimento, le sirvió para probar las cualidades alimenticias de sopas preparadas con diversos ingredientes; en particular cambió la opinión que se tenía sobre la patata (papa), considerada en esa época como alimento indigno de los seres humanos. En secreto la añadía a las sopas completamente desbaratada, logrando superar el rechazo inicial; tanto fue así, que la patata constituye hasta nuestros días uno de los alimentos más populares. Pero sus nuevos conocimientos científicos y su aplicación no se detuvieron ahí; investigó las propiedades combustibles de diversos materiales usados para cocinar, para lo cual tuvo que inventar un calorímetro especial. Inventó la olla de presión; modificó el aspecto de las cocinas de esa época, y en lugar de fogón abierto en el que se desperdiciaba mucho calor, confinó el fuego de manera que calentara sólo la marmita. Además, inventó la chimenea con tiro por convección y realizó estudios básicos acerca de la naturaleza del calor y de fotometría.

En los trabajos de Thompson (elevado a Conde de Rumford como premio), se puede distinguir el análisis que hacía del problema general; después lo subdividía en problemas particulares y sobre ellos formulaba hipótesis que le guiaban a recolectar más datos experimentales que le permitían obtener conclusiones, las cuales o bien resolvían el problema o lo conducían a formular nuevas hipótesis. La manera de trabajar de Thompson, constituye la base de lo que llamamos método científico (en su sentido más general) y se ha usado no sólo en sus trabajos, sino en los de todos los científicos del mundo, porque el método científico es universal, no tiene nacionalidad ni doctrina filosófica.

Los ejemplos a los cuales nos hemos referido (Arquímedes, Galileo y Thompson) ponen de manifiesto que desde sus inicios, ciencia y técnica han estado unidas. En nuestros días, algunas técnicas son tan poderosas

que han desarrollado sus propios métodos de trabajo (o procedimientos), adecuados a la instrumentación que representan; tal es el caso de la espectroscopia infrarroja, la microscopía electrónica, la resonancia magnética nuclear, etc., pero debemos aclarar que los procedimientos de dichas técnicas, a pesar de generar resultados experimentales muy valiosos para la ciencia, no tienen la generalidad de ninguno de los métodos científicos conocidos, por lo que sólo se llaman técnicas científicas.

Pero nos hemos referido a métodos científicos y no al método científico que hemos mencionado desde el principio. ¿Por qué? ¿Cuáles son esos métodos?

2.5. MÉTODOS CIENTÍFICOS

Para responder a las preguntas anteriores se debe hacer notar lo siguiente: conforme aumentaron los conocimientos de diversa índole sobre la naturaleza, fue necesario agruparlos según su afinidad; de manera que cada uno de ellos dio lugar a las diferentes ramas de la ciencia. Ahora bien, puesto que las diversas ramas de la ciencia tienen sus propios problemas, han desarrollado diferentes métodos para resolverlos y se usa el nombre genérico de método científico para referirnos a ellos. Sin embargo, eso no quiere decir que cada rama de la ciencia sólo pueda usar un método particular; toca al investigador elegir el o los métodos más apropiados para resolver su problema, aunque dichos métodos no se hayan desarrollado dentro de la ciencia que practique.

Es importante mencionar que los juicios y análisis de la filosofía, son decisivos en la elaboración de un método científico y se han logrado producir métodos muy valiosos como el inductivo y el deductivo, los cuales tienen aplicación no sólo en todas las ramas de la ciencia, sino en cualquier situación a la que se enfrente el ser humano.

Entre los métodos científicos más conocidos se encuentran:

- a) Método de casos.
- b) Método estadístico.
- c) Método inductivo.
- d) Método deductivo.
- e) Método experimental.

A continuación describiremos con brevedad en qué consisten dichos métodos."

2.6. MÉTODO DE CASOS

Al observar un mismo fenómeno social, como puede ser conducta, actitudes o valores morales, es frecuente encontrar tanto patrones o situaciones diferentes, como grupos sociales se tengan en estudio. La primera impresión al hacer un análisis de ese tipo de problemas, donde no hay

repetibilidad, podría ser: olvidarlo, empezar de nuevo, o dedicarse a otra actividad, ya que en apariencia, nada puede hacerse; sin embargo, no es así, tales problemas se presentan en ciencias sociales y, para manejarlos, se aplica el método de casos.

En el método de casos, la situación es nueva, la observación es única y por ello, sólo se puede tomar nota de todas las condiciones que se consideren pertinentes a ese caso, con la esperanza de que alguna o algunas de las variables anotadas sea relevante. En forma automática, el observador (o investigador) formula hipótesis acerca de cuáles son los datos importantes, lo cual le sirve de guía para experimentos posteriores (si la situación le permite controlar variables) o para detectar observaciones de casos iguales que ocurran en el futuro. Este método (como ya mencionamos) se usa en ciencias sociales, donde la experimentación con seres humanos presenta serios problemas de repetibilidad y ética.

2.7. MÉTODO ESTADÍSTICO

El método estadístico se aplica en casi todas las ramas de la ciencia, y en general es necesario emplear la teoría matemática de la probabilidad para interpretar sus resultados.

En ciencias sociales, la estadística toma especial importancia cuando se dispone de información concerniente a un gran número de casos que presentan cierta repetibilidad, y se puede proceder con ellos de la siguiente forma: se les clasifica aprovechando los valores de algunas de las variables consideradas relevantes; si se hacen varias clasificaciones, es posible detectar alguna correlación entre variables que puedan escribirse en forma cualitativa (es decir, gráficas), o cuantitativas, por medio de una expresión matemática que se interpretará con ayuda de la teoría de probabilidades.

En ciencias naturales, en particular en los estudios biológicos y médicos, se requiere un profundo conocimiento de estadística para planear sus experimentos e investigaciones, debido a la gran cantidad de variables presentes que pueden afectar los resultados. Por ejemplo: para determinar la efectividad de la vacuna Salk contra la poliomielitis¹³ fue necesario realizar un experimento en el que intervinieron un millón de niños; de otro modo, si tal experimento se hubiera hecho con cien mil niños, los estudios estadísticos previos mostrarían que los resultados no serían concluyentes.

El éxito en la aplicación de los dos métodos anteriores (casos y estadísticos) requieren una labor de previo análisis en las observaciones individuales, para determinar las partes componentes de la observación, clasificándolas después en relevantes o no y tomando nota de las que se espera que contribuyan al fenómeno. Es conveniente mencionar que el número de variables presentes en una observación está limitado tan sólo por la imaginación del observador. El problema del científico es abstraer de la situación real, un modelo que reproduzca las características esenciales del fenómeno observado.

2.8. MÉTODO INDUCTIVO

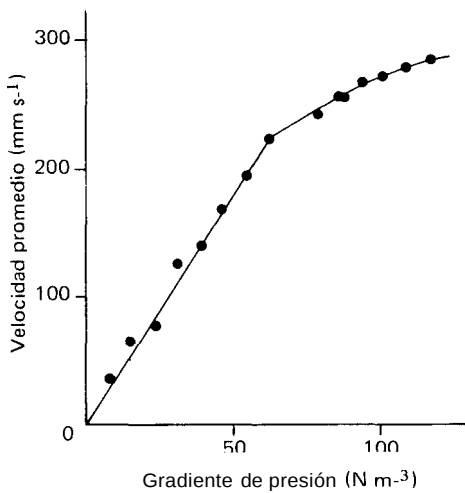
El método inductivo utiliza la información generada tanto del método de casos como del estadístico, para tratar de inducir una relación que incluya no sólo los casos particulares ya estudiados, sino que además permita generalizar a otros. En otras palabras, el método inductivo se apoya en los resultados de algunos casos particulares para establecer una relación general (por ejemplo, una ley) que los incluya a todos.

Aplicar el método inductivo significa hacer inducciones; es una de las labores más difíciles del intelecto humano porque no se cuenta con reglas generales que muestren el procedimiento; llamamos intuición, inspiración, suerte o pensamiento genial (quizá los cuatro mezclados), el del científico que logra sintetizar en una sola ley fenómenos aparentemente desconectados entre sí. Ejemplos de esta labor de inducción los encontramos con frecuencia en las diferentes ramas de la ciencia; en este sentido, son en particular notorias: las Leyes de Newton de la Mecánica Clásica y la Ley de la Gravitación Universal, porque con ellas se pudo explicar tanto el movimiento de un proyectil, como el movimiento de los planetas alrededor del Sol; con ello, las Leyes de Kepler (triumfo de la astronomía observacional), se convirtieron en simples casos particulares de movimientos. En épocas recientes, Einstein en su Teoría de la Relatividad logra mezclar los conceptos de tiempo y distancia, y predice la equivalencia entre masa y energía.

Pero no basta la suerte para descubrir una nueva ley; sucede con frecuencia que un fenómeno no explicable, lo observen varios científicos y cada uno trate de explicarlo con hipótesis diferentes; la manera de saber cuál es la correcta es ponerlas a prueba por medio de los experimentos correspondientes para aceptar la que mejor explique el fenómeno en cuestión. Cuando una hipótesis explica no sólo ese fenómeno, sino muchos más (de la misma naturaleza), entonces el grado de confiabilidad aumenta y puede llegar a considerarse como ley; sin embargo, basta que exista un fenómeno donde no se cumpla la ley, para desecharla y buscar una nueva. De manera que, si bien es cierto que al formular una hipótesis puede deberse a la suerte, es imprescindible que el científico trabaje con cuidado y pulcritud para que al realizar un experimento, no considere como "error experimental" alguna observación anómala o hecho extraño que pueda decidir sobre la validez de esa hipótesis. Por eso se dice que el genio es 1% de inspiración y 99% de transpiración.

Otra vez insistimos que la inducción constituye una labor de síntesis en la que a partir de resultados particulares, se intenta encontrar relaciones generales que expliquen no sólo los casos particulares estudiados, sino la predicción de nuevos por verificar.

Si los casos particulares se pueden representar con números, es posible recurrir al análisis gráfico para facilitar su inducción; ello significa dibujar en coordenadas, que pueden ser cartesianas, polares o semilogarítmicas, los resultados de las observaciones o experimentos para ver si a partir de su gráfica es posible obtener una relación matemática (ecuación) que represente a todos los resultados obtenidos. Cuando se encuentra esa relación



Flujo de agua a través de un tubo

Gradiente de presión ($N\,m^{-3}$)	Velocidad promedio ($mm\,s^{-1}$)
7.8	35
15.6	65
23.4	78
31.3	126
39.0	142
46.9	171
54.7	194
62.6	226
78.3	245
86.0	258
87.6	258
93.9	271
101.6	277
109.6	284
118.0	290

Fig. 2.5. Aunque la gráfica tiene los mismos datos que la tabla, en aquélla se nota la existencia de una región de proporcionalidad. (Tomado de Squires, *Física práctica*.)

matemática es más fácil crear un modelo que describa el fenómeno que se estudia, y se cumple así con el objetivo de la inducción. El análisis gráfico es una herramienta tan poderosa y útil para el científico que su estudio y aplicación ha dado origen a lo que se conoce como técnica de ajuste gráfico o por computadora de ecuaciones, tema que veremos en el capítulo 4.

Queda por hacer un último comentario sobre el método inductivo. No se debe confundir el proceso de inducción de una relación con la inducción matemática, la cual tiene validez absoluta y en realidad constituye una verdadera deducción.

2.9. MÉTODO DEDUCTIVO

El método deductivo analiza las consecuencias de la hipótesis inducida a partir de observaciones particulares; dichas consecuencias se deben hacer sin violar las leyes de la lógica y las matemáticas y además ser coherentes con las leyes establecidas por la ciencia en cuestión; sobra decir que la aplicación de este método requiere un amplio conocimiento de las técnicas matemáticas y de las ciencias afines al campo científico en estudio. Para deducir las consecuencias de una hipótesis o ley, se aplican en la imaginación a situaciones nuevas, a continuación se resuelven las ecuaciones correspondientes, los valores así obtenidos constituyen predicciones de valores para variables que pueden medirse por medio del experimento correspondiente. Si las predicciones concuerdan con el experimento y no se viola ninguna ley establecida, entonces se ratifica la hipótesis o ley que se ha puesto a prueba; pero si se presentara algún caso donde los valores calculados o predicciones estén en desacuerdo con los valores medidos en el experimento

o que violen alguna ley establecida, es necesario revisar los fundamentos en los cuales se basa la hipótesis o ley a prueba, para rectificarla o desecharla.

Puede advertirse que el deducir consecuencias de una hipótesis o ley aplicada a situaciones nuevas o imaginadas, es hacer predicciones, las cuales ratifican, rectifican o desechan dicha hipótesis o ley, según concuerden o no los valores calculados (o predicciones) con los valores medidos al hacer el experimento correspondiente. En muchos casos es necesario combinar con leyes bien establecidas, la hipótesis o ley que se va a probar, en la confianza de que cualquier falla en los principios o fundamentos de cualesquiera de ellas, se reflejará en las predicciones formuladas.

2.10. MÉTODO EXPERIMENTAL

Fue Galileo Galilei el primer hombre de ciencia que se preocupó por sentar las bases del método experimental, motivo por el cual se le conoce como el padre de este método.

El método experimental se aplica principalmente en las ciencias llamadas naturales y se basa en la observación de fenómenos y en la realización de experimentos. Utiliza varios de los métodos ya descritos como es el de inducción, deducción y estadístico, según lo requiera la naturaleza del experimento que se va a llevar a cabo.

Entenderemos por observación al conjunto de datos que se obtienen al observar lo que sucede en un fenómeno que puede estar dentro o fuera de nuestro control.

Cuando se puede reproducir el fenómeno, controlando sus variables artificialmente, se le llama experimento. Por medio del experimento, el científico hace una pregunta a la naturaleza, cuya respuesta tendrá una interpretación correcta, sólo si el experimento está bien diseñado; de no ser así, se pueden asociar otras causas a los efectos observados y se podría llegar al extremo de decir que la danza del médico brujo libró a la Tierra del eclipse de Sol o de Luna observados.

Entre los experimentos controlados o bien diseñados, se denomina experimento ideal al que puede reproducir un fenómeno donde es posible dar diferentes valores a las variables que se consideren independientes y se pueden medir los efectos en lo que se estima son variables dependientes. Tales experimentos se pueden hacer en un laboratorio y repetirse cuantas veces sea necesario; además, se espera que los valores medidos varíen dentro de un rango marcado por la incertidumbre en las mediciones.

Pero la situación del experimento ideal no siempre se presenta; existen fenómenos que por su naturaleza todavía no pueden reproducirse en un laboratorio, ni repetirse a voluntad del científico. Los mejores ejemplos de este tipo de fenómenos se encuentran en la astronomía, como las manchas solares, sin que ello signifique que por ser fenómenos fuera de nuestro control, estén mal diseñados; en tales casos sólo le queda al científico observar y medir según se presenten, para tratar de descubrir las leyes que los gobiernan. De modo que el experimento ideal y la observación son

extremos del grado de control logrado sobre las variables relevantes al fenómeno. La mayoría de las situaciones experimentales son intermedias.

Una vez que hemos acordado lo que entendemos por observación y experimento, trataremos de describir en forma breve (a reserva de hacerlo después con más detalle), en qué consiste el método experimental.

En el método experimental, dada una serie de observaciones, o un problema, se construye un modelo o hipótesis, la que se analiza para encontrar sus consecuencias, de las cuales se hacen predicciones que pueden verificarse por medio del experimento.

Se mencionó que el método experimental hace uso de otros métodos y en efecto así es, porque cuando se hace un modelo o hipótesis a partir de una serie de observaciones, aplicamos el método de inducción; al analizar para obtener consecuencias se aplica el método deductivo; y para manejar los datos del experimento, se usa el método estadístico en todas sus fases, desde lo más elemental hasta la estadística más avanzada, según la naturaleza del problema que se trate. En fin, puede decirse del método experimental, que además de hacer uso de otros métodos, es una herramienta poderosa para el científico que lo utiliza, porque es la manera más eficaz de obtener resultados confiables.

Lo anterior puede resumirse como sigue:

Preocupados los científicos y filósofos por la veracidad y confiabilidad de los resultados en la ciencia, crearon el método científico. Dicho método consta de algunas "reglas" que deben partir de principios lógicos y evidentes llamados postulados. El método científico consta de varios métodos y no son privativos de ninguna rama de la ciencia; se usan según la naturaleza del problema en cuestión y los más útiles son: método inductivo, método deductivo, método de casos, método estadístico y método experimental.

Conviene insistir que en todos ellos se hace una labor de análisis de la situación y de síntesis de las evidencias; también se puede afirmar que el factor común a cada uno son las observaciones, de las cuales se inducirán las posibles hipótesis, que darán origen, mediante deducciones, a la predicción de situaciones nuevas.

Para concluir este capítulo señalaremos la importancia que tiene el análisis gráfico en el desarrollo de cualquier rama de la ciencia.

2.11. ANÁLISIS GRÁFICO

Uno de los objetivos, al estudiar la naturaleza, es tratar de encontrar relaciones entre conceptos (por ejemplo: masa, tiempo, volumen, distancia, etc.); dicha relación puede ser cualitativa o cuantitativa; la primera está ligada a adjetivos, como pueden ser: pesado, ligero, dulce, etc.; incluso se podrían establecer relaciones de desigualdad como: más ligero que, más duro que, más agrio que, etc. Pero en esas condiciones, al no tener una escala numérica que los determine con exactitud, sólo pueden ser posibles relaciones cualitativas que no ofrecen suficiente apoyo para continuar un estudio en forma.

En general, los conceptos y las relaciones cualitativas caracterizan los estudios iniciales de un problema o campos nuevos de la ciencia, cuando las ideas son poco claras; pero una vez que se logra establecer escalas numéricas bien definidas para esos conceptos, entonces ya pueden buscarse relaciones cuantitativas entre ellos, que es el objetivo del estudio. Sin embargo, aunque lo hemos tratado de explicar en unos renglones, el camino no es fácil y es aquí donde interviene el análisis gráfico, que puede aplicarse cuando se nota que al dar diferentes valores a uno de los conceptos (variable independiente), cambiarán los valores de otro (variable dependiente), y la relación cuantitativa entre ambos se tendrá al graficar sus valores; cuando la curva que une dichos valores es conocida (como una línea recta), la relación se podrá representar por una ecuación matemática (ecuación analítica de la recta). La curva que se obtiene al graficar representa una relación empírica, nombre que califica a una relación cuantitativa entre conceptos sin que haya sido posible deducirla de principios básicos.

Debido a que los puntos experimentales tienen incertidumbre, y por lo tanto representan un intervalo, por un conjunto de puntos se puede pasar más de una curva empírica, lo que refleja la incertidumbre en su determinación. La figura 2.6 muestra un conjunto de valores experimentales y

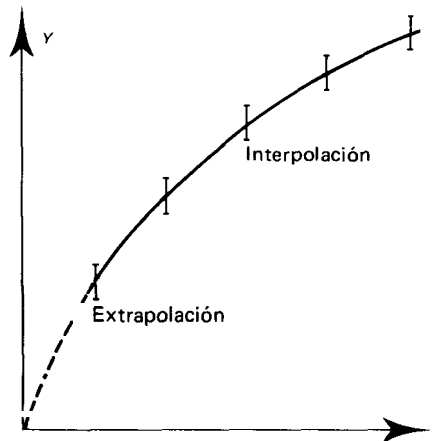


Fig. 2.6. Conjunto de valores experimentales y una posible curva empírica. La interpolación y la extrapolación constituyen predicciones sobre valores no medidos.

una curva que pasa por esos puntos. Si encontramos la ecuación que la representa podemos presentar en forma muy compacta la información de la gráfica. Además, la gráfica predice los resultados de experimentos en que midamos valores intermedios entre los medidos originalmente, proceso que llamamos interpolación. Extrapolación se llama cuando usamos la curva para predecir valores fuera del intervalo medido originalmente. La gráfica constituye un resultado inducido en el que pasamos de unos cuantos valores a predecir todos los valores contenidos en la curva.

Los mejores ejemplos de relaciones entre conceptos, representadas por ecuaciones matemáticas, se encuentran en la física, ciencia que ha logrado un desarrollo notable, gracias a que ha podido respaldar sus relaciones con la exactitud de las matemáticas, motivo por el cual destacamos la im-

portancia que tiene para cualquier ciencia, el manejar sus datos experimentales con las técnicas gráficas y estadísticas adecuadas.

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. Dé una definición de método científico.
2. Mencione tres de los postulados del método científico.
3. Mencione sus reglas, según Eigelberner.
4. Describa el método inductivo.
5. Cuando afirmamos que el Sol saldrá mañana, hacemos una inducción o una deducción.

3

Método científico experimental

- 3.1. Papel del experimento
- 3.2. Pasos del método experimental
 - 3.2.1. Definición del problema
 - 3.2.2. Hipótesis de trabajo
 - 3.2.3. Diseño del experimento
 - 3.2.4. Realización del experimento
 - 3.2.5. Análisis de resultados
 - 3.2.6. Obtención de conclusiones
 - 3.2.7. Elaboración del informe
- 3.3. Descubrimiento de los rayos X
- 3.4. Síntesis del amoníaco a partir de sus elementos
- 3.5. Los procesos de fermentación

El asombroso avance de las ciencias experimentales, también llamadas factuales, como la física, química y biología, se debe en gran medida a que los científicos que han contribuido a su desarrollo, se han preocupado porque sus métodos de trabajo cumplan con ciertas reglas apoyadas fuertemente en la lógica y en el sentido común; dichas reglas constituyen lo que se llama *método experimental* y han sido estudiadas y analizadas por los filósofos.

Además de ocuparnos en el presente capítulo de describir las reglas o pasos del método experimental, se analizarán tres trabajos científicos, en los cuales se señalará cómo se aplicó cada una de esas reglas. Sin embargo, no es propósito de este libro el desear que el estudiante trabaje como científico, y aplique en toda su magnitud el método experimental, sólo se quiere darlo a conocer para que empiece a familiarizarse con él, y pueda aplicarlo sin dificultad en su futura vida profesional. Al principio sus experimentos serán de repetición, pero aun en ellos es necesario reflexionar acerca de cómo aplicará el alumno las reglas del método experimental para aprenderlas, y a su vez le sirva de entrenamiento cuando necesite resolver problemas nuevos.

3.1. PAPEL DEL EXPERIMENTO

Uno de los objetivos de las ciencias naturales, o empíricas, es la creación de modelos que permitan predecir el comportamiento de algunos fenómenos de la naturaleza; dichos modelos son en principio aproximados, pero a medida que progresa el conocimiento de la naturaleza, se refinan y amplían para dar lugar a leyes y teorías, lo que significa un grado de confiabilidad mayor que en el simple modelo; en otras palabras, la probabilidad de falla o error es más frecuente en un modelo que en una ley o teoría, y es suficiente la existencia de un solo caso en que no se cumplan, para desecharlas.

Ahora bien, la forma en que el científico verifica la validez de sus modelos y pone en prueba sus teorías y leyes es a través del experimento; ello le obliga a planearlo en la forma más adecuada para obtener resultados confiables, cuya interpretación le permitirá o no, aceptar ese modelo. Esto pone de manifiesto la suma importancia que tiene el experimento en las ciencias naturales y la necesidad de aplicar bien el método experimental, porque de hecho un experimento es una pregunta que se hace a la naturaleza, el resultado es su respuesta y es responsabilidad del científico el plantear bien la pregunta e interpretar correctamente la respuesta."

3.2. PASOS DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

Las reglas o pasos del método experimental son los **siguientes**:¹⁶

1. Definición del problema.
2. Hipótesis de trabajo.
3. Diseño del experimento.
4. Realización del experimento.
5. Análisis de resultados.
6. Obtención de conclusiones.
7. Elaboración del **informe**.

A primera vista es posible pensar que son demasiados pasos y quizá no sea necesario aplicarlos todos, pero no es así; una vez que se han estudiado y aplicado a problemas específicos, nos daremos cuenta de que olvidar o eliminar alguno puede conducir a tropiezos mayores o trabajo estéril. Cuando un experimento se programa con todas las reglas del método experimental, podremos decir que se han previsto todas las necesidades que requiere el experimento; sin embargo, toca al investigador la decisión final sobre cómo aplicarlas, en especial si se presentan problemas que no necesiten tratarse con tanto rigor. A continuación analizaremos cada uno de dichos pasos.

3.2.1. Definición del problema

El primer paso que se debe dar para planear un experimento es definir con precisión su objetivo; es decir, formular con claridad el problema o a qué preguntas se quiere responder; lo que usualmente requiere traducirse del lenguaje llano al lenguaje científico. Para lograr esto, hacemos uso de la información obtenida a partir de:

- a) La observación del fenómeno (o de quien nos plantea el problema).
- b) La consulta bibliográfica.

La observación del fenómeno. Pone de manifiesto la pregunta que se va a responder; por ejemplo:

Sucede que una planta colocada detrás de un vitral amarillo, se afea y casi no crece a pesar de tener agua, aire y abono suficiente y nos preguntamos: ¿Por qué se afecta el desarrollo de la planta colocada detrás del vitral?

La pregunta o problema también nos la puede plantear otra persona, a la que le pediremos información adicional, como: ¿Para qué quiere la respuesta? Es muy difícil contestar adecuadamente, si no sabemos qué uso se dará a la respuesta. Por ejemplo, a la pregunta: ¿Cuánto mide su cocina?, responderemos de distinta manera (con diferente precisión), de-

pendiendo de quién nos pregunte: una visita, un pintor o el fabricante de cocinas integrales.

Una vez establecida la pregunta (que puede dar origen a una investigación nueva), es necesario saber lo que se ha hecho en casos parecidos mediante:

La consulta bibliográfica. Siempre que se inicie una investigación debe consultarse la bibliografía porque permite conocer el estado actual del problema; es decir, qué es lo que se ha hecho, cómo se ha hecho y sobre todo, proporcionará la información necesaria para determinar si el trabajo que planeamos es una corroboración o una extensión de otro trabajo científico; también si llena un hueco o si abre un nuevo campo de investigación. En suma, permite evaluar la importancia del problema por resolver y las soluciones intentadas.

Pudiera argumentarse que el trabajo de corroboración, por ejemplo, el de un estudiante, no necesita de consulta bibliográfica, pero no es así, porque en tales casos se usa la bibliografía acumulada en la memoria del maestro o la del mismo alumno que ya ha estudiado el tema y sabe lo que tiene que hacer.

La consulta bibliográfica, cuando se trata de un problema conocido, empieza por la consulta a las grandes enciclopedias o libros especializados, para continuar si el caso lo requiere en las revistas científicas. Cuando se llega a este punto, es porque se trata de un problema que no es del dominio público y entonces la consulta no es fácil, porque existe gran número de publicaciones científicas que aparecen periódicamente y hacen casi imposible mantenerse al día por el enorme tiempo que llevaría su lectura. Tal imposibilidad ha motivado la edición de publicaciones especializadas que dan a conocer los resúmenes de los artículos o, al menos, los títulos clasificados por temas, que permiten localizar con rapidez la información buscada.

Las publicaciones más conocidas son:

Physics Abstract. Donde se publica un breve resumen de los artículos que aparecen en cerca de seiscientas cincuenta revistas especializadas en física y los datos para localizarlas.

Chemical Abstract. Publica los resúmenes clasificados de artículos especializados en química y las referencias necesarias para localizarlos.

Biological Abstract. Hace lo mismo que las dos publicaciones anteriores pero con artículos especializados en biología.

Los bancos de datos almacenados en computadora como el servicio SECOTI, proporcionado por el CONACYT.

Una vez planteada la pregunta y hecha la consulta bibliográfica, se procede a formular una hipótesis que creamos tenga posibilidades de explicar la observación, o decidimos cuáles de las "leyes naturales" son aplicables o, al menos, esperamos que haya una relación entre dos variables características del problema.

La hipótesis puede tener bases sólidas en los conocimientos que se tengan del fenómeno por estudiar o puede ser nueva si el problema es desconocido, pero sobre todo servirá de guía para encontrar la respuesta buscada.

Por ejemplo, en el problema de la planta, mencionado anteriormente, la hipótesis puede ser:

La planta fue afectada en su crecimiento por estar expuesta a la luz amarilla.

Esta hipótesis es casi una reflexión acerca del fenómeno observado y al dar una posible causa (eliminación de componentes luminosos) nos guía o conduce a buscar la respuesta por ese camino.

Así, tenemos que la definición del problema consta de: la observación de un fenómeno expresado en lenguaje llano, una consulta bibliográfica y una hipótesis generalmente expresada en lenguaje científico, y se obtiene como consecuencia tanto de la observación como de la bibliografía, como se muestra en el esquema de la figura 3.1.



Fig. 3.1. Definición del problema.

3.2.2. Hipótesis de trabajo

Una hipótesis en sí, es una predicción donde se explica cómo o por qué sucede un fenómeno y se busca su comprobación (o negación) por medio de un experimento.

El enunciado de una hipótesis debe involucrar las variables del fenómeno, ya sean cualitativas (si no es posible medirlas) o cuantitativas (cuando se pueden medir), e indicar en cierta forma cómo se espera que estén relacionadas.

Formular una hipótesis no es tarea fácil, el trabajo en la ciencia es creativo; cuando se inicia una investigación nueva, el científico supone, presiente o quizá tiene idea de por qué sucede tal o cual fenómeno, lo que dará origen a la hipótesis. Es una tarea inductiva ya que pasa de lo particular a lo general.

Una vez formulada la hipótesis es necesario analizarla para encontrar sus consecuencias, lo que es una tarea netamente deductiva. Además, el análisis de la hipótesis señalará cuáles son las variables dependientes, las independientes y los parámetros constantes. También se determina:

- a) La región en que interesan los resultados.
- b) Las aproximaciones por introducir.
- c) La precisión requerida en los resultados.

Todos estos factores están interrelacionados y toca al investigador tomar las decisiones pertinentes después de evaluarlos en conjunto.

La región en que interesan los resultados. Es el intervalo de valores numéricos de las variables, en los que se espera la aparición del fenómeno y que se cumpla la hipótesis. Ello significa que se debe tomar en consideración si las variables se miden utilizando el sistema MKS (metro, kilogramo, segundo) o el sistema CGS (centímetro, gramo, segundo); es posible que se trate de un fenómeno microscópico o relativista donde es necesario calcular las medidas en forma indirecta, porque no es posible medirlas directamente. Por ejemplo: es posible medir con una cinta métrica a qué altura llegará una pelota cuando la dejamos caer, pero no se puede usar la misma cinta para medir la longitud de onda de la luz roja. Son problemas de naturaleza muy diferente: para el primero, la región en que interesan los resultados son centímetros y para el segundo, son angstroms, que sólo pueden medirse indirectamente debido a que 1 angstrom ($\text{\AA}$) es igual a 10^{-8} centímetros ($1 \text{ \AA} = 0.00000001 \text{ cm}$) y no existe ningún instrumento con esa graduación.

Pero el estudiante de bachillerato no tendrá por ahora esos problemas, porque trabaja en general con fenómenos macroscópicos; es decir, que los puede medir directamente; sin embargo, es deseable que conozca la existencia de este tipo de problemas como parte de su formación académica."

Las aproximaciones por introducir. Es posible que al analizar la hipótesis o el modelo por probar y deducir sus consecuencias, se tenga la necesidad de hacer algunas aproximaciones; ello quiere decir que para facilitar los cálculos se deba sustituir el seno de un ángulo muy pequeño por su valor en radianes, o tal vez se requiera despreciar términos; por ejemplo: si en una suma existe algún sumando cuyo valor sea "mucho menor" que uno o "muy pequeño" con respecto a los otros, se le puede eliminar o despreciar. En todos los casos, los términos "muy pequeños", "mucho mayor" o "mucho menor" se aplican para facilitar los cálculos y proporcionan, en consecuencia, ya no valores exactos, sino valores aproximados, que obedecen las siguientes reglas.

*A mayores aproximaciones, se tendrá menor exactitud en los resultados.
A mayor exactitud, se requieren menos aproximaciones.*

Los mejores ejemplos de aproximaciones se encuentran en la física, donde se desprecian términos en los que interviene la fricción o para obtener las leyes del péndulo simple, donde la región de validez es para ángulos muy pequeños (1° a 5°), para poder sustituir $\sin(\text{ángulo}) = \text{valor del ángulo en radianes}$; se hacen además otras aproximaciones, como despreciar la fricción y la masa del hilo donde cuelga la plomada.

* Los instrumentos más usuales son muy variados; dependen de la rama de la ciencia que se estudie; los más conocidos incluyen reglas, balanzas, probetas, gradadas, cronómetros, voltímetros, etcétera.

En general cualquier aproximación que se haga dependerá estrechamente de la precisión requerida en los resultados.

La precisión requerida en los resultados. La precisión está determinada por el uso que se le vaya a dar a los resultados; las diferentes actividades humanas requieren de diferentes grados de precisión; por ejemplo: la longitud de una carretera entre dos ciudades puede medirse con una precisión menor que la requerida por un sastre para confeccionar una prenda de vestir. Un panadero pesa sus ingredientes con mucha menor precisión que un farmacobiólogo. Un ejemplo menos rudimentario se presenta cuando una compañía empacadora quiere almacenar cierta cantidad de sal de cocina en determinados envases; para ello es necesario saber si se trata de sal de mesa (molida) o sal en grano. En cualquiera de los dos casos se toma una muestra y se mide su densidad, que es igual a masa sobre volumen; eso nos dirá qué volumen ocupan, por ejemplo, 100 g de sal y debe medirse con una precisión semejante con la que se fabricará el envase; así, podrán indicarle a la empresa que los haga, basándose en sus necesidades. Pero pudiera suceder que el problema fuera más complicado y se tratara de determinar la distancia interatómica de la sal común (cocina); entonces se debe trabajar con un solo grano e involucrar otras medidas como el peso molecular, el número de Avogadro y la densidad, que habrá de medirse con una precisión mayor o por lo menos igual a la de las dos primeras, las cuales pueden encontrarse en tablas especializadas.

Si la precisión es importante en actividades y profesiones ordinarias, lo es mucho más cuando se trabaja en problemas de investigación pura, donde a veces es necesario determinar magnitudes muy pequeñas, como calcular porcentajes de contaminación en sustancias de alta pureza, tomar medidas de alto vacío o incluso comparar dos teorías por medio de una predicción; en tal situación la precisión juega un papel decisivo, ya que debe permitir discriminar alguna para dejar la más adecuada.

En el caso de la hipótesis anterior, acerca de que la luz amarilla afecta el crecimiento de la planta, el análisis indica como una consecuencia que si se coloca detrás de un vitral transparente, dicha planta debe crecer normalmente. O sea, que implica una relación entre el color de la luz, que ilumina una planta, y su rapidez de crecimiento. Podríamos considerar como variable independiente el color de la luz y como dependiente la rapidez de crecimiento.

Una vez establecidas las variables independientes y dependientes, se elige la mejor forma de medirlas y el equipo con el que será posible realizar esa tarea. En otras palabras, se determinará: qué medir, cómo medir y los instrumentos apropiados. En nuestro ejemplo, se puede cambiar la iluminación a la planta para verificar que crece normalmente si se ilumina con luz blanca.

Es muy importante tener las veces que sea posible un experimento de control; es decir, el que se realiza en condiciones normales sin que intervenga el cambio en la variable que se va a estudiar; en este caso sería otra planta parecida expuesta a la luz solar. Ello se hace con el fin de

comparar el efecto medido, cancelando los efectos de los cambios en las demás variables presentes, consideradas no relevantes.

El trabajo experimental puede ser tan amplio como se desee, pero en general puede clasificarse en los siguientes tipos:

- a) El que verifica una hipótesis, un modelo o una ley establecida.
- b) El que es complemento o extensión de otro trabajo experimental, donde es posible usar la hipótesis original o hacerle alguna pequeña modificación.
- c) El que investiga un problema nuevo, donde será necesario formular una hipótesis de trabajo o al menos obtener alguna relación empírica.

Ahora bien, cuando decimos que:

Se verifica una hipótesis, es posible que una hipótesis se formule dentro de un marco teórico, y sea necesario el trabajo experimental para verificarla. Se incluye también aquí el trabajo de demostración de los laboratorios de enseñanza, donde el estudiante comprueba, mediante un experimento, la validez de una hipótesis, ley o modelo. En tales casos, no es necesario formular la hipótesis o modelo; sólo verificarla.

El trabajo es complemento o extensión de otro, es frecuente encontrar problemas tan extensos que es necesario subdividirlos en otros más pequeños; es posible también que se introduzca alguna variante en el problema original, por ejemplo, cómo se afecta el fenómeno de la fotosíntesis cuando se efectúa con luces de diferentes colores. En tales situaciones es posible usar la hipótesis original, o tal vez hacer alguna modificación, pero siempre conscientes de que no se trata de problemas nuevos.

Investigación de un problema nuevo, una nueva investigación siempre requerirá de una hipótesis de trabajo o algún modelo; cuando no es posible contar con ninguno de los dos, la realización del experimento correspondiente (que puede ser la reproducción del fenómeno por estudiar), debe producir al menos una relación empírica a partir de la cual quizá puedan encontrarse elementos para formular una hipótesis o percibir un modelo. La relación empírica generalmente se obtiene a partir de la curva que se ajuste mejor al graficar los diferentes valores que tomen esas variables, **al** realizar el experimento; y no estará apoyada por ningún marco teórico.

En el campo de la física aplicada es frecuente encontrarse con la necesidad de hacer evaluaciones sobre los efectos que tienen ciertos procesos, sólo en estos casos, por rapidez y simplicidad, se hace un experimento que responda a la pregunta planteada, sin pretender encontrar un modelo teórico que pronostique el resultado del experimento.

Del análisis de la hipótesis y de para qué se quiere el resultado se determina qué hay que medir y con qué precisión, para que los datos obtenidos contesten la pregunta o resuelvan el problema planteado originalmente. De ser posible, se determina cuál es la forma detallada de respuesta que sea más adecuada; puede ser, por ejemplo: una gráfica, una tabulación, un conjunto de valores, etc.

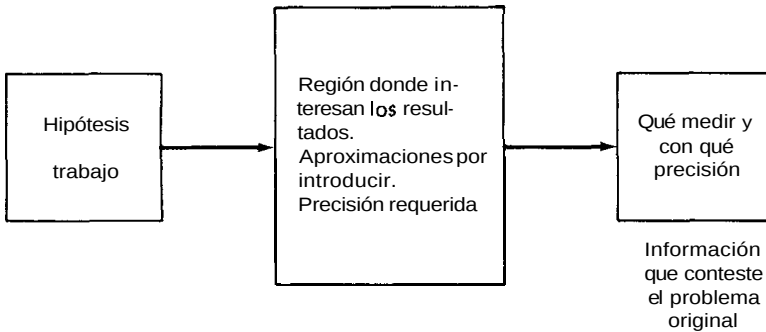


Fig. 3.2. Hipótesis de trabajo

En el esquema de la figura 3.2 pueden observarse las etapas que cubre el análisis de una hipótesis.

Una vez analizada la hipótesis de trabajo, se procede a diseñar el experimento.

3.2.3. Diseño del experimento

En esta etapa se escoge el procedimiento experimental que se va a usar y los instrumentos de medida capaces de medir y controlar las variables del fenómeno por estudiar. Para ello es necesario considerar:⁹

- a) El equipo de medida existente y su precisión.
- b) El tiempo y dinero disponible.

El procedimiento experimental es la secuencia de operaciones que va a realizar el investigador; cuando se usa alguna con mucha frecuencia y se convierte en un procedimiento reglamentado se le llama técnica de laboratorio; por ejemplo, obtener el suero de la sangre, identificar los compuestos de una mezcla, revelar una placa fotográfica, etc. Dichas técnicas no constituyen todo el procedimiento experimental, sólo forman parte de él y es el investigador quien decide qué medir y cómo hacerlo; para ello considerará los aspectos *a* y *b* ya mencionados antes.

El equipo de medida existente y su precisión. La precisión del equipo utilizado debe ser mayor que la precisión deseada en las medidas, para que exista la posibilidad de que los resultados experimentales sean utilizables. Esta es una condición necesaria, mas no suficiente, ya que al medir una sola vez no podemos calcular la incertidumbre asociada con la medida. Al repetir varias veces la medición determinamos el ancho del intervalo en que se obtienen los valores experimentales, lo que nos permite

estimar la incertidumbre. Sólo cuando las medidas sucesivas son iguales, su precisión será igual a la del instrumento de medida.

En el caso de medidas que no se repiten exactamente, las técnicas estadísticas mencionadas en el apéndice C nos permiten reducir el intervalo de incertidumbre, repitiendo gran número de veces la medición. Puesto que la reducción es muy lenta, suele preferirse detectar el origen de la no repetibilidad para controlarla y reducir la dispersión en los valores medidos. Dicha dispersión en las medidas suele tener origen en pequeñas fluctuaciones en variables consideradas constantes o en cambios de variables no controladas, por considerarlas irrelevantes. Así como no se aconseja dar mayor precisión en una medida, que la determinada por el equipo, tampoco es adecuado usar equipo muy preciso cuando sólo se quiere tener una idea del orden de magnitud de una medición. Por ejemplo, si se quieren medir las dimensiones de un terreno para conocer su superficie, será suficiente medir con una cinta métrica, pero si se desea medir el diámetro de un tornillo será necesario usar un calibrador. No es conveniente ni recomendable medir el diámetro del tornillo con la cinta métrica, y menos intentar usar el calibrador para medir las dimensiones del terreno.

El tiempo y dinero disponible. Todo trabajo de investigación lleva su tiempo, en especial si se trata de un problema complejo que deba hacerse en varias etapas y utilice procedimientos o técnicas laboriosas o quizá deba repetirse muchas veces para poder obtener resultados concluyentes. En toda investigación que se haga bajo contrato o en la que el estudiante debe entregar su trabajo en determinada fecha, se necesita tomar en cuenta los factores anteriores.

El dinero disponible es importante porque podrá decidir o no la compra de mejor equipo o incluso financiar el diseño y construcción de equipo especial.

Una vez que se conoce el equipo que se va a usar y el tiempo y dinero disponible, se determinará cuál es la técnica o técnicas experimentales que se emplearán para medir las variables; siempre es recomendable leer los instructivos de manejo (manuales) de los equipos, antes de usarlos y tomar las precauciones pertinentes cuando se use material o equipo peligroso para la salud.

Cuando se han determinado los requisitos anteriores, se dan los siguientes pasos que constituyen el diseño experimental:

- a) Determinar todos y cada uno de los componentes del equipo.
- b) Acoplarlos.
- c) Realizar un experimento de prueba.
- d) Interpretar tentativamente los resultados para determinar la precisión, modificando si es necesario, el procedimiento y/o el equipo utilizado.

Determinar todos y cada uno de los componentes del equipo. Como ya se mencionó con anterioridad, existe una estrecha relación entre la

precisión deseada en las medidas y el equipo o instrumentos de medición; pero en esta etapa conviene revisarlos para hacer un análisis de las posibles fuentes de error. Puede suceder que parte del equipo se encuentre dañado o no responda a las características deseadas y sea tiempo de cambiar algunas piezas o todo el equipo e incluso diseñar uno nuevo, en tales situaciones es conveniente consultar revistas especializadas como el *Review of Scientific Instrument* o sencillamente recurrir al ingenio propio.

Acoplar componentes. Al montar un dispositivo experimental se deben tomar en cuenta los medidores que se van a leer con mayor frecuencia y cuáles serán los controles más utilizados para colocarlos, de manera de facilitar al máximo el trabajo del experimentador.

Realizar un experimento de prueba. El experimento de prueba tiene doble propósito: uno es verificar el buen funcionamiento del equipo acoplado y otro es la afinación del procedimiento experimental.

Los datos y lecturas de este primer experimento deben tomarse varias veces con mucho cuidado, porque son importantes en el siguiente paso:

Interpretar tentativamente los resultados para determinar su precisión. Con los datos y lecturas obtenidas en el experimento de prueba se obtendrán los resultados buscados; ello permite comprobar si tienen la precisión deseada, si el procedimiento de lecturas es correcto y, sobre todo, pone de manifiesto las fuentes de error (no incertidumbres), que una vez localizadas se tendrá oportunidad de eliminar o al menos reducir, en especial si se trata de errores sistemáticos.

Al trazar las primeras gráficas y obtener los primeros valores, se puede saber la repetibilidad experimental de las variables, si no hay repetibilidad no se puede hablar de precisión en las medidas y entonces se debe modificar o cambiar el procedimiento experimental y/o el equipo utilizado, incluso puede llegarse a redefinir el problema.

En esta etapa del trabajo se debe preparar el material para recabar las lecturas; es decir, hacer columnas especificando en cada una la variable que se ha medido y sus unidades, ello tiene la finalidad de evitar números sueltos que pueden crear confusión cuando ya no se recuerde a qué corresponden.

El experimento de prueba y la interpretación tentativa de resultados son preparativos para el experimento final, que pueden parecer exagerados pero evitan al investigador tropiezos y trabajo estéril.

3.2.4. Realización del experimento

Una vez que se ha llevado a cabo el experimento de prueba y la interpretación tentativa de resultados, realizar el experimento final se reduce a llenar columnas con lecturas de las mediciones y detectar cualquier anomalía que se presente durante el desarrollo del experimento.

Es indispensable tomar nota de todo lo que sucede en el experimento; para no perder las hojas, lo más conveniente es usar un cuaderno en el que se anotará toda la información concerniente al experimento; ello nos

ayudará tanto a interpretar los resultados como a redactar el informe del trabajo.

Lo más probable es que un experimento bien planeado produzca datos valiosos, por lo que deberán ser analizados escrupulosamente para obtener los resultados buscados.

3.2.5. Análisis de resultados

El análisis o interpretación de resultados, ya sean valores, gráficas, tabulaciones, etc., debe contestar lo más claramente posible, la o las preguntas planteadas por el problema.

En términos muy generales, el análisis puede comprender los siguientes aspectos:

1. Si el experimento busca confirmar una hipótesis, ley o modelo, los resultados deben poner de manifiesto si hay o no confirmación. Es posible que la comprobación sólo sea parcial; en tal situación también se debe presentar en qué partes se comprueba y en cuáles no.

2. Si es un experimento que discrimine entre dos modelos, los resultados deben permitir esa discriminación en forma tajante, y proporcionar los motivos para aceptar uno y rechazar otro.

3. Si lo que se busca es una relación empírica, ésta debe presentarse al menos en forma gráfica; lo ideal sería encontrar una expresión analítica para la gráfica; es decir, encontrar la ecuación que la represente. Dicha ecuación se le llama empírica porque se obtuvo por medio de un experimento y como expresión analítica de una gráfica.

En una relación empírica presentada en forma gráfica, las escalas usadas deben permitir leer los resultados con facilidad, tener marcadas las unidades de las variables, dibujar con claridad los puntos experimentales, e indicar la precisión con la que fueron medidos. Se debe tener presente que en una gráfica, cada punto experimental tiene un margen de error, por lo que es deseable hacer un ajuste por medio de mínimos cuadrados (apéndice E). También se debe hacer notar que la gráfica más simple de analizar es la recta y si no se obtuvo al graficar los puntos, se puede intentar obtenerla, ya sea efectuando un cambio de variable o trazar la gráfica en papel semilogarítmico o log-log."

Un ejemplo de cómo ajustar una curva a un conjunto de datos experimentales, sería el siguiente:

En la figura 3.3 se encuentran dibujados seis puntos experimentales con su respectivo intervalo de incertidumbre (pasaremos por alto el indicar unidades por ser un caso imaginario); a través de ellos es posible pasar tres curvas, que podrían representar el comportamiento del fenómeno.

* Papel semilogarítmico es una hoja especial que tiene el eje de las abscisas en escala decimal y el eje de las ordenadas en escala logarítmica. Papel log-log es una hoja especial cuyas abscisas y ordenadas están marcadas en escala logarítmica.

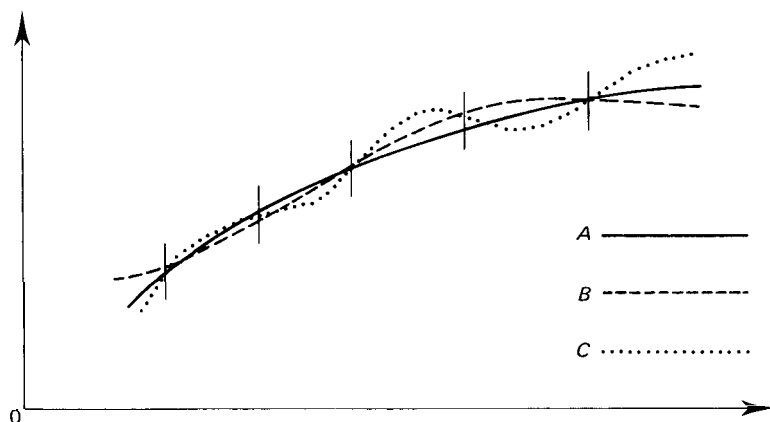


Fig. 3.3. Puntos experimentales y tres posibles curvas empíricas.

De esa familia de tres curvas, ¿cuál es la más adecuada?

La curva C predice la existencia de máximos y mínimos entre los puntos experimentales, de ser cierto deberían haberse detectado durante el experimento y por lo tanto haber aumentado la precisión y la densidad de los puntos experimentales para verlos claramente. Por lo tanto no es adecuado el experimento para verificar esa teoría.

De las curvas A y B, la más simple es la A porque tiene menos puntos de inflexión, de ahí que se preferirá la curva A. Si el modelo teórico predice la curva B, se puede concluir que hay acuerdo entre la teoría y el experimento, pero es necesario aumentar la precisión y densidad de los puntos experimentales ya que el modelo predice más detalles de los que puede observar el experimento.

En muchas ocasiones, lo que el modelo predice es una familia de curvas con uno o varios parámetros por ajustar. En estos casos se determina por el método de mínimos cuadrados, los valores de los parámetros con los que se obtiene el mejor ajuste. Una vez obtenidos los valores de los parámetros ajustables, es necesario comprobar si la curva obtenida representa de modo adecuado a los puntos experimentales.

Si se trata de un ajuste empírico primero se determina la posibilidad de que cierta familia de curvas se ajuste a los datos experimentales y después se determinan los parámetros que identifican a una curva de la familia. Es bastante difícil apreciar el tipo de curva que mejor se ajusta a unos datos experimentales. Por ejemplo, la curva A de la figura 3.3 podría representarse por la ecuación:

$$Y^2 = K(X-X_0) \quad \text{o} \quad Y^3 = K(X-X_0)$$

¿Cómo escoger la mejor? Esto se verá en el capítulo 4.

Conviene tener presente que en una gráfica los puntos experimentales corresponden a intervalos de confianza y sólo en ellos se puede tener segu-

ridad. Decir que la curva continua que los une, los representa a todos, equivale a una predicción acerca del comportamiento del fenómeno; porque le damos validez a los valores que tome la variable entre dos puntos experimentales. Otra observación al respecto es que si bien la expresión analítica o ecuación de una curva de datos experimentales puede dar algún indicio sobre el fenómeno en estudio, también es posible que dicha ecuación no tenga nada que ver con él, y sus predicciones sean erróneas debido a que por un conjunto de puntos experimentales puede ajustarse más de una curva; de ahí que una relación empírica deba manejarse con ciertas reservas.

3.2.6. ,Obtención de conclusiones

Con los resultados del experimento el investigador hace conclusiones; es decir, aplica su criterio científico para aceptar o rechazar una hipótesis o una ley; también es posible que haga conjeturas acerca de un modelo o proponga la creación de otro nuevo, lo que conduce a un problema diferente.

Las reglas que normalmente se usan para aceptar, rechazar o conjeturar una hipótesis son las siguientes:

Primera. Acepta como cierta (pero no como absolutamente cierta) una hipótesis, ley, teoría o modelo cuando sus predicciones son confirmadas por el experimento, porque basta que exista un solo fenómeno que no pueda explicar, para desecharla.

Por ejemplo: para tratar de explicar la naturaleza de la luz, Newton creó el modelo corpuscular de la luz, que explicaba los fenómenos luminosos hasta entonces conocidos, como eran: la reflexión, refracción y propagación rectilínea de los rayos luminosos. Después se observó el fenómeno de difracción que no fue posible explicarlo con el modelo corpuscular, por lo que se rechazó. Huyghens creó el modelo ondulatorio de la luz, que explicaba la reflexión, refracción, difracción y propagación rectilínea de los rayos luminosos, pero existía un problema, las ondas necesitan de un medio para propagarse, así que para explicar la luz que vemos de las estrellas era necesario crear un medio de propagación con propiedades muy especiales al cual se le llamó "éter", sólo así se podía explicar la luz que llega de los cuerpos celestes. Pero la ciencia siguió su evolución y se observó el efecto fotoeléctrico; además, se comprobó que la luz puede viajar en el vacío (sin ningún medio de propagación); no es posible explicar estos fenómenos con el modelo ondulatorio, entonces, ¿qué hacer?

La decisión que se tomó fue volver a reconsiderar el modelo corpuscular, pero no para aceptarlo nuevamente como tal, sino para dar origen a un nuevo modelo, el de onda-corpúsculo de la luz, creado por Planck; es el modelo vigente y establece que la luz se puede comportar unas veces como onda y otras, como partícula a las cuales se les llama fotones.

Segunda. Rechaza una hipótesis, ley o modelo cuando sus predicciones no son confirmadas por el experimento.

Tercera. El científico conjetura cuando las predicciones de la hipótesis, ley o modelo, concuerdan sólo parcialmente con el experimento; en tales casos es necesario especular acerca de las posibles razones de la diferencia entre teoría y experimento, para tratar de modificar la hipótesis, ley o modelo ya existente o hacer una nueva, lo que conduce al inicio de un nuevo problema.

En fin, toca a la parte de obtener conclusiones responder con claridad las preguntas planteadas en el experimento, manifestar si fue válida o no la hipótesis de trabajo o el modelo propuesto. Si hay preguntas que no se puedan responder, establecer el por qué (quizá falta de precisión del equipo, o alguna variable difícil de controlar, etc.), o si el caso lo amerita, hacer alguna conjetura acerca de la hipótesis o modelo que describa el fenómeno estudiado.

3.2.7. Elaboración del informe

Elaborar un informe escrito sobre un trabajo científico reviste una importancia capital, no sólo porque se comunica los resultados a la comunidad científica, sino porque deja a la posteridad un eslabón útil en la evolución de la ciencia.

De los factores que se deben tener en cuenta al escribir un informe científico, el más importante es la claridad; también es necesario tener presente en todo momento al lector, a quien va dirigido el trabajo para así determinar el nivel académico del lenguaje que se debe usar; es decir, en un reporte de divulgación se empleará lenguaje sencillo y se explicarán con más detalle todos los conceptos que no sean del dominio público, de manera que pueda ser entendido por la mayoría. En cambio, un trabajo especializado estará dirigido a un sector muy pequeño (la comunidad científica), que usa lenguaje especializado, por lo que resulta innecesario explicar todos los conceptos. Este lenguaje no lo entiende la mayoría de la gente.

El otro factor es la estructura del informe, que en general consta de seis partes, que son:¹⁴

- a) Título.
- b) Resumen.
- c) Definición del problema.
- d) Procedimiento experimental.
- e) Resultados.
- f) Conclusiones.

Título. La elección del *título* de un trabajo científico consiste en elegir aquel que describa lo más fiel y brevemente posible el contenido de éste; recuérdese que en caso de ser publicado por alguna revista, **será** a su vez clasificado por su título, en las publicaciones **especializadas**. Si el título es demasiado general, por ejemplo, *Efectos térmicos*, no proporciona

información alguna; y si es muy específico pero ocupa varios renglones, entonces ya no es un título.

Resumen. En éste se describen con brevedad los objetivos del trabajo y los resultados obtenidos. Sirve para que el lector decida si quiere leerlo completo y para ser **reducido** en las revistas especializadas de "abstracts" (resúmenes).

Definición del problema. Aquí se proporciona la información necesaria para situar el problema; es decir, se menciona el porqué se pensó que valía la pena resolverlo, cuáles son las ideas vigentes al respecto, los modelos aplicables y las consecuencias de su aplicación. También se debe decir cuál es el resultado que se busca y las técnicas o métodos experimentales que se utilizan en el experimento.

Procedimiento experimental. En la descripción del experimento se harán saber las partes que se consideren importantes del procedimiento experimental, con el fin de ayudar a otros investigadores a reproducirlo si lo consideran conveniente; se proporcionarán también los datos necesarios para evaluar la precisión en las medidas y la concordancia del experimento con las suposiciones del modelo o hipótesis de trabajo.

Resultados. Estos serán lo suficientemente exhaustivos para comparar la hipótesis o modelo con el experimento; si los números obtenidos son resultados de diversas operaciones matemáticas y/o consideraciones estadísticas, se deben mencionar, aunque no es conveniente reportar todos los datos originales del experimento, porque podrían ocupar mucho espacio. Si se trata de un informe escolar, es el maestro quien decidirá sobre este último punto.

Conclusiones. En las conclusiones se debe contestar la pregunta planteada inicialmente, o establecer por qué no se puede responder. También se añadirá cualquier comentario que se juzgue pertinente.

Mencionamos con anterioridad que un informe o reporte científico, utilizará lenguaje técnico, pero cuidando siempre de transmitir las ideas con precisión y claridad, para que el lector se concentre en el contenido del trabajo y no se distraiga desentrañando un lenguaje rebuscado.

El procedimiento es diferente cuando se quiere escribir un artículo científico, pues debe hacerse dentro de los lineamientos generales dados por el editor de la revista en la que se piensa publicar." Dichos lineamientos toman en cuenta la extensión del artículo, el tamaño de la hoja, las gráficas, que sean claras y legibles, etc. También es recomendable leer algunos artículos ya publicados para darse cuenta o "sentir" el estilo de la revista.

La mejor manera de aprender a comunicarse por escrito es escribiendo: por esa razón se pide a los alumnos que elaboren un informe por escrito de sus prácticas escolares, lo que será una excelente manera de ejercitar esas habilidades (fig. 3.4).

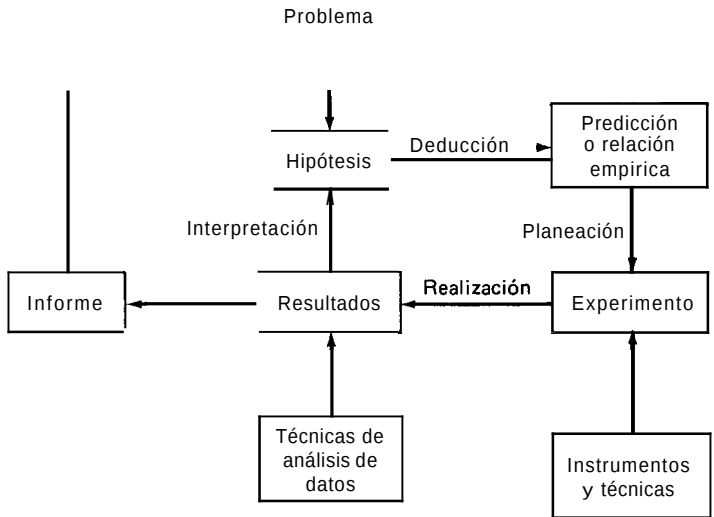


Fig. 3.4. Diagrama simplificado del método experimental aplicado a la resolución de problemas.

Aunque por motivos pedagógicos conviene describir los pasos del método experimental como una consecuencia, en realidad se habrá notado que hay relaciones entre ellos que obligan a modificar o tomar en cuenta pasos anteriores o posteriores. En otras palabras, el diseño del experimento considera todos los factores pertinentes en forma global, de modo que el hecho de diseñar un experimento se puede representar por el procedimiento de armar un rompecabezas, como se muestra en la figura 3.5.

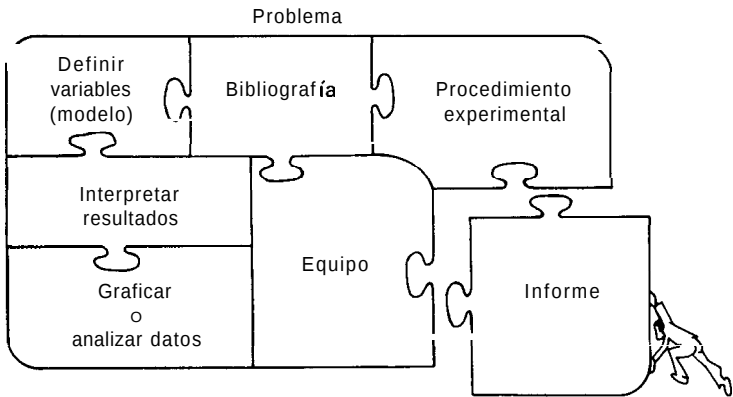


Fig. 3.5. Las diferentes etapas de un problema están relacionadas entre sí.

A continuación se analizarán tres ejemplos donde se aplicó el método científico experimental; ellos son: el descubrimiento de los rayos X, la síntesis del amoníaco a partir de sus elementos, los procesos de fermentación. Cada uno de ellos se expondrá con brevedad, indicando cada uno de los pasos del método experimental.

3.3. DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS X

1. Definición del problema

Antecedentes. A mediados del siglo XIX se descubrió que al aplicar una diferencia de potencial entre dos placas, colocadas dentro de una ampolla o tubo de vidrio "vacío" (supuestamente sin ninguna molécula dentro), se producía una descarga eléctrica.¹⁸ Debido a lo imperfecto de las bombas de vacío disponibles, quedaban muchos iones y electrones en el interior de la ampolla (llamado gas residual), los que conducían la descarga eléctrica. Si se agujeraba la placa positiva (**ánodo**), era atravesada por el haz proveniente de la placa negativa (cátodo) que, al incidir sobre el vidrio de la ampolla, le inducía una fluorescencia verde. Por muchos años se investigaron las propiedades del haz provenientes del cátodo, y cuando se descubrió que se propagaban en línea recta, se le llamó rayos **catódicos**. En la actualidad sabemos que dichos rayos son electrones acelerados por el campo eléctrico entre las placas (cátodo-ánodo); pero la evidencia para determinarlo se colectó poco a poco.

En 1892, Hertz descubrió que los rayos catódicos podían atravesar placas metálicas delgadas, lo que favorecía la interpretación ondulatoria de su propagación; tal descubrimiento dio lugar a que varios laboratorios trabajaran simultáneamente en relación con las propiedades de las descargas en gases.

En 1895, W. Rontgen trabajaba en uno de esos laboratorios y por "casualidad"¹⁹ observó que una sustancia, colocada en uno de los estantes, brillaba



Fig. 3.6. El descubrimiento de los rayos X por parte de Rontgen abrió nuevos campos en la medicina y en la industria, y le permitió a éste obtener el primer premio Nobel de física.

débilmente cuando se producía la descarga eléctrica dentro del tubo vacío. La sustancia era platino-cianuro de bario, que tiene la propiedad de transformar la energía de radiación invisible al ojo humano en luz visible, fenómeno llamado fluorescencia. Dicha propiedad se usa mucho en las discotecas modernas al iluminar con luz negra (ultravioleta) la pista de baile, para que las telas que contengan sustancias fluorescentes, brillen con aspecto fantasmal.

En aquella época ya era conocido el fenómeno de fluorescencia y se sabía que la luz del Sol y las lámparas de arco emitían luz ultravioleta; con estos conocimientos y la observación de que el platino-cianuro de bario era fluorescente al producirse la descarga eléctrica en el tubo, Rontgen se planteó la siguiente pregunta:

¿La fluorescencia del platino-cianuro de bario se debe a la emisión de la luz ultravioleta producida por la descarga eléctrica en el tubo, o es un efecto nuevo del fenómeno de fluorescencia?

2. Hipótesis de trabajo

Rontgen presentía, casi con seguridad, que era un efecto nuevo, porque si la fluorescencia observada en el platino-cianuro de bario se debiera a la luz ultravioleta emitida por la descarga eléctrica, se hubiera desprecupado del problema. Así, su hipótesis de trabajo era parecida a la siguiente:

*Es posible que al producirse la descarga eléctrica se genere un tipo de radiación, además de la ultravioleta, **que** hace fluorescente al platino-cianuro de bario.*

Sus variables en ese momento eran dos: la radiación, responsable de la fluorescencia de la sal de bario, y la luz ultravioleta, que debía eliminar. Más adelante, si su hipótesis era correcta, sería necesario controlar otras variables, lo que daría lugar a un experimento de extensión.

3. Diseño experimental

Si su hipótesis era correcta, Rontgen debía evitar que la radiación **ultravioleta** llegara a la sal de bario, cuando produjera la descarga eléctrica. El sabía que el cartón no es atravesado por ese tipo de radiación, por lo que decidió repetir el experimento cubriendo cuidadosamente el tubo con cartón, de manera que no saliera nada de luz al producirse la descarga.

Nótese que el experimento es cualitativo; a Rontgen sólo le interesaba saber si la radiación ultravioleta era la causa de la fluorescencia en la sal de bario; si no era así, entonces existía otro tipo de radiación más fuerte (ya que atravesaría el cartón), y su hipótesis se vería confirmada.

4. Realización del experimento

En las mismas condiciones de la observación inicial, Rontgen repitió el experimento varias veces para estar seguro de que los resultados observados

estaban relacionados únicamente con la presencia de lo que producía la descarga en el tubo.

5. Análisis de resultados

Por tratarse de una observación cualitativa, no se requirió de gráficas ni del uso de técnicas estadísticas especiales para analizar el resultado que llenó de satisfacción a Rontgen, y era:

La fluorescencia de la sal platino-cianuro de bario, se presentaba aunque no incidiera sobre ella la luz ultravioleta producida por la descarga eléctrica.

6. Obtención de conclusiones

La causa de la fluorescencia no era la radiación ultravioleta y era capaz de atravesar el cartón sin disminución apreciable del efecto en el fenómeno observado, lo cual confirmaba su hipótesis. A este nuevo tipo de radiación le llamó *rayos X*, y abrió paso a numerosos trabajos de extensión e investigación; eran muchas las preguntas que había de responder y se lanzó a esa tarea.

7. Elaboración del informe

Rontgen comunicó su primer informe a la Sociedad Físico-Médica de Wurzburg, donde incluía, además de su descubrimiento de los rayos X y su capacidad para atravesar el cartón, los resultados de la gran cantidad de preguntas que se le ocurrieron cuando se dio cuenta de que estaba observando un fenómeno nuevo.²⁰

Lo primero que investigó fue la transparencia de distintos materiales a los rayos X; es decir, si pueden ser atravesados o no por esa radiación, tales como papel, madera, hule, vidrio, metales, etc. Respecto de los metales, observó que el plomo, en capas de 1.5 mm de espesor, prácticamente detenían a los rayos X; es decir, eran opacos a ellos, lo cual no sucedía con el cobre, la plata, el oro y el platino. El uso del plomo le permitió colimar la radiación y observar que viajaba en línea recta.

Encontró también que los rayos X inducían fluorescencia en sustancias ya conocidas como fluorescentes, como las sales de uranio, vidrio, compuestos de calcio, etc. De particular importancia fue su observación de que afectaban placas fotográficas, lo que combinado con la diferente absorción de rayos X, en huesos y músculos, le permitió obtener la primera radiografía del mundo (la mano de su esposa), descubrimiento que ha proporcionado a la medicina una ayuda todavía no superada.

También observó que los rayos X no eran desviados por campos magnéticos, ni refractados por las sustancias que atravesaba, y que eran emitidos por la región en que incidían los rayos catódicos en el tubo vacío, bien fuera el vidrio de la ampolla, o una placa metálica usada como ánodo o

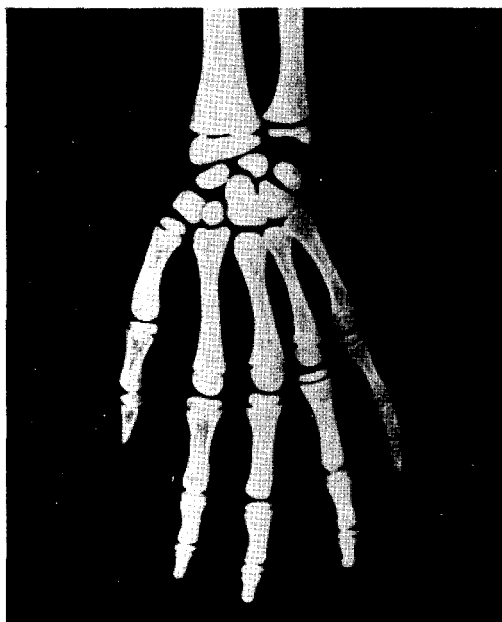


Fig. 3.7. Radiografía de mano humana, obtenida con rayos X.

anticátodo. Reconoció que los rayos X tenían propiedades parecidas a las de la luz ultravioleta, y adelantó la hipótesis (equivocada) de que correspondían a "ondas longitudinales" que se propagaban en el éter (medio en el cual podía propagarse la luz en el vacío), análogamente al modelo ondulatorio de la luz de ondas transversales, vigente en su época.

Cada una de las observaciones que hizo Rontgen sobre los rayos X, las respaldó con los experimentos correspondientes, basados a su vez en las hipótesis adecuadas. De ellos, sólo se analizó el descubrimiento de dicha radiación y cabe comentar que la publicación de sus trabajos le valieron el premio Nobel de Física en el año 1901.

A continuación se analizará otro ejemplo pero ahora tomado de los Premios Nobel de Química: *Síntesis del amoníaco a partir de sus elementos*.

3.4. SÍNTESIS DEL AMONIACO A PARTIR DE SUS ELEMENTOS

1. Definición del problema

El desarrollo de la agricultura intensiva requiere del empleo masivo de fertilizantes cuya producción se basa en compuestos nitrogenados, debido a que las plantas necesitan del nitrógeno para su desarrollo ya que no son capaces de fijarlo directamente del aire, que lo contiene en gran cantidad.

La principal fuente de nitrato de sodio se encontraba en Chile, pero su explotación intensiva no sólo ponía en peligro el abastecimiento de este compuesto nitrogenado, sino que, además, calculaban que se acabaría en pocos años. Si tal situación se presentara, sería funesta tanto para el desarrollo de la agricultura como para la producción de explosivos donde también se utilizaba."

El problema que se presentaba entonces consistía en sintetizar algún otro compuesto nitrogenado a partir de elementos abundantes en la naturaleza, de los cuales el más visible era el amoníaco.

Fue F. Haber, en 1904, quien comenzó a investigar sobre este problema, que consistía en:²²

Obtener amoníaco (NH₃) a partir de hidrógeno y nitrógeno gaseosos.

Encontrar la solución, además de la aplicación inmediata que ya era una necesidad urgente, tenía un interés básico en el estudio del equilibrio y la cinética de reacciones. Así que principió por la búsqueda bibliográfica.

La revisión bibliográfica le mostró que la reacción directa entre el nitrógeno y el hidrógeno, era inducida por varias formas de descarga eléctrica, con un consumo enorme de energía eléctrica. También se usaba combinar el nitrógeno con otros elementos, para que al hidrolizar el compuesto, se formara amoníaco.

Se sabía que, en la naturaleza, los rayos de las tormentas combinan el nitrógeno y el oxígeno (óxido nitroso NO_x), compuesto que es arrastrado a la tierra, por el agua de lluvia, proporcionando así los compuestos nitrogenados necesarios para las plantas. A la acción **fijadora** del nitrógeno por medio de las descargas eléctricas, se suma la acción de las bacterias del suelo, ya sean libres en la tierra o en los nódulos de las raíces de algunas plantas capaces de fijar el nitrógeno atmosférico.

Industrialmente se obtenía como subproducto de la producción de carbón (alrededor del 1% era nitrógeno fijo); pero la demanda, estimada en millones de toneladas por año, hacía impracticable procesar el carbón sólo para obtener su nitrógeno.

Los agricultores utilizaban la cianamida cálcica, obtenida haciendo reaccionar el nitrógeno con carburo de calcio, la cual a su vez se obtenía a partir de cal y carbón en un arco eléctrico. La cianamida cálcica libera amoníaco al combinarse con el agua de riego.

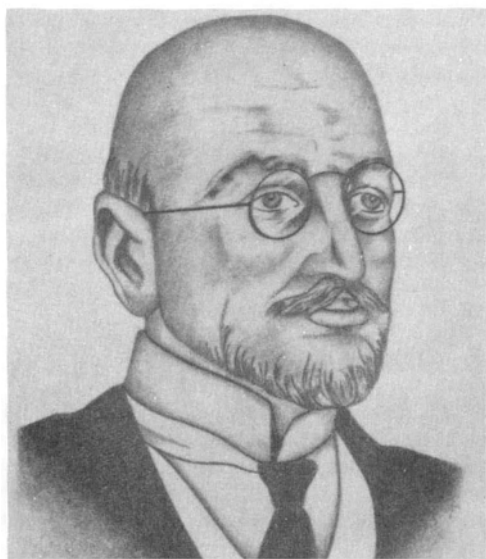
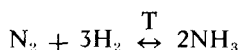


Fig. 3.8. La síntesis del amoníaco, lograda por Haber, permitió el uso intensivo de fertilizantes en la agricultura, lo que propició el aumento de la producción de alimentos.

Otra posibilidad explotada comercialmente era la formación de óxido nítrico a partir del nitrógeno y oxígeno del aire, combinados mediante descarga eléctrica. El óxido nítrico se obtenía de una reacción espontánea entre el nitrógeno y el hidrógeno, pero las pruebas hechas para provocarla aplicando presión, calor o acción catalítica de esponja de platino, no habían producido el efecto buscado.

Haber llegó a la conclusión de que la fuente de nitrógeno debía ser la atmósfera, ya que abunda en el aire, y que su uso como fertilizante requería que el compuesto formado fuera amoníaco o ácido nítrico; sin embargo, todos los procesos conocidos eran caros energéticamente, lo que encarecía el producto final. Haber pensaba que combinar nitrógeno e hidrógeno debía ser una reacción exotérmica; es decir, que genera calor, calor que a su vez podría utilizarse para mantener la temperatura adecuada de la reacción. El problema del costo de producción sería un problema típico de tecnología, el cual podría atacarse por dos caminos: bien optimizando los parámetros involucrados en la reacción, o buscar reacciones nuevas. Intentó ambos caminos, pero empezó por reinvestigar la combinación directa de nitrógeno e hidrógeno, de manera que su problema se reducía a investigar las condiciones de equilibrio de la reacción:



2. Hipótesis de trabajo

La hipótesis de trabajo consistía en:

La reacción química para producir amoníaco a partir de sus elementos es:

$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \xrightleftharpoons{\text{T}} 2\text{NH}_3$; es posible que pueda realizarse en condiciones adecuadas de temperatura, presión y el uso de algún catalizador para que sea económico el proceso de obtener amoníaco.

Esto significaba que debía medir las concentraciones de nitrógeno, hidrógeno y amoníaco, simultáneamente.

Haber escogería como variable independiente la temperatura; como variable dependiente, la presión, y al catalizador lo consideraba un parámetro porque no afectaba la cantidad de amoníaco producido; sólo aumenta la velocidad de producción.

3. Diseño del experimento

El diseño del experimento consistió en elegir las presiones y temperaturas de trabajo; los recipientes, medidores, catalizadores, métodos y procedimientos experimentales. La región en la que le interesaba medir la temperatura era cercana a los 1000°C porque en esa forma la reacción llegaría al equilibrio rápidamente, y usó hierro como catalizador.

4. Realización del experimento

Haber repitió varias veces el experimento a diferentes temperaturas, que era su variable independiente; la presión (variable dependiente) quedaba determinada por las cantidades de nitrógeno e hidrógeno presentes en la reacción. Midió la concentración de amoníaco producido y la rapidez de producción a diferentes temperaturas.

5. Análisis de resultados

Aunque no conocemos los resultados originales, ni la estadística empleada, sabemos que encontró los siguientes resultados:

1. A 1000° C la reacción química nitrógeno-hidrógeno procedía con la rapidez suficiente como para ser utilizada. Los resultados obtenidos oscilaban entre $\frac{1}{200} \%$ y $\frac{1}{80} \%$ de amoníaco.
2. La cantidad de amoníaco era proporcional a la presión del gas, y la mezcla de tres partes de hidrógeno con una de nitrógeno producía el máximo de amoníaco.
3. A temperaturas más bajas se incrementaba el contenido de amoníaco, pero se reducía mucho la rapidez de la reacción (obtención de equilibrio).

6. Obtención de conclusiones

La conclusión más importante fue que a la presión atmosférica y a una temperatura de 600° C en adelante, ningún catalizador producía indicios de amoníaco, aun con la mezcla más favorable. Todavía más, a esas temperaturas el punto de equilibrio (reacción) seguía siendo desfavorable, a pesar de usar grandes presiones. El rango de temperatura adecuado para obtener resultados prácticos, a presión atmosférica, oscilaba alrededor de los 300° C. Eso requiere encontrar un catalizador que a esa temperatura acelere lo suficiente la reacción. Recordemos que un catalizador no cambia las condiciones de equilibrio de una reacción; sólo puede cambiar la rapidez con que se produce.

Los resultados encontrados por Haber en 1905 lo condujeron a intentar otros métodos, ya que no creyó factible desarrollar un catalizador eficiente a 300° C.

7. Elaboración del informe escrito

Los datos aquí presentados fueron tomados del Discurso de aceptación del Premio Nobel de Química del año 1920 de Fritz Haber.²²

Haber continuó sus trabajos en el tema; investigó la manera de optimizar las condiciones de la descarga eléctrica, tales como presión de los gases, enfriamiento de los electrodos, frecuencia de la corriente eléctrica utilizada,

etcétera; obtuvo una mejoría cercana al 15%, pero no la consideró significativa. En 1908, con mejores conocimientos sobre las condiciones de equilibrio y detalles técnicos en las reacciones químicas a altas presiones y temperaturas, investigó la actividad 'catalizadora' de varios metales, hasta mostrar que una reacción a 200 atmósferas y 600°C, era factible de utilizarse comercialmente. Este resultado final fue el que en realidad le valió el premio Nobel.

Para finalizar, analizaremos un ejemplo de biología: **Los procesos de la fermentación**, que en el siglo pasado se ignoraban.

3.5. LOS PROCESOS DE LA FERMENTACIÓN

1. Definición del problema

Desde tiempos remotos el hombre ha usado ciertos procesos a los que llama fermentación, si el resultado es agradable, o putrefacción, si no lo es. Algunos de estos procesos, como el horneado de pan, la elaboración de la cerveza y el vino, la maduración del queso, etc., se había logrado reproducirlos sólo mediante procedimientos cuidadosos y siguiendo exactamente ciertas recetas; sin embargo, las industrias de estos productos tenían problemas, en particular las destilerías donde se perdían miles de francos diarios porque algunas de sus cubas de fermentación no producían alcohol. Era entonces necesaria la intervención de algún científico que se interesara en sus problemas y les ayudara a resolverlos; esa persona fue **Louis Pasteur**.²³

En 1854 Louis Pasteur es nombrado decano de la Facultad de Ciencias en Lila, Francia. Una vez establecido, los grandes industriales del lugar recurrieron a él y le dijeron que: "Eso de la ciencia pura estaba muy bien, pero ellos ne-

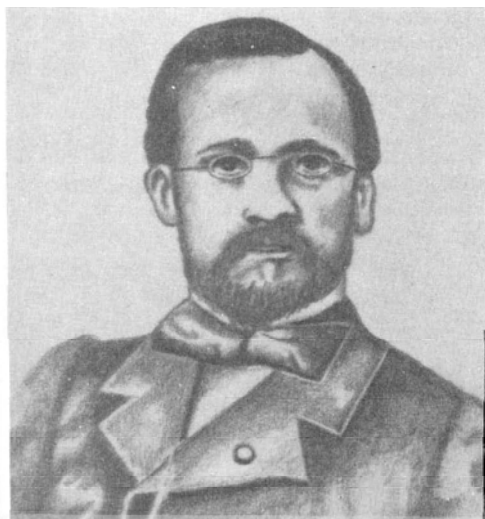


Fig. 3.9. Al descubrir que la fermentación se producía por organismos vivos, Pasteur dio un gran paso en la curación y prevención de enfermedades. Aunque es más conocido por su vacuna contra la rabia y el proceso de pasteurización de la leche.

cesitaban una íntima colaboración entre ciencia e industria." Le pidieron que les ayudara a elevar el rendimiento en azúcar de remolacha, o una mayor producción de alcohol.

Pasteur era químico de profesión, y sus trabajos anteriores estaban relacionados con el descubrimiento de la existencia de cristales de tartrato, en los que se detectaron propiedades polarizadoras; en otras palabras, una solución de tartrato atravesada por luz polarizada es capaz de hacer girar el plano de polarización de la luz. Eso quiere decir que Pasteur no tenía experiencia en problemas de fermentación, así que tenía que empezar desde el principio y decidió visitar la destilería para observar el proceso y tomar muestras de las cubas sanas y enfermas. La búsqueda bibliográfica le dio a conocer los trabajos de Leeuwenhoek, quien en 1860 observó con el microscopio los glóbulos de la levadura de cerveza; en 1835 Cagniard de la Tour reconoció su multiplicación por "brotes", infiriendo de ello que la levadura es un organismo: sin embargo, la teoría aceptada en esa época para los procesos de fermentación, era considerarla una reacción química estimulada por la presencia de la levadura.

Dado que las pruebas químicas no le permitieron a Pasteur resolver el problema, decidió usar el microscopio para observar las muestras obtenidas. Las muestras de las cubas sanas confirmaron las observaciones de Cagniard de la Tour, y en las enfermas no encontró rastro de levadura; sólo observó unas motitas grises que contenían una especie de bastoncitos mucho más pequeños que las levaduras. Ya había detectado la presencia de ácido láctico en lugar de alcohol en las cubas enfermas, esta información condujo a Pasteur a formular la hipótesis de trabajo.

2. Hipótesis de trabajo

Los bastoncitos son los fermentos del ácido láctico del mismo modo que la levadura es el fermento del alcohol.

Analizó su hipótesis de la siguiente manera:

Los bastoncitos deben ser seres vivientes, que compiten con la levadura por su alimento y logran vencerlas en las cubas enfermas. Si su hipótesis era correcta, los bastoncitos podrían cultivarse y la producción de ácido láctico dependería de la cantidad de bastoncitos presentes; luego, era necesario medir su concentración, así como la rapidez con la que desaparecía el azúcar (alimento) y se formaba ácido láctico (residuo).

3. Diseño del experimento

El diseño del experimento consistiría en encontrar un medio de cultivo simple, transparente y favorable para los bastoncillos, de manera que se multiplicaran y evitar así un medio de cultivo tan complejo como el jugo de remolacha contenido en las cubas, que dificultaba la interpretación del fenómeno. Los bastoncillos los detectaría con el microscopio y el ácido láctico, por métodos químicos.

4. Realización del experimento

El primer medio de cultivo que ensayó fue agua azucarada, pero los bastoncillos no se reprodujeron. Después de muchos fracasos, ideó un extraño medio de cultivo: hirvió levadura en agua pura y la filtró; le añadió azúcar como alimento y añadió bicarbonato de cal para neutralizar su carácter ácido. Con esta solución logró finalmente que los bastoncillos se reprodujesen. De las motitas grises macroscópicas se desprendían columnas de burbujitas. Una vez logrado lo que ahora llamamos un medio de cultivo adecuado, pasó a estudiar la relación entre el azúcar consumido, el ácido láctico producido y el número total de bastoncillos.

5. Análisis de resultados

Los resultados fueron explicados en términos de que la fermentación láctica observada era regular y constante, correlativa a la multiplicación de un organismo determinado, y de que su nutrición ocurre a expensas de una sustancia fermentable que tiene como residuo el ácido láctico.

6. Obtención de conclusiones

Se probó la hipótesis inicial: los bastoncitos observados son los fermentos del ácido láctico.

7. Elaboración del informe

Comunicó a los fabricantes que tenían que impedir la entrada de las motitas grises a sus cubas de fermentación para que no se produjera el ácido láctico; a sus amigos y alumnos les comunicó su descubrimiento de la obtención del ácido láctico a partir de azúcar, mediante bastoncillos cultivados, los cuales pueden observarse en el microscopio; leyó trabajos sobre el tema en la Sociedad Científica de Lila y envió un informe muy completo a la Academia de Ciencias de París.

Por primera vez se aplicaba en algo la observación de los diferentes objetos vivientes que se podían ver gracias al microscopio. Aunque había descripciones muy completas de diferentes microorganismos, no se les había correlacionado con sus efectos. El uso de medios de cultivo permitió obtener cepas puras de diferentes fermentos conocidos con la consiguiente mejora en la reproducibilidad de las fermentaciones. El estudio de las condiciones para lograr su reproducción le llevó a perfeccionar un procedimiento, para lograr el aniquilamiento de las bacterias indeseables en el vino, la cerveza o la leche; se le conoce con el nombre de pasteurización, y consiste en calentar el producto por periodos breves. Este procedimiento todavía se utiliza ampliamente en nuestros días.

Con esta experiencia, Pasteur pudo planear los experimentos para dar el golpe de muerte a las teorías defensoras de la generación espontánea, las

cuales proponían que la aparición de gusanos y bichos semejantes en la materia en descomposición era espontánea, y no se debía a la contaminación con quistes o huevecillos. De paso demostró la presencia de gérmenes en el aire, lo que dio pie a las prácticas de asepsia necesarias en cirugía para evitar las infecciones. La mortalidad en las operaciones descendió espectacularmente.

La idea de que un ente microscópico era capaz de originar cambios en una solución, llevó con el tiempo a pensar en la posibilidad de que aquél podría producir enfermedades, lo que fue investigado por Koch y Pasteur, por separado; usando el microscopio y medios de cultivo lograron aislar los gérmenes causantes de varias enfermedades, primer paso en la curación y prevención de éstas." Pasteur también encontró la manera de atenuar la virulencia de los gérmenes del carbunco y la rabia, con lo que proporcionó bases científicas para elaborar la vacuna para prevenir la viruela, introducida empíricamente por Jenner. Pocos hombres en su vida han cambiado tan profundamente la sociedad en que viven como Louis Pasteur; su observación de que pequeños microorganismos propician efectos macroscópicos dio origen a la medicina moderna, como hemos descrito brevemente. Pero no se debe olvidar que detrás de cada uno de los breves párrafos que se han descrito, hay cientos o miles de experimentos para lograr encontrar la verdad en la naturaleza.

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Cuáles son los pasos del método experimental?
2. Describa en qué consiste cada uno de ellos.
3. Describa cómo se descubrieron los rayos X.
4. Escriba la ecuación química que representa la síntesis del amoníaco.
5. Describa la diferencia entre fermento y catalizador.

4

Medidas y su interpretación

- 4.1. Conceptos cualitativos y cuantitativos
- 4.2. Medidas e incertidumbres
- 4.3. Estimación del error experimental
- 4.4. Clasificación de errores
- 4.5. Tratamiento estadístico de datos
 - 4.5.1. Probabilidad e incertidumbre
 - 4.5.2. Histograma
 - 4.5.3. Promedio, moda y mediana
 - 4.5.4. Determinación del "error experimental"
 - 4.5.5. Desviación normal del promedio
- 4.6. Combinación de incertidumbres
- 4.7. Análisis gráfico

Para comunicarnos con nuestros semejantes empleamos gran cantidad de palabras, más o menos definidas, las cuáles entendemos gracias a experiencias previas; por ejemplo, en "agua" y "bondad", el primer término no ofrece confusión, el segundo sí causa problemas de interpretación ya que puede significar diferentes cosas según la época y la sociedad que lo aplique. Para evitar esos problemas de interpretación de lenguaje, el científico trata de usar conceptos rigurosamente definidos mediante un conjunto de operaciones que produzcan el resultado deseado (por ejemplo, el concepto de masa); además, debe usar palabras que tengan siempre el mismo significado, independientemente de cualquier apreciación personal o modismo de la época.

4.1. CONCEPTOS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS

Los conceptos pueden clasificarse como *cualitativos* y *cuantitativos*; los primeros dependen de la apreciación personal porque todavía no existen escalas universales para medirlos; entre muchos ejemplos se pueden citar: olor, sabor, neurosis, belleza, etc. (aunque en los concursos de belleza se establezcan puntuaciones, no se puede negar que depende de la apreciación subjetiva de los jurados). En lo que se refiere a conceptos *cuantitativos*, son aquellos a los que se les puede asignar un valor por medio de una medición previa, como temperatura, humedad, fuerza, velocidad, etc.

Existen teorías que relacionan conceptos cualitativos, como la teoría de la evolución de las especies de Darwin; pero se prefieren aquellas que relacionan conceptos cuantitativos por medio de ecuaciones matemáticas. Se dice que cuando se logra cuantificar un concepto, se tiene un gran avance en su comprensión; pasar del concepto cualitativo de temperatura, a su medición, permitió el nacimiento de la termodinámica. Este capítulo se dedicará a estudiar la manera en que se asignan valores numéricos a nuestros conceptos cuantitativos.

4.2. MEDIDAS E INCERTIDUMBRES

La parte central de un experimento consiste en medir las constantes y variables involucradas, junto con una estimación de nuestra confianza en los valores medidos. Siempre que se mide algo, lo que en realidad se está haciendo es comparar la magnitud de nuestra variable, con cierta magnitud patrón. En el capítulo 1 vimos que el resultado de una medida depende de lo que se está midiendo, con qué se está midiendo y quién está midiendo;

y que la precisión requerida en la medida depende del uso que se le vaya a dar al resultado, de modo que es necesario considerar todo el proceso en conjunto. Se mencionó también que el resultado de toda medida es un intervalo dentro del cual esperamos se encuentre el valor "real" del objeto medido; dicho intervalo se expresa como un valor central m y una incertidumbre o error Δm , como semiancho del intervalo.

Debido a que una medida puede ser afectada por muchas causas, desde cambios de temperatura hasta errores numéricos, al escribir los datos, es necesario repetirla varias veces; se pueden distinguir dos tipos de resultados: los que repiten y los que no. Si al medir varias veces se obtiene siempre el mismo valor, el intervalo de incertidumbre dependerá del valor de la mínima división de la escala o de la exactitud garantizada por el fabricante. Si cada vez que se mide se obtiene un valor diferente, conforme aumenta el número de medidas se delimita un intervalo que las contiene a todas, dicho intervalo se llama *máximo error posible*. Puede lograrse que una medida repetitiva se convierta en una no repetitiva, aumentando la sensibilidad del equipo de medida, o sea que la repetibilidad es indicio de que estamos limitados por el instrumento, del cual no se podrá obtener mayor precisión.

Es responsabilidad del experimentador el hacer una estimación realista del ancho del intervalo de error o incertidumbre; ya que si lo da más grande de lo que es, no le está haciendo justicia a su experimento, y si lo da más pequeño, quienes den por bueno su trabajo pueden desviar en dirección equivocada los trabajos posteriores que en él se basen.

Concretando, ninguna cantidad física puede medirse exactamente, lo cual hace indispensable determinar un intervalo dentro del cual, confiamos, se encuentra la magnitud medida. A dicho intervalo se le llama *error experimental*.

4.3. ESTIMACIÓN DEL ERROR EXPERIMENTAL

Este "error" (no es una equivocación) es la incertidumbre en la magnitud medida, introducida en el proceso de comparación. Como toda medida tiene un error, cualquier otra cantidad derivada de ella, también lo tendrá. Este error se puede expresar en forma absoluta en las mismas unidades, o en forma relativa como porcentaje de la magnitud medida. Por ejemplo, el largo l de una hoja de papel se puede dar como:

$$l = 216.0 \pm 0.5 \text{ mm} = l \pm \Delta l$$

en forma absoluta, o

$$l = 216.0 \text{ mm} \pm 0.2\% = l \pm \frac{\Delta l}{l} 100\%$$

en forma relativa.

En algunos casos se utiliza la convención de cifras significativas, según la cual se conservan sólo las cifras que se consideran seguras. Por ejemplo, decir que una longitud es de 157 cm implica que está comprendida entre 156.5 cm y 157.5 cm, o sea, equivale a 157 ± 0.5 cm. De acuerdo con esta convención, 157.0 es diferente de 157 en cuanto a la incertidumbre implícita.

Para poder estimar el intervalo de incertidumbre, es indispensable repetir varias veces la medida en condiciones supuestamente iguales. Si las condiciones experimentales son tales que todas las lecturas son iguales; es decir, las lecturas son reproducibles, se estima el intervalo de incertidumbre sumándole a la precisión del instrumento un medio de la última cifra significativa determinada. Generalmente la precisión del instrumento está relacionada con el valor de la mínima división de la escala, la cual suele dar el valor de la última cifra significativa. Al determinar así el intervalo, se tiene la seguridad de que el valor "real" está contenido en él, y se le llama error estimado, límite de confianza, error absoluto límite, o máximo error absoluto. Los límites de confianza se pueden interpretar como que el experimentador confía en que casi el 100% de sus medidas están dentro de ese intervalo; es decir, está casi seguro de su medida?

Si al repetir varias veces una medida, se obtienen lecturas diferentes, se acostumbra dar como valor representativo el valor promedio, y como error estimado la mitad de la diferencia entre la lectura máxima y la mínima; siempre y cuando los valores estén igualmente dispersos en ambos lados del promedio. En principio, habría que sumar al error estimado la incertidumbre introducida por el instrumento, pero como suele ser mucho menor, se desprecia al sumar.

4.4. CLASIFICACIÓN DE ERRORES

Los errores pueden dividirse en dos clases: sistemáticos y aleatorios. Un error *sistemático* es una desviación constante (o casi) de todas las medidas. Un error *aleatorio* varía de medida a medida, con igual probabilidad de ser positivo o negativo. Los errores aleatorios son causa de que las lecturas se dispersen alrededor del valor verdadero; si además hay errores sistemáticos, las medidas se dispersan alrededor de cierto valor desplazado. Se notará que los errores ya sean aleatorios o sistemáticos se definen respecto de los efectos aleatorios o sistemáticos que producen; es decir, a una fuente de error no se le puede calificar de inherentemente sistemática o aleatoria.

Por ejemplo, se suele mencionar que al medir una longitud con una regla mal calibrada se obtiene una medida con un error sistemático; sin embargo, dicho error se puede convertir en aleatorio si se mide dicha longitud con diferentes reglas. Como segundo ejemplo, tomaremos un microscopio viajero que tiene juego; el error introducido puede ser sistemático si se mide en un solo sentido; aleatorio si cada vez se escoge el sentido, o cancelarse el efecto del juego si se mide por diferencia y siempre en el

mismo sentido. Concluyendo, un procedimiento experimental bien pensado puede reducir la magnitud o efecto de los errores.

También se suele establecer una distinción entre las palabras exacto y preciso. Se dice que un resultado es exacto si está relativamente libre de error sistemático, y preciso si el intervalo de incertidumbre o sea el error aleatorio es pequeño. La repetibilidad de una medida nos proporciona información sobre la magnitud del error aleatorio, el cual se determina usando los métodos estadísticos que veremos a continuación. Sin embargo, con estos métodos no se puede detectar ningún error sistemático. Estos errores se determinan verificando la calibración de los instrumentos de medición y tomando en cuenta los efectos que el medio ambiente ejerce sobre ellos. Si se estima que el error sistemático es mucho menor que el aleatorio (10 veces), entonces no se introduce ninguna corrección sistemática; de no ser así, se corrige hasta reducir el error sistemático residual a valores compatibles con el error aleatorio. En algunos casos el error aleatorio es pequeño, comparado con la exactitud del instrumento; es decir, las medidas se repiten de acuerdo con las lecturas obtenidas, en estos casos se estima la incertidumbre a partir de la exactitud del instrumento. Si se quiere aumentar la exactitud será necesario cambiar de instrumento.

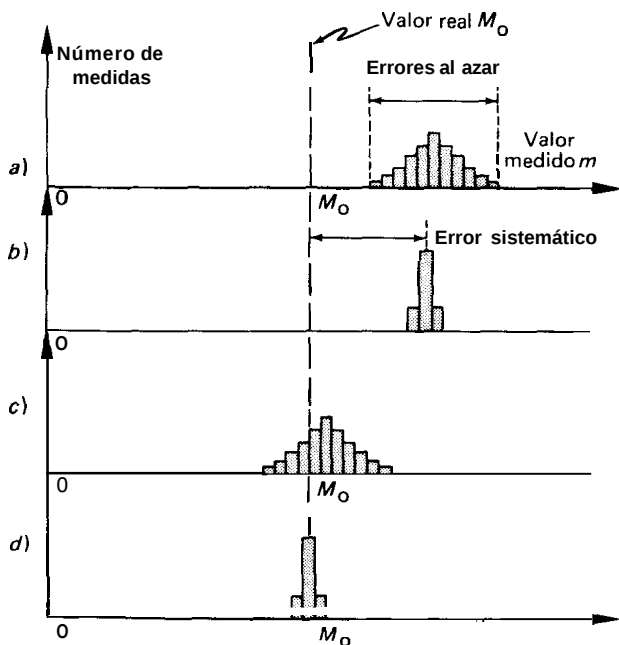


Fig. 4.1. Posibles resultados al medir una magnitud m , cuyo valor real M_0 se conoce por otros medios.

- a) Medidas con poca precisión y poca exactitud.
- b) Medidas con mucha precisión y poca exactitud.
- c) Medidas con poca precisión y mucha exactitud.
- d) Medidas con mucha precisión y mucha exactitud.

4.5. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

En ciencias como biología, medicina, agronomía, etc., los experimentos se ven afectados por muchas variables que son difíciles de controlar, por

lo que los resultados suelen ser muy dispersos debido a las pequeñas fluctuaciones introducidas por las variables poco controlables. Esto obliga a realizar miles de experimentos para poder obtener conclusiones válidas." En 1954, en el mayor experimento sobre salud pública, se hizo un estudio a **1800 000** niños para determinar si la vacuna Salk era efectiva para prevenir la poliomielitis.¹³ Si se hubieran estudiado menos casos, los resultados no hubieran sido estadísticamente significativos; es cierto **que** tales casos son extremos, pero sólo un experimento preliminar puede dar la información necesaria para determinar el número de pruebas que se requerirán para obtener resultados válidos.

Aunque el concepto de máximo error absoluto nos ha permitido comparar los valores medidos con las predicciones de los modelos teóricos, es demasiado burdo para los trabajos de investigación profesionales; es preferible aplicar métodos estadísticos que permiten una mejor determinación del valor representativo y de su intervalo de error o incertidumbre. Dado que los métodos estadísticos están basados en las ideas de probabilidad, comenzaremos con un experimento de probabilidad. Todos sabemos o aceptamos que la probabilidad de obtener águila o sol (cara o cruz) al lanzar una moneda al aire, son iguales, pero este conocimiento no nos permite predecir cual será el resultado del siguiente lanzamiento; sólo nos sirve para predecir el resultado promedio de muchos lanzamientos de la moneda.

4.5.1. Probabilidad e incertidumbre

Consideremos un experimento ficticio en el que intervienen **25** causas de incertidumbre, las que pueden afectar, aumentando o disminuyendo, el valor medido con igual probabilidad y con los mismos efectos. Estas causas de incertidumbre podrían ser las pequeñas fluctuaciones que se presentan cuando se controla una variable, o fluctuaciones en las composiciones de las muestras, etc. Este experimento lo podemos simular lanzando **25** monedas, con la convención de que el águila representa una contribución positiva del error y el sol, una negativa; dado que tienen igual probabilidad, se podría esperar una cancelación casi completa de los efectos, ¿pero cuál será la magnitud de las fluctuaciones? La respuesta a esta pregunta la podemos buscar en un libro o en un experimento; éste último requiere de **25** monedas y un cubilete para agitarlas; se hacen **50** lanzamientos y se cuentan, en cada caso, el número de águilas y soles para verificar que no hay equivocación al contar. Supóngase que se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla **4.1**, pero es recomendable repetir el experimento para interpretar los propios resultados.

* Mendel realizó cerca de 22 000 experimentos para establecer las leyes de la herencia y ¡todavía le dijeron que necesitaba realizar más!

TABLA 4.1

<i>Lanzamiento</i>	<i>Águilas</i>	<i>Soles</i>	<i>Lanzamiento</i>	<i>Águilas</i>	<i>Soles</i>
1	11	14	26	11	14
2	14	11	27	10	15
3	11	14	28	14	11
4	12	13	29	14	11
5	11	14	30	17	8
6	15	10	31	15	10
7	14	11	32	11	14
8	10	15	33	12	13
9	8	17	34	15	10
10	12	13	35	9	16
11	15	10	36	8	17
12	13	12	37	11	14
13	15	10	38	12	13
14	12	13	39	13	12
15	14	11	40	11	14
16	14	11	41	8	17
17	14	11	42	7	18
18	16	9	43	13	12
19	16	9	44	15	10
20	15	10	45	14	11
21	16	9	46	17	8
22	10	15	47	14	11
23	12	13	48	15	10
24	11	14	49	9	16
25	12	13	50	13	12

La tabla muestra que no hay fluctuaciones máximas de 25 o 0 águilas, pero el 12 o 13 esperado no es el único que aparece, habiendo fluctuaciones hasta 7 o 17 águilas. Vemos que interpretar una tabla no es fácil, por lo que graficaremos las águilas contra el número de lanzamientos (fig. 4.2). (Los soles no dan más información ya que son el complemento a 25.)

4.5.2. Histograma

En la gráfica de la figura 4.2 puede verse que existen pequeñas rachas de águilas o soles, pero su duración es variable, por lo que seguimos sin poder predecir el resultado del siguiente lanzamiento. Se observa también que fluctuaciones grandes aparecen pocas veces, comparadas con las pequeñas; de hecho se acostumbra representarlas en lo que se llama un **histograma**, donde se grafica el número de veces que aparece una medida en cierto intervalo. En nuestro ejemplo, el número de águilas varía entre 7 y 17, por lo que podemos construir un histograma que nos relacione la frecuencia con que apareció cada número entre 7 y 17, con el número de águilas obtenido.

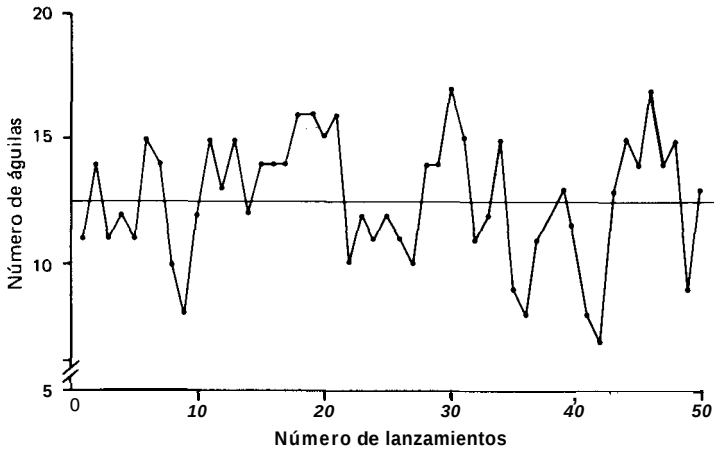


Fig. 4.2. Número de águilas obtenidas al lanzar 25 monedas, contra el número de lanzamiento. Podemos ver la existencia de fluctuaciones al azar alrededor del 12 o 13 esperado.

Núm. de veces	1	3	2	3	8	7	4	9	8	3	2
Núm. de águilas	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Si se grafican los datos obtenidos, resulta un histograma, el cual se muestra en la figura 4.3; podemos reconocer que se parece a la dispersión que hemos obtenido cuando obtenemos resultados experimentales, los que

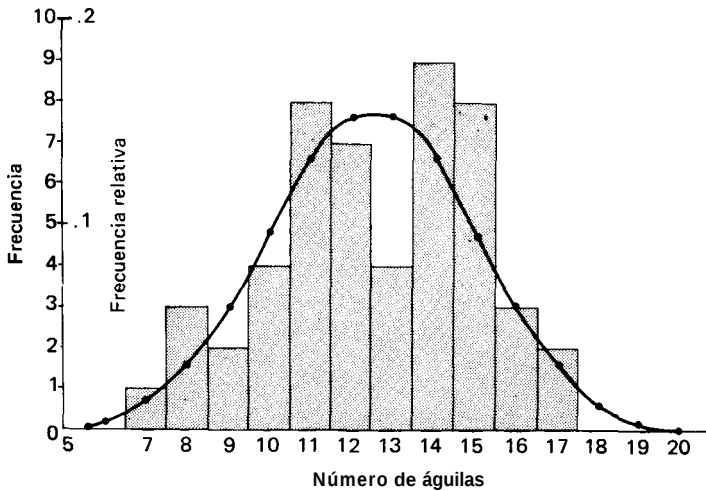


Fig. 4.3. Histograma del lanzamiento de monedas. La curva continua es lo que predice la teoría si se hubiera lanzado un número infinito de veces.

están agrupados alrededor de un valor central y donde fluctuaciones grandes son sumamente raras.

Para poder comparar con otros experimentos en los que se utilice un número diferente de medidas, conviene dibujar la frecuencia relativa, o sea la frecuencia entre el número total de medidas. Esto equivale a cambiar la escala vertical dividiéndola entre las 50 medidas efectuadas para el histograma de la figura 4.3; por eso, esta figura tiene dos escalas en el eje vertical, donde muestra la frecuencia y la frecuencia relativa.

Por otra parte, dado que se conocen las probabilidades para cada moneda, se puede calcular la frecuencia relativa que esperamos obtener si se repite un número infinito de veces el lanzamiento. (Véase apéndice B.) Los valores se muestran unidos por una curva continua, para distinguirlos de las barras experimentales. Si midiéramos 50 veces más, se esperaría que crecieran más las barras centrales y que los puntos extremos del histograma parecieran estar sobre la curva continua semejante a una copa invertida; para lograrlo, serían necesarias miles de medidas.

Por medio de un histograma se puede representar gráficamente un conjunto de valores; la amplitud de cada intervalo se escoge de acuerdo con el número de datos y el intervalo ocupado por ellos. Usualmente se escogen de 6 a 15 intervalos de igual ancho que cubran el intervalo de dispersión de la variable. En nuestro caso escogimos once intervalos (del 7 al 17), cada uno de ancho unitario, lo que quizá es excesivo para el total de medidas (50) y por ello se producen variaciones bruscas de intervalo a intervalo. Si se agrupan en 6 intervalos de ancho 2, obtendremos el histograma mostrado en la figura 4.4, en el que se han unido dos intervalos en uno.

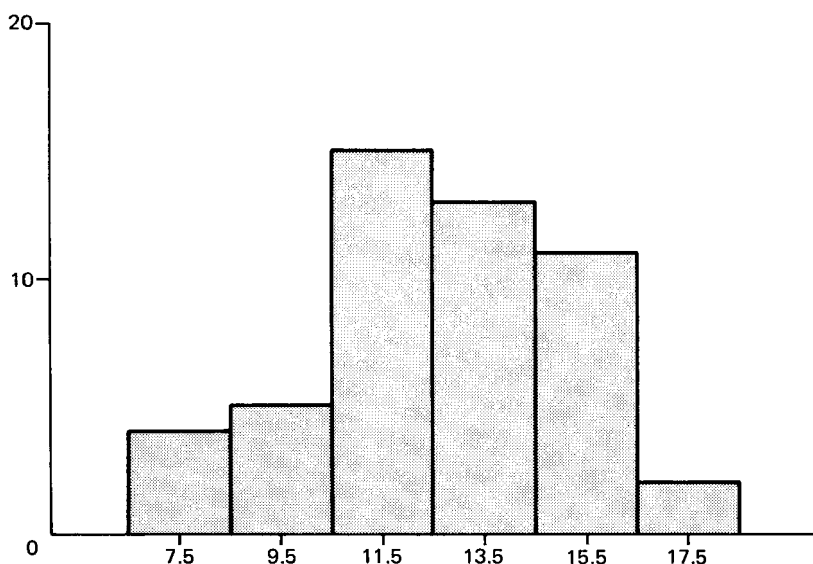


Fig. 4.4. Histograma obtenido reduciendo a la mitad el número de intervalos.

Aunque este segundo histograma se ve diferente, puede reconocerse un valor central y cierta dispersión en los resultados; los extremos presentan menos variaciones bruscas, las que se amortiguan al aumentar el número de medidas efectuadas.

4.5.3. Promedio, moda y mediana

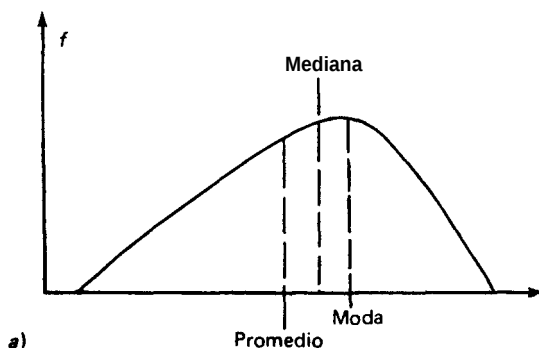
El ejemplo de las monedas indica con claridad la necesidad de hacer muchos experimentos para lograr que un histograma se parezca a una curva de probabilidades. Sin embargo, en muchos casos, lo que se busca es un valor central que caracterice la medida, y un intervalo de incertidumbre que dé la dispersión experimental en las medidas.

Como valor central se puede escoger el promedio, la moda o la mediana, según las ideas que tengamos acerca de las causas de error o incertidumbre. El promedio o valor medio ($\langle x \rangle$) se define como la suma de todas las medidas entre el número de medidas.

$$\langle x \rangle = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4.1)$$

La moda es la medida que aparece con mayor frecuencia; y la mediana es el valor que queda en el centro de una tabla construida con los valores en orden creciente. La mediana tiene tantas medidas por arriba como por debajo; visto en un histograma, partiría el área en dos (fig. 4.5).

Si tenemos motivos para pensar que las causas de error son predominantemente negativas, la curva de frecuencia relativa puede ser asimétrica como en la figura 4.5a; en tal caso los tres valores centrales difieren y el que se escoja depende de para qué se vaya a usar el dato. Pero si las causas de error son simétricas, esto se refleja en una curva simétrica y los tres valores coinciden. Cuando una medida se ve afectada por muchas causas de error, pero todas son chicas, se espera que los resultados experimentales se encuentran sobre la llamada curva normal de error o de



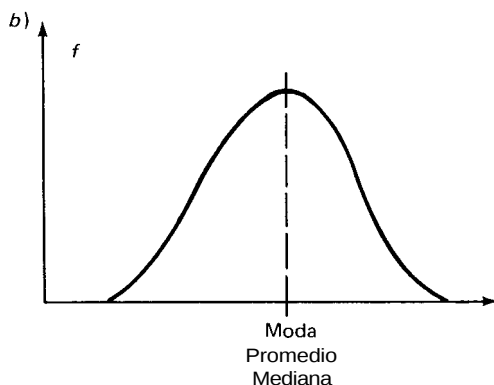


Fig. 4.5. Relación entre promedio, mediana y moda de un conjunto de medidas, cuando la curva que las representa es: **a)** asimétrica, **b)** simétrica.

Gauss, la cual es simétrica. En lo sucesivo estimaremos que este es el caso y consideraremos el promedio como el valor central representativo de la medida efectuada.

En nuestro caso, el número promedio de águilas es igual a 12.6; es decir, $\langle a \rangle = 12.6$; la moda es 14; la mediana, 13, aunque sólo consideraremos significativo el promedio, ya que se espera una distribución simétrica. La dispersión puede expresarse por el máximo error posible, que es igual a $(17-7) \div 2 = 5$.

Así, $\langle a \rangle = 12.6 \pm 5$, expresión poco satisfactoria para la magnitud medida, por lo pesimista de la estimación de la incertidumbre.

4.5.4. Determinación del error experimental

Podría calcularse el error para cada medida como la resta del valor medido x_i menos el valor real X , o sea:

$$e_i = x_i - X$$

donde e_i es el error de la medida i ésima. La dificultad de esta definición radica en que normalmente no se conoce el valor real X , que estamos buscando. Sólo en los casos en que se mida un objeto patrón, puede saberse con certeza el valor de X . En realidad, lo que conocemos es la mejor estimación de X como el valor promedio ($\langle x \rangle$) de las medidas. Puede definirse el residuo d_i de la i ésima medida como:

$$d_i = x_i - \langle x \rangle \quad (4.2)$$

el que será más parecido al error de la medida según que el promedio se aproxime al valor verdadero X . El residuo promedio será la suma de los residuos entre el número de medidas. Calculemoslo:

$$\begin{aligned}
 \langle d_i \rangle &= (d_1 + d_2 + \dots + d_n) / n = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \\
 &= \frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)}{n} = \frac{\sum x_i - \sum \langle x \rangle}{n} = \frac{x_1 - \langle x \rangle + x_2 - \langle x \rangle + \dots}{n} \\
 &= \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n - n\langle x \rangle}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} - \langle x \rangle \\
 &= \langle x \rangle - \langle x \rangle = 0
 \end{aligned}$$

Este resultado permite definir que el valor promedio sea tal que el residuo promedio sea cero; es decir, los residuos positivos y negativos se compensan en la suma. Para evitar esta dificultad se define la desviación media o desviación promedio ($\langle d \rangle$) como la suma de los valores absolutos de los residuos entre el número de medidas n , esto es:

$$\langle d \rangle = (|d_1| + |d_2| + |d_3| + \dots + |d_n|) / n = \sum |d_i| / n$$

con lo que se evita la cancelación entre positivos y negativos. Aplicando esta definición a nuestra medida del número de águilas, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \langle d \rangle &= (|7 - 12.6| + 3 \times |8 - 12.6| + 2 \times |9 - 12.6| + 3 \times |10 - 12.6| \\
 &\quad + 8 \times |11 - 12.6| + 7 \times |12 - 12.6| + 4 \times |13 - 12.6| \\
 &\quad + 9 \times |14 - 12.6| + 8 \times |15 - 12.6| + 3 \times |16 - 12.6| + 2 \times |17 - 12.6|) / 50 \\
 &= (5.6 + 3 \times 4.6 + 2 \times 3.6 + 3 \times 2.6 + 8 \times 1.6 + 7 \times 0.6 + 4 \times 0.4 + 9 \times 1.4 + 8 \times 2.4 + 3 \times 3.4 + 2 \times 4.4) / 50 \\
 &= \frac{103.80}{50} = 2.08
 \end{aligned}$$

Puede expresarse entonces el resultado como:

número de águilas = 12.6 ± 2.1 , en donde la incertidumbre es la desviación media.

Otra manera de expresar la dispersión es por medio de la desviación típica o normal σ , la que se define como el límite de la raíz cuadrada de la suma de los residuos al cuadrado entre el número de medidas:

$$\sigma = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n}}$$

la cual mide la dispersión (o incertidumbre) de las lecturas alrededor del

promedio. El símbolo $\lim_{n \rightarrow \infty}$ significa que σ se obtiene como el resultado de experimentos con n cada vez más grande, de modo que puede considerarse n infinito. Dado que cualquier experimento es finito, se usa como estimación de la desviación normal (s), la siguiente:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

De manera que el resultado de un experimento se expresa como el valor promedio $\langle x \rangle \pm$ la estimación de la desviación normal; es decir:

$$\text{magnitud-resultado del experimento} = \langle x \rangle \pm s$$

donde:

$$s = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2}{n - 1}} \quad (4.4)$$

la que se obtiene al sustituir la ecuación (4.2) en la (4.3). Esta definición es la más usada para expresar la incertidumbre en una medida, porque aunque ofrezca más dificultades para calcularla, permite predecir que si se repite la medida, el 68% de los valores quedan dentro del intervalo de ancho $2s$ centrado en el promedio. Cuando las medidas tienen la distribución normal de error o de Gauss. (Véase apéndice C.)

Al aplicar la definición de s a la medida del número de águilas, se obtiene:

$$s = \sqrt{\frac{(5.6)^2 + 3 \times (4.6)^2 + 2 \times (3.6)^2 + 3 \times (2.6)^2 + 8 \times (1.6)^2 + 7 \times (0.6)^2 + 4 \times (0.4)^2 + 9 \times (1.4)^2 + 8 \times (2.4)^2 + 3 \times (3.4)^2 + 2 \times (4.4)^2}{50 - 1}} \\ = 2.5$$

Puede agregarse entonces el resultado como: número de águilas = 12.6 ± 2.5 , en donde la incertidumbre es la desviación normal.

Los resultados del apéndice B dicen que el valor esperado sería $= 12.5 \pm 2.5$, en donde se reporta el valor promedio y la desviación normal de un experimento ideal, al cual se espera tiendan nuestros resultados conforme se repita el experimento. Puede observarse que aunque el experi-

mento se repita pocas veces, los resultados son muy cercanos a los teóricos, a pesar de que hubiera medidas individuales bastante alejadas de 12 o 13 águilas esperadas. Esta es la razón por la que se debe repetir varias veces un experimento afectado por muchas causas de error independientes, que hacen que se obtenga mucha dispersión en los resultados individuales.

Si la distribución de valores alrededor del promedio es la normal (o de Gauss) se puede dar un sentido probabilístico a la desviación normal. Esta distribución normal se obtiene cuando las causas que producen las desviaciones son muchas, con magnitudes muy pequeñas y con igual probabilidad de ser positivas o negativas. El sentido probabilístico consiste en que si se repite *una sola medida*, existe el 68% de probabilidad de que caiga en el intervalo $X \pm s$, y el 95% de probabilidad de que caiga en el intervalo $X \pm 2s$.

4.5.5. Desviación normal del promedio

Si se agrupan las medidas y se calculan los promedios de los diferentes grupos, se encuentra que la dispersión de los promedios es menor que la dispersión de todas las lecturas originales, y que esta dispersión disminuye conforme aumenta el tamaño de los grupos. Se puede calcular la desviación normal del promedio s_m , en relación con la desviación normal de las lecturas s , por:

$$s_m = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}$$

En los artículos científicos generalmente se reporta el valor promedio y su desviación normal, así que:

$$\text{Magnitud} = \langle x \rangle \pm s_m$$

Para efectos de comparación se requiere conocer el número n de medidas. Esta forma de reportar un resultado experimental se justifica pensando en que cualquier intento de comparación requiere de varias medidas y, en consecuencia, dicha comparación sólo puede hacerse mediante los valores promedios. Para determinar la dispersión de la muestra completa se requiere multiplicar por $\sqrt{n}$ para poder comparar la precisión de los experimentos.

En nuestro ejemplo de las águilas, la desviación normal del promedio es:

$$s_m = 2.5/\sqrt{50} = 0.35 \pm 0.4$$

de modo que el resultado final sería $= 12.6 \pm 0.4$, en donde la incertidumbre es la desviación normal del promedio. Dado que este intervalo contiene el valor "teórico" de 12.5, podemos decir que hay acuerdo entre la teoría y el experimento. Si el valor teórico está a más de tres o cuatro desviaciones normales del valor experimental, decimos que hay desacuerdo

entre teoría y experimento. Para valores intermedios tenemos que refinar el experimento para reducir la desviación normal. Esta manera de definir acuerdo entre teoría y experimento, se basa en la probabilidad de que el 68% de las medidas queden dentro de una desviación normal; 95% dentro del intervalo definido con $\pm 2s$; 99.7% con $\pm 3s$ y 99.99% con $\pm 4s$. Siendo muy poco probable que una medida se desvíe más de 4 desviaciones normales.

4.6. COMBINACIÓN DE INCERTIDUMBRES

Muchas veces no es posible medir directamente la variable buscada, sino que se debe obtener indirectamente como combinación de otras variables. En estos casos es necesario evaluar la incertidumbre en la variable buscada, a partir de la incertidumbre de las variables medidas directamente. A este proceso de evaluación se le conoce como *propagación de errores*. Por ejemplo: consideremos el caso en que la variable z es función de la variable (a): $z = f(a)$, donde podemos medir a y determinar su máximo error posible Δa o su desviación normal s_a ; decimos que se mide indirectamente a z cuando al sustituir en la función los valores de a , se calculan los de z . Para cada valor de a , es posible calcular un valor de z ; y al conjunto de valores de z se le puede aplicar la definición de valores promedio e incertidumbres (fig. 4.6).

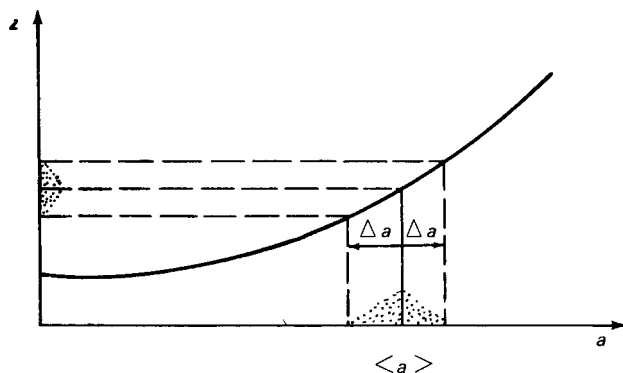


Fig. 4.6. La incertidumbre de la variable a determina la de la variable z , cuyo valor depende de a .

Aunque el procedimiento anterior es rigurosamente correcto, implica calcular el valor de z , tantas veces como se midió a . Se considera preferible calcular el valor promedio de $\langle z \rangle$ con el valor promedio de $\langle a \rangle$, y su incertidumbre con Δa o s_a . Este procedimiento es válido si en el intervalo $(\langle a \rangle - \Delta a)$, $(\langle a \rangle + \Delta a)$, se puede aproximar z por una línea recta

ya que evaluar z equivale a cambiar una escala linealmente, lo que no modifica la distribución de puntos. Esta condición casi siempre se cumple ya que en general $\Delta a \ll \langle a \rangle$, y en un intervalo pequeño se puede despreciar la curvatura de la función. En la figura 4.7, $\langle z \rangle = f(\langle a \rangle)$ y $\Delta z = m \Delta a$, en donde m es la pendiente de la recta; así, $m = \tan \theta = \frac{dz}{da}$ $\langle a \rangle$ lo que equivale a la derivada de la función evaluada en el punto $\langle a \rangle$.

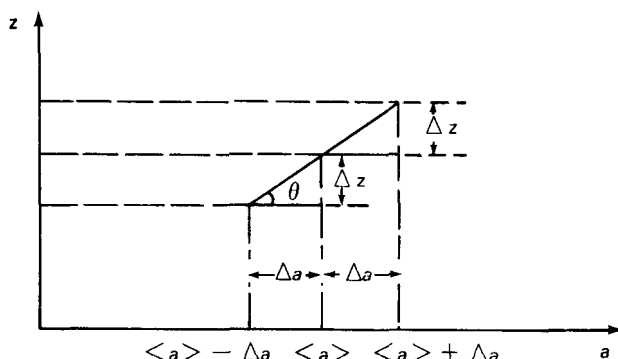


Fig. 4.7. Si la función z tiene poca curvatura en el intervalo de interés, se puede aproximar por una línea recta de pendiente $m = \tan \theta$.

Es posible considerar también que Z es función de varias variables a, b, c , o sea: $Z = f(a, b, c)$ y para cada una de ellas es válido lo anterior.

Veamos algunos ejemplos. Las variables a y b se miden, y se obtienen los valores experimentales $a \pm \Delta a$ y $b \pm \Delta b$, en donde Δa y Δb son errores máximos absolutos. Se quiere calcular el valor $z = a + b$; obteniéndose:

$$z \pm \Delta z = (a + b) \pm (\Delta a + \Delta b)$$

Es necesario sumar las incertidumbres para tener la seguridad de que el valor de z quede dentro del intervalo, aunque es poco probable que los dos errores sean siempre en el mismo sentido.

Análogamente, si $z = a - b$, entonces:

$$z \pm \Delta z = (a - b) \pm (\Delta a + \Delta b)$$

Sumamos las incertidumbres puesto que no sabemos el signo exacto del error en una medida dada. Por otra parte, si restáramos las incertidumbres, se obtendría el resultado absurdo de que la incertidumbre evaluada es menor que la medida, originalmente; es decir,

$$\Delta z = 0, \text{ en el caso } \Delta a = \Delta b$$

resultado absurdo, ya que no puede ser que de dos valores inciertos, obtenamos uno preciso.

Si z es el producto de a y b , entonces $z = ab$. Sustituyendo las incertidumbres respectivas en el producto, se tiene:

$$z + \Delta z = (a \pm \Delta a) (b \pm \Delta b) = ab \pm b\Delta a \pm a\Delta b \pm \Delta a\Delta b$$

Pero $z = ab$, por lo que al despejar Δz , queda:

$$\Delta z = (b\Delta a + a\Delta b + \Delta a\Delta b)$$

Si esta expresión se divide entre z , se tiene:

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta a}{a} \frac{\Delta b}{b}$$

Si las incertidumbres relativas son mucho menores que 1 ($\Delta a \ll a$, $\Delta b \ll b$), entonces se puede despreciar el último sumando y obtener finalmente:

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$$

Por lo tanto, en el caso de productos conviene trabajar con incertidumbres relativas, las cuales se suman para encontrar la incertidumbre en el producto.

Si z es el cociente de a y b ; es decir, $z = \frac{a}{b}$, al sustituir las incertidumbres respectivas, queda:

$$z + \Delta z = \frac{a \pm \Delta a}{b \pm \Delta b} = (a \pm \Delta a) (b \pm \Delta b)^{-1} = (a \pm \Delta a) (1 \pm \frac{\Delta b}{b})^{-1} b^{-1}$$

usando el teorema del binomio: $(1 \pm \frac{\Delta b}{b})^{-1} = 1 \pm \frac{\Delta b}{b} \pm \frac{(\Delta b)^2}{b^2} \pm \dots$

Sustituyendo esta igualdad en la expresión anterior, se tiene:

$$z \pm \Delta z = (a \pm \Delta a) b^{-1} \left(1 \pm \frac{\Delta b}{b} \pm \frac{(\Delta b)^2}{b^2} \pm \dots \right)$$

Suponiendo $\frac{\Delta b}{b} \ll 1$, entonces $\frac{\Delta b}{b} \gg \frac{(\Delta b)^2}{b^2}$, y se pueden despreciar los términos de orden superior, y la expresión para $z \pm \Delta z$, queda:

$$z \pm \Delta z = (a \pm \Delta a) b^{-1} \left(1 \pm \frac{\Delta b}{b} \right) = \frac{a}{b} \pm \frac{1}{b} \left(\Delta a + \frac{a}{b} \Delta b + \frac{\Delta a \Delta b}{b} \right)$$

Como $z = \frac{a}{b}$, al despejar Δz , se tiene:

$$\Delta z = \left(\Delta a + \frac{a}{b} \Delta b \right) b^{-1}$$

por lo que finalmente se obtiene:

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$$

o sea que en una división la incertidumbre relativa en el cociente es la suma de las incertidumbres relativas en el dividendo y en el divisor.

Si z es el cuadrado de a , es decir: $z = a^2$. Al sustituir las incertidumbres respectivas, se tiene:

$$z \pm \Delta z = (a \pm \Delta a)^2 = (a \pm \Delta a) (a \pm \Delta a)$$

Utilizando el resultado de la multiplicación:

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta a}{a} = 2 \frac{\Delta a}{a}$$

Por un argumento semejante se puede demostrar que si $z = a^n$, entonces:

$$\frac{\Delta z}{z} = n \left(\frac{\Delta a}{a} \right)$$

Si z es el sen θ es decir: $z = \sin \theta$, al sustituir las incertidumbres respectivas, se tiene: $z \pm \Delta z = \sin (\theta \pm \Delta \theta) = \sin \theta \cos \Delta \theta \pm \cos \theta \sin \Delta \theta$ como $\Delta \theta \approx 0$ se puede tomar $\cos \Delta \theta \approx 1$ y $\sin \Delta \theta = \Delta \theta$, por lo que $\Delta z = (\cos \theta) \Delta \theta$; con estos valores, al formar el cociente: $\frac{\Delta z}{z}$, se obtiene:

$$\frac{\Delta z}{z} = (\cot \theta) \Delta \theta$$

Si z es una función exponencial; es decir, $z = \exp a = e^a$ al sustituir las incertidumbres respectivas, se tiene:

$$z \pm \Delta z = \exp^{(a \pm \Delta a)} = (e^a) (e^{\pm \Delta a})$$

Sin embargo, recuérdese que una función exponencial se puede desarrollar como una serie, por ejemplo:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots$$

Al aplicar este desarrollo para $e^{(\pm \Delta a)}$, se tiene:

$$e^{\pm \Delta a} = 1 \pm \Delta a \pm \frac{(\Delta a)^2}{2} \pm \dots \approx 1 \pm \Delta a \text{ si } \Delta a \ll 1$$

Sustituyendo este valor en $z \pm \Delta z$, se tiene:

$$z \pm \Delta z = e''(1 \pm \Delta a) = e'' \pm \Delta a e''$$

Pero $z = e''$, por lo que $\Delta z = \Delta a e''$. Si dividimos entre z tenemos finalmente la siguiente expresión, para el error relativo de una exponencial:

$$\frac{\Delta z}{z} = \Delta a$$

Es conveniente recalcar que esta manera de propagar las incertidumbres es pesimista en el sentido de que las combina de tal modo que se obtiene la máxima incertidumbre, compatible con el concepto de máximo error posible.

Hemos visto ejemplos de cómo combinar errores máximos absolutos, lo que nos da una estimación pesimista de la incertidumbre. Ahora veremos cómo obtener la incertidumbre de magnitudes medidas indirectamente a partir de otras, a las que se les determinó valores promedios y desviaciones normales o típicas. Debido a que su deducción implica el uso del cálculo integral, nos conformaremos con mencionar algunos de los casos más conocidos, y en el apéndice D daremos su deducción.

Supondremos que se conoce la función z , o sea: $z = f(a, b, c)$, y que se han medido los valores de a , b , c el número de veces necesario para calcular $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$, s_a , s_b , s_c . Queremos calcular $\langle z \rangle$ y s_z , entonces $\langle z \rangle = f(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle)$, relación válida si la función z la podemos aproximar por una línea recta en el intervalo ocupado por los valores experimentales.

Para calcular s_z usaremos las siguientes relaciones (véase apéndice D):

$$\text{Si } z = a + b + c, \text{ entonces } s_z^2 = s_a^2 + s_b^2 + s_c^2$$

$$\text{Si } z = \frac{ab}{c}, \text{ entonces}$$

$$\left(\frac{s_z}{z}\right)^2 = \left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{c}\right)^2$$

Si $z = \frac{a^l b^m}{c^n}$, entonces

$$\left(\frac{s_z}{z}\right)^2 = \left(l \frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(m \frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(n \frac{s_c}{c}\right)^2$$

Si $z = e^x$ entonces $\frac{s_z}{z} = s_a$

Si $z = \log(a)$, entonces $s_z = \frac{s_a}{a}$

La primera relación se puede aplicar para calcular la desviación normal del promedio definido en la ecuación (4.1) como:

$$\langle x \rangle = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_1}{n} + \frac{x_2}{n} + \frac{x_3}{n} + \dots + \frac{x_n}{n}$$

en donde x_i es la i -ésima medición, hasta completar n mediciones, n es el número total de mediciones; se han separado en sumandos para reconocer que tienen la forma de la primera ecuación. Si llamamos s_i a la desviación típica de cualquier medida x_i (es igual para todas) y s_n la desviación normal del promedio.

La desviación normal de $\frac{\sum x_i}{n}$ será $\frac{s_i}{n}$ entonces:

$$s_n^2 = \frac{s_1^2}{n^2} + \frac{s_2^2}{n^2} + \dots + \frac{s_n^2}{n^2} = \frac{ns^2}{n^2} = \frac{s^2}{n}$$

Si sacamos raíz cuadrada y aplicamos la ecuación (4.4), tenemos:

$$s_n = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n(n-1)}}$$

relación que ya conocíamos pero que no se había justificado.

Con las relaciones anteriores es posible calcular los errores de magnitudes medidas, directa o indirectamente, las cuales se pueden expresar como un valor promedio $\pm$ su error o incertidumbre, expresado como máximo error posible, desviación normal o desviación normal del promedio, según nos parezca conveniente. En caso de usar la desviación normal del promedio se acostumbra dar el número de medidas, ya que su valor depende de éste.

4.7. ANÁLISIS GRÁFICO

El resultado directo de un experimento suele ser una tabla de datos. Una gráfica hecha con estos datos facilita la interpretación de los mismos; se recomienda hacerla antes de desarmar el dispositivo experimental, ya que cualquier desviación o punto sospechoso de la gráfica puede eliminarse repitiendo el experimento en las mismas condiciones. Para realizar estas gráficas, se acostumbra poner en el eje horizontal la variable independiente (la que variamos a voluntad) y en el vertical, la variable dependiente, aunque en algunos casos podría convenir lo contrario. Las escalas se escogen de modo que el tamaño de la gráfica permita hacer una lectura fácil de los puntos experimentales, o sea que la mínima división de la gráfica se hace un múltiplo de 2, 5 o 10.

Aún en los casos en que se repite n veces una misma medida, es conveniente graficar la medida contra el número de medida o contra el tiempo, para detectar posibles variaciones debidas a temperatura ambiente, presión atmosférica, intensidad de luz, cambio de experimentador, etc.; ésto se hace para aprovechar que en una gráfica se muestran claramente las desviaciones sistemáticas alrededor del valor medio (fig. 4.8).

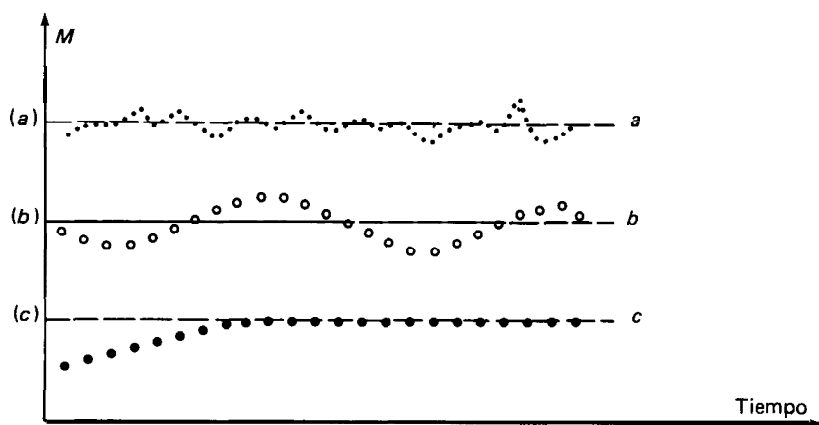


Fig. 4.8. Valores obtenidos en medidas sucesivas de las magnitudes a , b y c . En la medida de a se presentan errores aleatorios; b tiene error sistemático fluctuante, y c tiene error sistemático en las medidas iniciales.

Cuando sólo se busca una relación empírica, se sitúan primero los puntos experimentales con sus intervalos de incertidumbre, los cuales se unen con una curva suave (sin discontinuidades en la derivada) lo más simple posible. Esta curva es, de hecho, una predicción acerca de los posibles valores de la variable para valores intermedios no medidos experimentalmente (**interpolación**). En general no es fácil encontrar una relación analítica entre las variables, excepto en el caso de una línea recta.

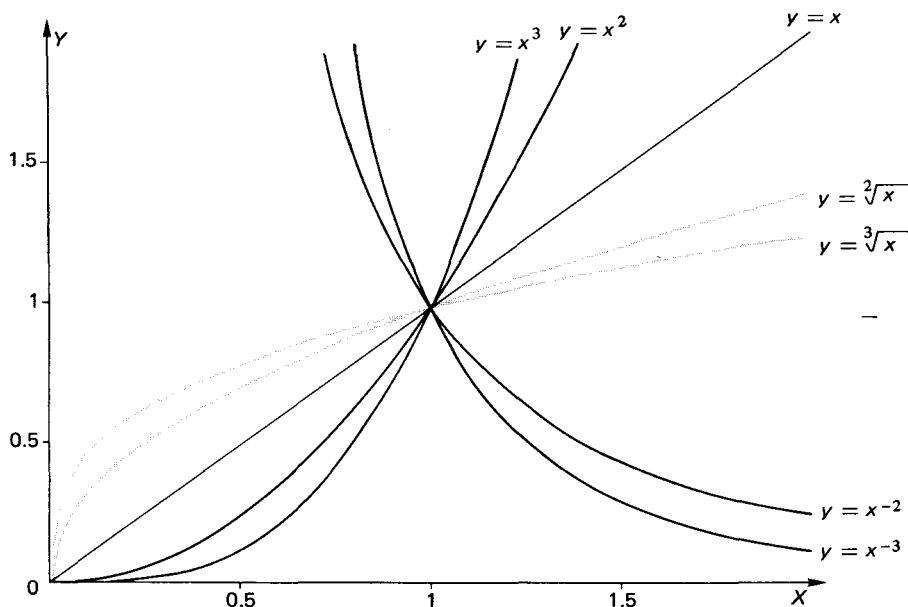


Fig. 4.9. Es difícil distinguir entre curvas con exponentes parecidos, especialmente cuando el experimento sólo proporciona un pedazo de curva. La línea recta sí se identifica.

En la figura 4.9 se muestran algunos tipos de curva y sus curvaturas. Como se ve, es difícil distinguir entre exponentes 2 y 3, y la situación se complica aún más cuando se observa un pedazo de curva. Sin embargo, a veces se tiene una idea de qué tipo de curva es, ya sea porque existe un modelo que predice cierta curva o porque la gráfica directa tiene cierto parecido con alguna bien conocida. Si al hacer cambios de variables se puede lograr que la gráfica sea una recta, entonces se puede identificar la relación analítica correspondiente.

Se dice que hay acuerdo entre la teoría y el experimento cuando la curva teórica pasa por todos los intervalos (puntos) determinados experimentalmente. El trazo de una curva teórica se simplifica si se han hecho los cambios de variable necesarios para que sea una recta.

EJEMPLO 1

Si se piensa que la relación es del tipo:

$$y = bx^n$$

se puede hacer el cambio de variable $x^n = X$; $y = Y$, con lo que se obtiene $Y = bX$, que es la ecuación de una línea recta en las variables (X, Y) . Otra posibilidad es utilizar papel log-log en el cual las escalas en ambos ejes cartesianos son logarítmicas y cuando se localiza el punto (x, y) , corres-

ponde a $(\log x, \log y)$ en una escala lineal; es decir, este papel hace el cambio de variable $Y = \log y$ y $X = \log x$; veamos ahora porqué se hace recta. Tomando el logaritmo de la ecuación $y = bx^n$, se obtiene:

$$\log y = \log(bx^n) = \log b + \log(x^n) = \log b + n \log x \quad (4.5)$$

De acuerdo con el cambio de variable:

$$Y = \log y \quad y \quad X = \log x$$

al sustituir en la ecuación (4.5) se tiene:

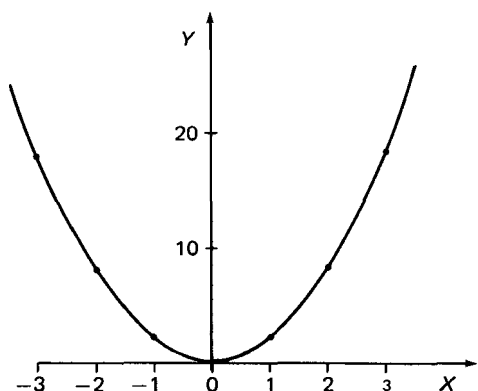
$$Y = nX + \log b$$

ecuación que corresponde a una línea recta de pendiente n y ordenada al origen $\log b$.

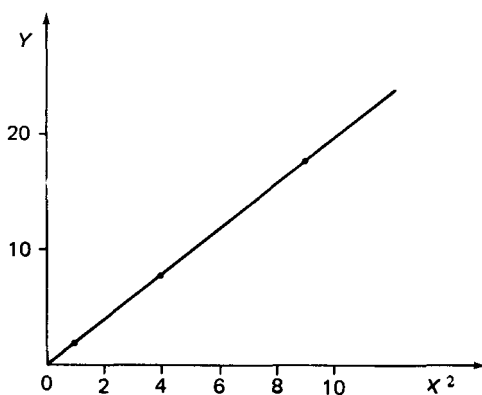
Por ejemplo, si $Y = 2X^2$, su gráfica está dada por (fig. 4.10):

X	Y	X^2
0	0	0
± 1	2	1
± 2	8	4
± 3	18	9

a)



b)



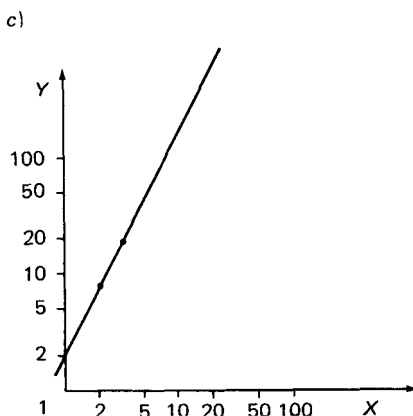


Fig. 4.10. Gráfica de la ecuación $Y = 2X^2$ en: a) escalas lineales, b) escala cuadrática en el eje X, c) papel log-log.

EJEMPLO 2

Si se piensa que la relación es del tipo:

$$y = a \exp (bx)$$

el cambio de variable adecuado será:

$$X = x; \quad Y = \log y$$

Este cambio de variable puede lograrse automáticamente si se usa papel semilogarítmico. Veamos por qué: tomando el logaritmo de $(y = a \exp (bx))$, tenemos:

$$\log y = \log (ae^{bx}) = \log a + \log (e^{bx}) = \log a + bx \log e$$

y de acuerdo con el cambio de variable, se tiene:

$$Y = (b \log e) X + \log a$$

que constituye la ecuación de una recta con pendiente $(b \log e)$ y ordenada al origen $\log a$.

Por ejemplo, si $Y = 3e^{-x/2}$, entonces la gráfica sería como la que se muestra en la figura 4.11.

Si no se tiene el papel, se puede construir con las tablas de logaritmos de base 10 (fig. 4.12).

Suponiendo que se haya logrado que los datos experimentales se encuentren a lo largo de una línea recta, subsiste el problema de encontrar una expresión analítica (ecuación), o sea, determinar los valores de m y b en la ecuación general $y = mx + b$.

Esto se hace por medio de una regla transparente o de un hilo, que se coloca de modo que pase por todos los intervalos experimentales (pun-

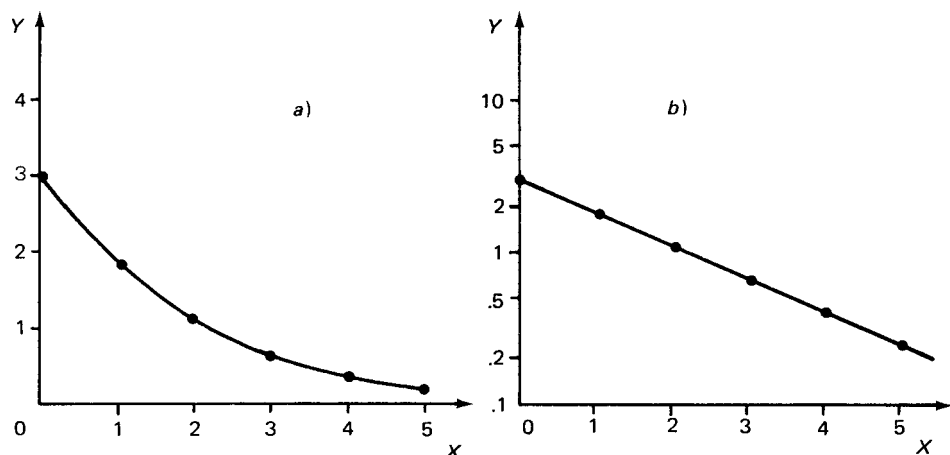


Fig. 4.11. Gráfica de la ecuación $Y = 3e^{-x/2}$ en: a) escalas lineales, b) papel semilogarítmico

X	Y	$\log_{10} Y$
0	3	0.48
1	1.82	0.26
2	1.10	0.04
3	0.67	-0.17
4	0.41	-0.39
5	0.25	-0.61

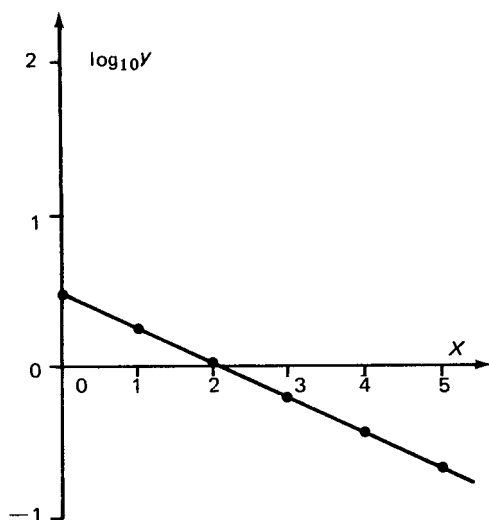


Fig. 4.12. Si no se tiene papel semilogarítmico, se obtiene el mismo resultado graficando el logaritmo de Y en escala lineal.

tos). Para evitar cualquier desviación, se recomienda que la recta pase de tal manera que los puntos experimentales estén simétricamente distribuidos a lo largo de la recta, tanto en la mitad derecha como en la mitad izquierda; ésta será la mejor recta que se pueda ajustar. Para encontrar el valor de b , sólo se necesita leer de la gráfica el valor de la ordenada al origen (cuando $x = 0$, $y = b$) de la recta.

Para encontrar el valor de la pendiente, se utilizan las coordenadas de dos puntos (no experimentales) sobre la recta (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , tan separados como se pueda, para que no resulte afectada la precisión de la deter-

minación de la pendiente, sustituyéndose después estos valores en la expresión analítica de la pendiente:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Un método sencillo para determinar la incertidumbre en la pendiente y en la ordenada al origen es el siguiente:

Ayudándose con las incertidumbres de los puntos experimentales, se traza un rectángulo paralelo a la línea recta ajustada y con un ancho tal que abarque los intervalos experimentales. Las diagonales de este rectángulo nos dan dos aproximaciones pesimistas por arriba y por debajo de lo que se considera la mejor recta. La dispersión de sus pendientes (y ordenadas al origen), dan una estimación del error que se puede tener en la pendiente (y ordenada al origen) (fig. 4.13). En el apéndice E se estudiará cómo obtener una estimación menos pesimista, utilizando el llamado método de los mínimos cuadrados. En todo caso, este método permite hacer una verificación independiente y rápida de los resultados obtenidos ajustándolos según el método de mínimos cuadrados.

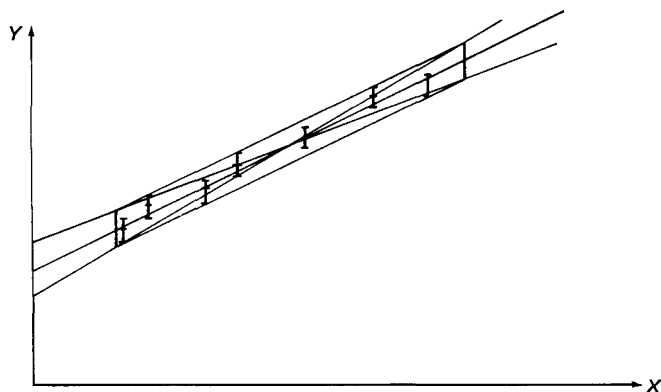


Fig. 4.13. Método gráfico para estimar el error en la pendiente de una recta.

El manejo adecuado de datos experimentales no es un tema fácil; requiere de un análisis exhaustivo de las medidas del experimento y del uso que se les vaya a dar; tampoco se espera que el alumno de enseñanza media superior los domine; hay algunos cálculos que todavía no están a su alcance. Sin embargo, es deseable que al menos se entere de las diferentes formas de tratar las medidas de un experimento, con el fin de que en su vida profesional y conforme aumenten sus conocimientos, pueda profundizar en el tema para saber cuándo, cómo y cuál método aplicar para manejar sus datos experimentales, ya que los resultados de cualquier trabajo de investigación gozarán de mayor confianza en la comunidad científica, cuanto mejor se manejen los datos y mediciones.

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Cuál es la diferencia entre precisión y exactitud?
2. ¿Cuándo se utiliza el máximo error absoluto?
3. Defina valor promedio, moda y mediana.
4. Defina la desviación típica o normal en una medida y en el promedio de un conjunto de medidas.
5. ¿Cómo se propaga el error en un cociente de dos magnitudes medidas experimentalmente?
6. ¿Cuándo conviene utilizar el papel log-log para graficar resultados experimentales?

5

Aplicaciones

- 5.1. Energía solar
- 5.2. Obtención de leche búlgara
- 5.3. Concentración de plomo soluble en recipientes de barro

Los conocimientos presentados en páginas anteriores, tienen aplicación en cualquier problema que, para encontrar su solución, requiera del método experimental. En el presente capítulo se pondrán en práctica dichos conocimientos para resolver tres problemas relacionados con diferentes ramas de la ciencia; se espera que alguno de ellos esté cercano al campo de interés del lector, para que la manera de resolverlo le pueda servir de guía en problemas afines.

5.1. ENERGÍA SOLAR

La vida del hombre en nuestro planeta depende en gran medida de la energía que llega del Sol, la que se aprovecha en forma de calor para mantener la temperatura del planeta, en la radiación absorbida por las plantas verdes durante la fotosíntesis (lo que se traduce en alimentos y oxígeno atmosférico), en la evaporación del agua de mar necesaria para producir lluvias, en la energía almacenada en los combustibles fósiles, etc.

Debido al crecimiento exponencial de la población, es necesario incrementar la producción de alimentos en forma continua para satisfacer su demanda; ello hace que se traten de incorporar las tierras consideradas áridas (por falta de agua) a la producción de alimentos. Aunque se disponga de agua en abundancia en los océanos, la gran cantidad de sales que contiene la hace inútil para la agricultura. Con el propósito de apro-



Fig. 5.1. Energía solar usada para cocinar. (Tomado de *Biología tres* Rosado y coautores, Trillas 1978).

vechar, al menos en parte, ese enorme volumen de líquido, existen en la actualidad grandes plantas desaladoras que trabajan con energía solar. El principio en que se basan es simple: se utiliza el calor que llega del Sol para evaporar el agua del mar, con lo que se libera de sus sales, proceso que se conoce con el nombre de destilación; la cantidad de agua que tales plantas pueden destilar está relacionada con: a) el calor latente de evaporación del agua; b) la cantidad de energía que llega del Sol por unidad de área y tiempo (constante solar), y c) la cantidad de calor que se pierde por conducción, convección y radiación, en las diferentes partes del sistema que estén a mayor temperatura que la ambiente. Para resolver dichos problemas se han diseñado y construido plantas con diversos sistemas en los cuales se combinan los conocimientos de química, ciencia de materiales, termodinámica, etc., sin llegar todavía a soluciones satisfactorias; las soluciones obtenidas hasta ahora aún no son satisfactorias porque son caras y se piensa que pueden mejorarse, por tal motivo casi todos los países del mundo trabajan en ese campo y se espera que en un futuro próximo la técnica de desalación de agua de mar se aplique en forma intensiva.

Relacionado con el problema de la destilación del agua de mar, vamos a suponer la siguiente situación:

Con el propósito de estudiar los hábitos migratorios de las ballenas, se integra una expedición de tres personas, que acamparán durante tres meses en un islote rocoso del Golfo de California, donde no hay forma de subsistir por carecer de vida vegetal y animal y de agua potable. Ello significa que deberán llevar todo lo que puedan necesitar para vivir, como son: casa, comida, agua, ropa, material de primeros auxilios, comunicación de emergencia, combustible, jabón, etc. El problema es complejo y se requiere dividirlo para solucionarlo con mayor eficiencia. Vamos a suponer que nos toca el abastecimiento de agua potable; es necesario entonces saber la cantidad de líquido que usará la expedición durante tres meses, suficiente para beber, aseo personal, limpieza de utensilios, y, si el encargado de la comida decide llevar animales vivos, como parte de las provisiones, también deberá incluir su consumo de agua. Habrá que decidir entre llevar un depósito gigante para almacenar el agua tres meses, o llevar una destiladora para potabilizar el agua de mar; la primera opción tiene el inconveniente del transporte y la posible descomposición del agua por la proliferación de microorganismos; la segunda, ofrece mayor seguridad, comodidad y puede elegirse entre un destilador de combustible (lo que aumentaría la cantidad por llevar) o un destilador solar.

Nuestra decisión favorece el destilador solar y se antoja la posibilidad de construirlo; para ello se requiere, como dato fundamental, la cantidad de agua que puede obtenerse por metro cuadrado de colector solar, lo que equivale a saber cuál es la energía que llega del Sol por segundo por metro cuadrado. Con dicha energía, transformada a calorías, y el valor del calor latente de evaporación del agua, se calcula la máxima cantidad de líquido que puede esperarse del destilador.

La discusión anterior nos muestra que un problema real es muy complejo y se compone de diferentes factores relacionados entre sí; su solución depende de nuestra capacidad para determinar cuáles son dichos factores y cómo interaccionan, lo que divide el problema real grande en un conjunto de pequeños problemas de cuyo análisis depende la solución general. Vemos ahora lo importante que es aprender a resolver problemas pequeños como entrenamiento para llegar a los reales; con este espíritu, ataquemos el problema de medir la cantidad de energía que llega por unidad de área y unidad de tiempo al patio de nuestra casa, proveniente del Sol. En los manuales se puede encontrar la cantidad de energía que llega a la Tierra fuera de la atmósfera, y en otros lugares a nivel del suelo por lo que se espera que el valor calculado por nosotros se parezca al medido en aquellos lugares con la misma latitud y altura. La energía que buscamos se conoce como *constante solar*; la determinación de ésta se hará aplicando el método experimental; así que ¿puedes pensar un procedimiento que permita medir dicha energía?

Aunque existen aparatos para medir esta magnitud, por medio de semiconductores que transforman la energía solar en energía eléctrica, no los usaremos, porque no todos los pueden conseguir y dejan poco para pensar; por ello se ideará un procedimiento que mida calor absorbido por unidad de área y de tiempo. El calor se medirá ya sea por el incremento de temperatura producido en un material (conociendo su capacidad calorífica) o por la cantidad de material fundido o evaporado (conociendo el calor latente de solidificación o evaporación); de esta manera se pueden usar termómetros, balanzas, probetas, y material normal de laboratorio, además de los manuales necesarios para encontrar los calores específicos o calores latentes necesarios.

Se sugiere suspender en este momento la lectura para tratar de idear un procedimiento que permita medir el dato buscado. Si en un día no se te ocurre algún procedimiento, sigue adelante para ver lo que proponemos. El procedimiento por seguir para determinar el valor de la constante solar, usará como guía el método experimental, así que el primer paso será definir el problema. Si revisamos con cuidado el párrafo anterior, notaremos que el problema casi está definido, pero todavía falta la revisión bibliográfica; para buscar experimentos parecidos, se pueden consultar las revistas: *The Physics Teacher* y *American Journal of Physics*, aunque esta última tiene material adecuado para estudios de licenciatura. En el *Physics Teacher*,²⁵ encontramos un procedimiento basado en el calor latente de fusión del hielo, y en *Um projeto brasileiro para o ensino de Física*, de R. Caniato,²⁶ el autor usa el calentamiento de una masa conocida de agua. En los manuales y enciclopedias encontramos los siguientes valores de la constante solar:

- | | | |
|-------|-------------------------|---|
| 2 | cal/cm ² min | <i>Enciclopedia Salvat del Estudiante</i> . pág. 17 (1977). |
| 1.4 | kW/m ² | <i>Diccionario Enciclopédico Bruguera</i> . pág. 526 (1976).
<i>Handbook of Chemistry and Physics</i> , CRC Press, 57a. ed.,
pág. F-200 (1976). |
| 1.940 | cal/cm ² min | <i>Handbook of Chemistry and Physics</i> . |

En el libro de A. Meinel y M. Meinel *Applied Solar Energy*,'' encontramos los siguientes valores para la constante solar:

<i>Nivel del mar</i>			
<i>Extraterrestre</i>	<i>Desierto</i>	<i>Normal</i>	
1.3530	0.970	0.930	kW/m ²
1.940	1.39	1.33	cal/cm ² min
0.0323	0.0232	0.0222	cal/cm ² seg

Los valores son promedios obtenidos durante el año, con superficies perpendiculares al Sol y cerca del mediodía. La diferencia entre los valores extraterrestres y nivel del mar se refiere a la absorción y reflexión por la atmósfera terrestre, y entre desierto y normal se debe a que el aire en el desierto absorbe menos radiación solar. Entendemos ahora porque nos llega menos calor al amanecer o a la puesta del Sol, lo que se debe a que se atraviesa una capa mucho más larga de la atmósfera con la consiguiente absorción. Puede entonces esperarse que haya una variación con la altura sobre el nivel del mar, y con la latitud (que nos indica la máxima altura del Sol).

Podemos ahora delimitar el objetivo del experimento: medir la cantidad de calor que nos llega del Sol, por unidad de área y tiempo, sabiendo que estará cerca de 1.33 cal/cm²min. El área se considera perpendicular al Sol y se mide cerca del mediodía para que sea mínima la capa atmosférica atravesada.

1. Hipótesis de trabajo

Las hipótesis de trabajo serán las leyes físicas que consideramos aplicables al caso y son las siguientes:

a) Recordemos que cuando un objeto de masa m absorbe una cantidad de calor AQ , su temperatura se eleva ΔT grados, calculados con la siguiente relación:

$$\Delta Q = mc \Delta T \quad (5.1)$$

en donde c es el calor específico del material que constituye el objeto. Esto nos dice que la cantidad de calor absorbido es proporcional al incremento de temperatura del objeto absorbedor.

b) Cuando se absorbe calor y se produce un cambio de estado, no se produce incremento de temperatura, por lo que no es aplicable la relación anterior. En este caso la cantidad Q de calor absorbida está relacionada con el cambio en la masa líquida Δm , si se trata de una fusión. Entonces:

$$Q = C_1 \Delta m \quad (5.2)$$

en donde C_1 es el calor latente de fusión de la sustancia fundida.

c) Cuando la radiación incide sobre un objeto opaco, parte se refleja y parte se absorbe. Para que se refleje lo mínimo conviene pintar de negro la superficie absorbente, una superficie pintada con negro de humo refleja aproximadamente el 5% de la radiación solar que incide sobre ella.

d) Finalmente, un cuerpo en equilibrio térmico con sus alrededores. está a la misma temperatura que ellos. Este equilibrio es dinámico, o sea que el cuerpo absorbe de sus alrededores la misma cantidad de calor que les cede, de modo que en equilibrio térmico el flujo neto de calor es cero.

Es claro que al escribir las hipótesis anteriores teníamos en mente procedimientos experimentales en los que o se calentaba una sustancia o se fundía, y sólo mencionamos los modelos aceptados respecto a estos fenómenos. Esto hace ver la necesidad de planear el experimento como un conjunto, aunque nos podemos ayudar dividiendo el conjunto en pasos.

Este es otro momento adecuado para suspender la lectura y tomar tiempo para idear un procedimiento sobre cómo medir la constante solar. Si ya se pensó en alguno, ha de compararse con el que mencionaremos a continuación, a fin de realizar el que parezca más adecuado.

2. Diseño experimental

El método más simple usa una placa metálica cuadrada pintada de negro para que absorba toda la radiación incidente; metálica para que se caliente uniformemente y cuadrada para que su área sea fácil de medir. El problema se reduce a cómo medir su temperatura. Si tenemos un termopar o un termistor pequeños, se sujetarán al reverso de la placa o en un agujero, en medio de ella, para que de esa manera se mida la temperatura. Exponiendo la placa cierto tiempo al Sol, se puede medir la cantidad de calor absorbida mediante la primera ecuación y con el área y el tiempo, obtener el dato buscado. Sin embargo, termistores o termopares no son fáciles de encontrar, por lo que sería bueno que se pudiera medir con un termómetro de mercurio que se adquiere sin dificultad; sin embargo, su uso tiene el problema de conseguir un buen contacto térmico entre la placa y el termómetro. Ponerlo en medio requeriría una placa demasiado gruesa para que sea fácil de conseguir; si se usa una lámina doblada necesitamos algo en medio para que conduzca el calor al termómetro y al otro lado de la lámina; una lata delgada cuadrada podría funcionar bien, pero tampoco son fáciles de encontrar. Una botella de vidrio transparente llena de un líquido negro podría funcionar bien, si supiéramos cuanta radiación se pierde en la primera reflexión en la parte exterior del vidrio de la botella; si la pintamos de negro exteriormente, el vidrio es poco conductor del calor y la temperatura del líquido negro será inferior a la del vidrio exterior. Finalmente, puede intentarse con una lata de jugo de aluminio (buen conductor del calor) llena de agua, líquido del cual conocemos su calor específico, y pintada de negro de humo en la superficie absorbente.

Hagamos un cálculo aproximado de cuánto tiempo se requeriría para que aumente su temperatura un grado centígrado, suponiendo que un grado centígrado es la mínima división de la escala del termómetro. Si se coloca la lata con agua en el Sol, de manera que el área de su sombra sea igual al área dada por el diámetro por la altura del bote, significa que dicha área es perpendicular a los rayos solares. Esto se nota porque la sombra se ve rectangular. Con este procedimiento sólo será necesario ennegrecer la mitad del área lateral de la lata; pero existe un inconveniente: si se absorbe todo el calor recibido, la temperatura del bote crecerá linealmente en el tiempo, hasta que su temperatura sea mayor que el ambiente y pierda más calor del que recibe; finalmente, la temperatura subirá lo suficiente para que todo el calor recibido del Sol sea absorbido en los alrededores (fig. 5.2). El procedimiento adecuado es entonces montar la lata en el soporte adecuado y hacerle sombra hasta que llegue a equilibrio térmico, dejar que el Sol la caliente y medir el incremento de temperatura

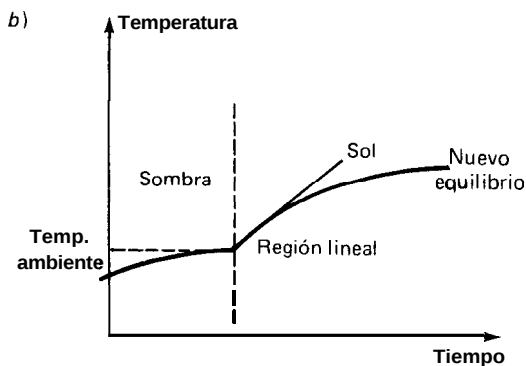
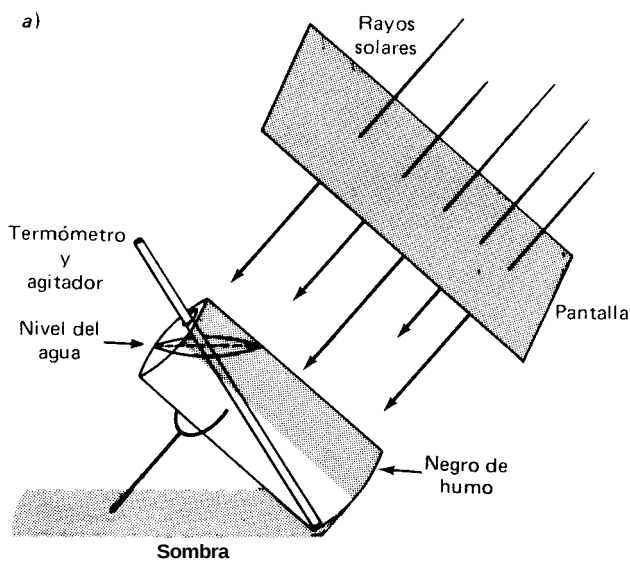


Fig. 5.2. Dispositivo para medir la constante solar: a) Con la pantalla se equilibra térmicamente con el medio; quitando ésta se absorbe el calor de la radiación solar. b) Diagrama de la temperatura antes y después de quitar la pantalla.

con el tiempo, para poder detectar la parte lineal del incremento en que podemos desprestigiar las pérdidas hacia el medio ambiente. La figura 5.2 muestra el tipo de curva que podemos esperar. Dado que no conocemos la rapidez con que, en equilibrio, intercambia calor con el medio, no podemos calcular la nueva temperatura de equilibrio, pero sí esperamos que en unos cuantos grados este efecto sea despreciable; el experimento nos dirá si esto es razonable. Por este motivo se calculará el tiempo que tarda en subir un grado centígrado la temperatura, ya que este tiempo debe ser razonable para que el Sol no se mueva mucho. Los valores usados en este cálculo los medimos usando los objetos cercanos, o los estimamos como valores razonables.

Una lata de aluminio de 340 cm pesa ≈ 40 g y tiene un diámetro $D = 6.1 \pm 0.1$ cm y una altura $L = 13.1 \pm 0.1$ cm; se le pone dentro 250 g de agua, que tiene un calor específico $c_{\text{agua}} = 1.00$ cal/goC. El calor específico del aluminio es $c_{\text{aluminio}} = 0.215$ cal/g°C. La capacidad calorífica del sistema será:

$$C = m_1 c_1 + m_2 c_2 = 40 \times 0.215 + 250 \times 1.00 = 259 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$$

El área efectiva es $A = 6.1 \times 13.1 = 79.9 \pm 2 = 80 \pm 2$ cm² suponiendo que la constante solar sea $K = 1.33 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{min}}$, en la lata de 80 cm² recibirá $\approx 80 \times 1.33 = 106 \frac{\text{cal}}{\text{min}}$ (flujo de calor)

Dado que $\Delta Q = mc\Delta T$, entonces la cantidad de calor necesario para subir un grado la temperatura es $Q = 259$ cal. Si $Q = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ es el flujo de calor, entonces:

$$\Delta t = \frac{\Delta Q}{\dot{Q}} = \frac{259 \text{ cal}}{106 \frac{\text{cal}}{\text{min}}} = 2.4 \text{ minutos}$$

por lo que podemos esperar que en 10 minutos suba $\approx 4^\circ\text{C}$ incremento razonable de temperatura. Si estos valores hubieran sido o muy chicos o muy grandes, hubiera sido necesario modificar el tamaño del sistema. Es de esperar que la precisión no sea muy alta ya que el intervalo de temperatura es pequeño (del orden de 10 grados, con una incertidumbre de uno o dos grados); esto nos lo dirá el experimento en el que se determine la parte lineal de la curva de calentamiento.

Existe otra posibilidad, medir aprovechando la fusión del hielo, en la que se consumen 80 cal por gramo de hielo fundido. Para esto se requiere que el hielo absorba el calor radiado por el Sol, y no le llegue de ninguna otra fuente de calor.

Para que absorba el calor radiante hay que colocarle una superficie negra que reduzca al máximo los fuertes reflejos que presenta una super-

ficie de hielo, esto se puede lograr cubriéndolo con una delgada lámina de aluminio o cobre pintada con negro de humo (obtenido de una vela encendida); para que no le llegue calor por conducción de los alrededores, se puede colocar el bloque de hielo en un vaso de poliestireno expandido, material que se emplea para fabricar vasos desechables para tomar bebidas calientes. Este material aísla bastante bien y una o dos capas reducen bastante el flujo de calor. Si colocamos el día anterior el vaso semilleno de agua en el congelador del refrigerador, obtendremos un bloque de hielo con la forma exacta, para que no se mueva y haga buen contacto térmico con la lámina metálica que la cubre. Al comenzar el experimento la temperatura del hielo será inferior a cero grados centígrados, por lo que hay que dejar que se establezca el ritmo de fusión debido a las fugas de calor desde el medio ambiente, colocando una sombra sobre el sistema.

De nuevo será necesario colocar la superficie perpendicular a los rayos solares y medir periódicamente la cantidad de agua disuelta, para detectar el arribo a un estado estacionario, lo que se logra escurriéndola a un envase graduado, antes de permitir que los rayos solares directos incidan sobre el dispositivo y modifiquen el estado estacionario original. La diferencia entre estos dos estados nos dirá la contribución solar.

Para determinar cada cuando medir, conviene introducir algunos valores numéricos para ver si las dimensiones del sistema son razonables bajo un punto de vista práctico. Un vaso de plástico tiene un diámetro medio $D = 6$ centímetros y cuando está medio lleno, le caben aproximadamente 100 cm^3 ; así que tiene un área de absorción de 28 cm^2 , los cuales absorberían (suponiendo que inciden $1.33 \text{ cal/cm}^2\text{min} \approx 37 \text{ cal/minuto}$). Comparando este último valor con las 80 cal/g necesarias para fundir el hielo, vemos que fundiríamos $\approx 0.5 \text{ g}$ en un minuto. Debemos ahora escoger el instrumento para medir el agua fundida y determinar el intervalo adecuado entre medidas, ya sea que se use una balanza con sensibilidad en décimas de gramo, o una pipeta de 1 o 2 cm^3 . En el primer caso mediríamos cada 5 minutos para que la incertidumbre sea 0.1 en 2.5 g, o sea el 1 en 25; comparable a la que se obtiene con una pipeta de 1 cm^3 medido cada 2 minutos. Para que este método funcione se requiere que la rapidez de fusión, debida a las pérdidas, sea pequeña comparada con la solar; en el peor de los casos, que sea del mismo orden para que la diferencia entre las dos velocidades de fusión sea medible.

El error sistemático más obvio radica en despreciar la reflexión del negro de humo; la repetibilidad de las medidas nos dirá la magnitud de las fluctuaciones estadísticas que se presentan realmente: esto último lo sabremos hasta realizar las medidas correspondientes. Para realizar el experimento escogimos arbitrariamente el procedimiento que implica calentar el bote con agua; en el cual utilizamos el siguiente equipo y materiales:

Equipo:

Balanza Ohaus mod 311

Capacidad: 311 g

Sensibilidad: 0.01 g

Termómetro de mercurio

- Escala: 20 a 110° C

mínima división de la escala 1° C

- Reloj de pulso con segundero

Material es:

- Bote de aluminio
- Vela
- Agua
- Popote con poliestireno en el extremo

Procedimiento:

La mitad de la pared lateral del bote de aluminio se pintó con negro de humo obtenido de la vela, acercando el bote a la región de la flama en que la combustión es incompleta. Se agregó agua y se colocó en el Sol de manera que su sombra fuera rectangular, asegurando que su área lateral es la única que recibe los rayos solares. Se cubrió todo con papel periódico para hacer sombra y se colocó el termómetro y el popote con poliestireno, para agitar el agua y obtener uniformidad en la temperatura. Después de 15 minutos (para dar tiempo a que estabilizaran los flujos de calor), se midieron los siguientes tiempos y temperaturas, agitando cada minuto:

<i>Tiempo (h)</i>	<i>Temperatura (° C)</i>
12:00	26.0
12:02	26.0
12:04	26.0
12:06	25.5
12:07	26.5
12:08	26.0
12:09	26.2

El papel periódico se quitó a las 12:06 h y se notaron ráfagas de aire frío después de las 12:07 h. De las lecturas se observa que el sistema se enfrió con el viento, por lo que se suspendió el experimento inicial. Para aislar el bote de las corrientes de aire se le colocó dentro de una caja de cartón abierta por arriba y apoyado en pedazos de poliestireno. Se repi-

tió el experimento al día siguiente y se obtuvieron los siguientes datos, estimando la incertidumbre en la temperatura a 0.2" C:

Tiempo	Temperatura (° C)	ΔT	Tiempo (en minutos)
<i>Sombra</i>			
12 h 25'	22.0	0	
27'	22.0	0	
29'	22.0	0	Δt
<i>Sol</i>			
30'	22.2	0.0	0
32'	23.0	0.8	2
34'	23.8	1.6	4
36'	24.4	2.2	6
39'	25.4	3.2	9
45'	27.2	5.0	15
51'	29.6	7.4	21
13 h 10'	32.0	9.8	40
<i>Incertidumbre</i>			
$\pm 5''$	± 0.2	± 0.4	

A las 12:30 horas se destapó el sistema para que el Sol lo iluminara, agitando el agua cada minuto.

La tercera columna indica el incremento de temperatura respecto a 22.2" C. Como la gráfica de estos datos pareció razonable, se procedió a medir el resto de los parámetros necesarios, como son:

Masa del bote = 41.80 ± 0.02 g

Masa del agua = (168.23 ± 0.02) g

+

Medida en dos porciones (140.25 ± 0.02) g

Masa total del agua = (308.48 ± 0.04) g

Diámetro del bote = 6.1 ± 0.1 cm

Altura del bote = 13.1 ± 0.1 cm

Las incertidumbres marcadas corresponden a máximos errores absolutos debidos a la lectura de las escalas.

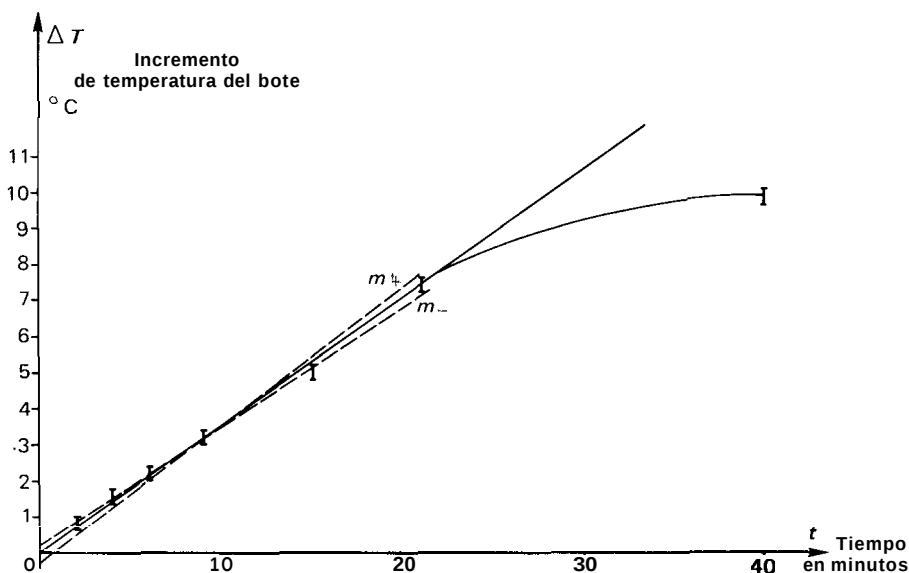


Fig. 5.3. Incremento de temperatura del bote con agua, expuesto al sol. Nótese la parte lineal y la estimación de las pendientes máxima y mínima (líneas punteadas).

A partir de la figura 5.3 se puede calcular la pendiente m de la parte lineal, o sea la rapidez de calentamiento $\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)$ del bote y su contenido

$$m = \frac{7.1 - 0}{20 - 0} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} = 0.355^{\circ}\text{C/min}$$

También se pueden calcular las pendientes de las rayas punteadas que nos indican valores pesimistas por exceso o por defecto, de la rapidez de calentamiento

$$\text{Pendiente máxima} = m_{+} = \frac{7.4 - (-.2)^{\circ}\text{C}}{20 - 0 \text{ min}} = \frac{7.6}{20} = 0.380^{\circ}\text{C/min}$$

$$\text{Pendiente mínima} = m_{-} = \frac{6.8 - 0.2^{\circ}\text{C}}{20 - 0 \text{ min}} = \frac{6.6}{20} = 0.330^{\circ}\text{C/min}$$

por lo que podemos decir que la rapidez de calentamiento $\frac{\Delta T}{\Delta t} = (0.355 \pm 0.025)^{\circ}\text{C/min}$, de donde se obtiene que las incertidumbres corresponden a máximos errores absolutos.

Si $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ es la cantidad de calor absorbida por la lata, entonces:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = KA \quad (5.3)$$

en donde K es la constante solar y A el área lateral de la lata. Además:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (m_{\text{agua}}c_{\text{agua}} + m_{\text{al}}c_{\text{al}}) \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (5.4)$$

donde m_{agua} , es la masa de agua con calor específico, c_{agua} y m_{al} es la masa de aluminio con calor específico c_{al} . Sustituyendo, se tiene:

$$m_{\text{agua}}c_{\text{agua}} = 308.48 \text{ g} \times 1.00 \frac{\text{caloría}}{\text{g}^{\circ}\text{C}} = 308.48 \frac{\text{caloría}}{^{\circ}\text{C}}$$

Así, el cálculo de las incertidumbres se efectúa como sigue:

$$\frac{\Delta (m_{\text{agua}}c_{\text{agua}})}{m_{\text{agua}}c_{\text{agua}}} = \frac{0.04}{308.48} + \frac{0.005}{1.00} = 0.00013 + 0.005 = 0.005$$

$$\Delta (m_{\text{agua}}c_{\text{agua}}) \approx 0.005 \times 308.48 \approx 2 \frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{C}}$$

Finalmente:

$$m_{\text{agua}}c_{\text{agua}} = 308 \pm 2 \frac{\text{caloría}}{^{\circ}\text{C}}$$

Análogamente, para $m_{\text{al}}c_{\text{al}}$:

$$m_{\text{al}}c_{\text{al}} = 41.80 \text{ g} \times 0.215 \frac{\text{caloría}}{\text{g}^{\circ}\text{C}} = 8.987 \frac{\text{caloría}}{^{\circ}\text{C}}$$

$$\frac{\Delta (m_{\text{al}}c_{\text{al}})}{m_{\text{al}}c_{\text{al}}} = \frac{0.02}{41.80} + \frac{0.0005}{0.215} = 0.0005 + 0.0023 = 0.0028$$

$$m_{\text{al}}c_{\text{al}} = 8.99 \pm 0.03 \frac{\text{caloría}}{^{\circ}\text{C}}$$

Entonces, tenemos que la suma:

$$\begin{aligned} m_{\text{agua}}c_{\text{agua}} + m_{\text{al}}c_{\text{al}} &= (308 \pm 2) + (8.99 \pm 0.03) = \\ &= (317 \pm 2) \frac{\text{caloría}}{^{\circ}\text{C}} \end{aligned}$$

El cálculo de la propagación de incertidumbres nos indica claramente que si deseáramos aumentar la precisión, sería necesario utilizar un mejor valor para el calor específico del agua, ya que su contribución es decisiva sobre las demás.

El área lateral efectiva A del bote es $A = 80 \pm 2 \text{ cm}^2$; despejando la constante solar K de las ecuaciones (5.3) y (5.4), tenemos:

$$K = \frac{m_{\text{agua}} c_{\text{agua}} + m_{\text{al}} c_{\text{al}}}{A} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{317 \frac{\text{caloría}}{^\circ\text{C}} \times 0.355 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}}{80 \text{ cm}^2} = 1.41 \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{2}{317} + \frac{0.025}{0.355} + \frac{2}{80} = 0.0063 + 0.070 + 0.025 = 0.10$$

por lo que:

$$K = (1.41 \pm 0.14) \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

De las incertidumbres, observamos que los términos dominantes son los correspondientes a la rapidez de calentamiento y al área lateral. La rapidez de calentamiento está limitada por la incertidumbre estimada del termómetro en 0.2°C , por lo que sería preferible usar un termómetro más sensible. Para mejorar el área lateral bastaría utilizar un calibrador con vernier para poder medir 0.1 mm , en lugar del valor utilizado de 1 mm . Un equipo más preciso para las otras medidas no *mejoraría la precisión del resultado final*, porque ellas no contribuyen a la incertidumbre. Dado que el máximo error absoluto obtenido es cercano al 10%, tampoco es necesario corregir la reflectividad del negro de humo estimada en 3%.

Otra manera de reducir la incertidumbre en la velocidad de calentamiento, sería reducir la capacidad térmica del sistema, reduciendo la masa y capacidad calorífica de los componentes, con lo que se obtendrían calentamientos mayores que pueden leerse con mejor precisión. Para lograr esto, se puede medir el calentamiento en una placa de aluminio en la que se coloca un termómetro dentro de un agujero lateral.

El experimento se realizó con una placa de aluminio de masa $m = 255 \pm 5 \text{ g}$, medida con una balanza casera; la superficie pintada de negro tenía las siguientes dimensiones: $l_1 = 7.5 \pm 0.05 \text{ cm}$ y $l_2 = 7.3 \pm 0.05 \text{ cm}$, con lo que se obtiene un área negra $A = (54.8 \pm 0.7) \text{ cm}^2$.

El espesor $l_3 = (1.6 \pm 0.05)$ cm permitió hacer un agujero con una profundidad de 3 cm y el diámetro adecuado para introducir el bulbo del termómetro.

La figura 5.4 muestra los incrementos de temperatura obtenidos en días diferentes. El cero de temperatura se obtuvo después de 5 a 10 minutos a la intemperie, pero haciendo sombra sobre la placa de aluminio para que el sistema adquiriera una temperatura estable. El cero del tiempo se tomó en el momento de quitar la sombra sobre la placa. En la figura se corrieron 5 minutos entre curva y curva para evitar el traslape de ellas. Las curvas 1 y 2 fueron medidas el mismo día, pero en la curva 2 la placa no estaba protegida del viento. Las curvas 1, 2, 3 y 4 fueron medidas en días con nubes ligeras entre el Sol y la placa, que permitían la formación de sombras en el piso; si las nubes aumentaban, desapareciendo las sombras, se suspendían las lecturas. La curva 5 fue tomada en un día claro con nubes definidas, que permitieron una observación de 11 minutos de duración.

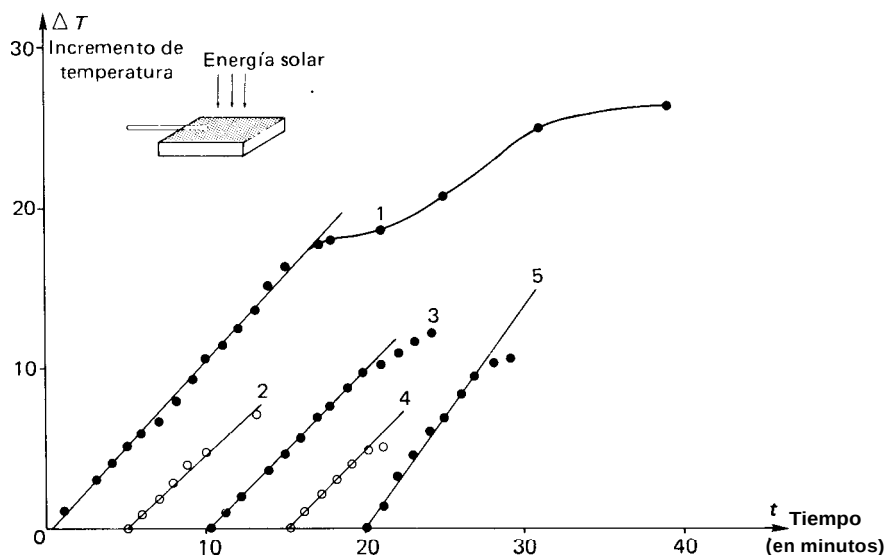


Fig. 5.4. Incremento de temperatura de una placa de aluminio pintada de negro, conforme aumenta el tiempo de exposición al sol. (Véase texto para significado de los números de las curvas.)

Los valores medidos de la gráfica para la rapidez de calentamiento de las rectas ajustadas son:

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_1 = (1.07 \pm 0.01)^\circ \text{C/min}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_2 = (0.91 \pm 0.03)^\circ \text{C/min}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_3 = (0.99 \pm 0.02)^\circ \text{C/min}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_4 = (0.97 \pm 0.03)^\circ \text{C/min}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_5 = (1.38 \pm 0.02)^\circ \text{C/min}$$

La capacidad calorífica de la placa C_c será:

$$C_c = mc = 255 \times 0.215 \text{ g} \frac{\text{caloría}}{\text{g}^\circ \text{C}} = 54.83 \frac{\text{caloría}}{^\circ \text{C}}$$

$$\frac{\Delta C_c}{C_c} = \frac{5}{255} + \frac{0.0005}{0.215} = 0.02 + 0.0023 = 0.022$$

Por lo que:

$$\Delta C_c = 1.2 \quad \text{y} \quad C_c = 54.8 \pm 1.2 \frac{\text{caloría}}{^\circ \text{C}}$$

La constante solar será:

$$K = \frac{C_c}{A} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$K_1 = \frac{54.8 \text{ caloría/}^\circ \text{C} \times 1.07^\circ \text{C/min}}{54.8 \text{ cm}^2} = 1.07 \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

$$\frac{\Delta K_1}{K_1} = \frac{1.2}{54.8} + \frac{0.7}{54.8} + \frac{0.01}{1.07} = 0.022 + 0.013 + 0.009 = 0.044$$

$$K_1 = (1.07 \pm 0.04) \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

$$K_2 = (0.91 \pm 0.06) \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

$$K_3 = (0.99 \pm 0.05) \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

$$K_4 = (0.97 \pm 0.06) \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

$$K_5 = (1.38 \pm 0.07) \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$$

3. Conclusiones

Los valores anteriores muestran que la dispersión de valores corresponde a diferentes espesores de la capa de nubes, ya que la diferencia entre valores es mayor que el error experimental, estimado como un máximo error absoluto. En la gráfica de la figura 5.4 observamos que para tiempos largos la temperatura tiende a estabilizarse, como esperábamos, y se notan cambios en la curva asociados con el cambio en el espesor de las nubes ligeras. El valor K_5 es el único comparable con el valor medido con la lata llena de agua ($K = 1.41 \pm 0.14 \frac{\text{caloría}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$) y obtenemos acuerdo entre los dos procedimientos, aunque K_5 tiene menor incertidumbre, como esperábamos. Finalmente, los experimentos mencionados fueron realizados durante el mes de octubre en la zona sur de la ciudad de México a una altura aproximada de 2 200 m sobre el nivel del mar.

5.2. OBTENCIÓN DE LECHE BÚLGARA

Desde el descubrimiento de Pasteur, acerca de que los bacilos eran los responsables de la fermentación de la uva y la consiguiente formación del vino, se les ha utilizado en condiciones controladas para obtener una gran cantidad de productos, de tal manera que existen laboratorios especializados en la obtención de cepas puras de bacterias útiles al hombre, para controlar los correspondientes procesos de producción. También se cultivan bacterias y virus nocivos, con objeto de estudiar sus propiedades, encontrar el procedimiento para atenuar su virulencia y aprovecharlos como vacunas.

El hombre en sus procesos digestivos utiliza la llamada flora intestinal que le ayuda a digerir sus alimentos. En el siglo pasado el bacteriólogo ruso Metchnikoff,²⁶ sugirió la idea de que las bacterias de la putrefacción del intestino grueso del hombre forman sustancias altamente nocivas, productoras de síntomas definidos de enfermedad, y expresó asimismo la opinión de que tales sustancias eran la causa de muchas de las muertes atribuidas a la vejez". La simple utilización de un agente que destruyera dichas bacterias no es factible ya que simultáneamente se destruye la flora intestinal, aunque se debe hacer en algunos casos de enfermedades graves. La solución que propuso era más simple y estaba basada en la idea de que el ácido láctico inhibía la acción de estos gérmenes: dado que la leche agria contiene ácido láctico, ingiriéndola se puede lograr el resultado deseado. Existen bacterias, como *Lactobacillus bulgaricus*, que cultivadas en leche producen ácido láctico dándole un sabor característico a la leche.

La leche se deja fermentar con objeto de mejorar su sabor, aroma, textura y valor nutritivo, además de aumentar así su duración en el almacén antes de que se descomponga y sea rechazada. A las leches fermentadas se les conoce con diferentes nombres, tales como: ácida, búlgara, kefir, kumiss, leben, taette, skyr, yogurt. Estas leches fermentan por la acción de una gran variedad de bacterias, las que se cultivan para preservar sus propiedades; entre estas bacterias se puede mencionar *Lactobacillus acidophilus*, fermento de la leche ácida, *Lactobacillus bulgaricus*, de la leche búlgara, *Streptococcus lactis*, que es muy usado en Estados Unidos para fermentar leche descremada, obteniéndose el suero de manteca cultivado (cultured buttermilk). En la región oriental del mediterráneo se usan granos de kefir para obtener leche agria, el kefir contiene estreptococos, lactobacilos y otros tipos de bacterias y levaduras. El leben es una bebida árabe preparada con leche de cabra y de vaca; kumis es el nombre asiático que se le da a la leche fermentada.

El yogurt, ahora de popularidad mundial, se prepara con *Streptococcus thermophilus*, *lactobacillus bulgaricus* y *placamobacterium yoghourfii*. En la actualidad estos productos se pueden conseguir en el mercado, pero antiguamente se cultivaban en casa y los cultivos pasaban de generación en generación, o de familia a familia. Todavía existen cultivos familiares, por lo que tiene sentido la pregunta relativa a qué clase de leche favorece el crecimiento de las colonias de bacilos, suponiendo que estamos interesados en que se reproduzcan con cierta rapidez para poder compartirlos.

Resumiendo, queremos averiguar experimentalmente la rapidez de crecimiento de una colonia de bacilos búlgaros alimentados con leche pasteurizada natural o con leche en polvo (rehidratada). Se pensó en utilizar estas dos leches ya que son accesibles de modo natural en zonas urbanas; la leche debe estar pasteurizada para que no contenga bacterias propias que compitan con el bacilo búlgaro, y sólo se quiere saber si en crecimientos caseros se obtendría una diferencia en la rapidez de crecimiento de las colonias. La planeación de un experimento para controlar una industria requeriría condiciones de alta asepsia y control estricto de la temperatura, ya que sabemos que la rapidez y reproducción dependen fuertemente de la temperatura, además de otros factores. Si se consigue otro tipo de cultivo, la pregunta sigue siendo válida.

Antes de seguir adelante, planea tu propio experimento y de ser posible, realízalo para que lo compares con el que se presenta en seguida y puedas obtener conclusiones propias. En las páginas siguientes describiremos cómo hicimos nuestro experimento y los resultados logrados; de modo que este es el momento adecuado para dejar de leer.

Objetivo del experimento

Determinar si hay diferencias significativas en la rapidez de crecimiento de bacilos búlgaros, alimentados con leche pasteurizada natural o con leche pasteurizada rehidratada.

Introducción

Las leches fermentadas se consumen por sus propiedades digestivas, y porque permiten la conservación de la leche por periodos largos de tiempo, lo cual no sucede con la leche fresca. La cantidad de leche que se puede procesar depende del tamaño de la colonia de bacilos de que se dispone, por lo que dichas colonias son cultivadas en las cocinas de muchas familias. La rapidez de crecimiento de las colonias depende de muchos factores tales como la temperatura, el tipo de leche a fermentar, su pH, etc. El efecto de cada uno de estos factores sería objeto de estudio en diferentes experimentos; por ahora nos interesa el tipo de leche usado y su efecto en la velocidad de crecimiento de la colonia, *en las condiciones en que se cultiva en la cocina de la casa*. Esta última restricción la ponemos para que los resultados puedan ser aplicados sin grandes cambios en el método de producción de la leche fermentada.

Para medir el crecimiento de las colonias se puede utilizar el volumen que ocupan o su peso, los conteos microscópicos los desechamos ya que son muy laboriosos, y el procedimiento es más sofisticado de lo que requieren los resultados buscados.

Procedimiento experimental

El primer paso fue conseguir las colonias de bacilos (búlgaros) en fermentación, separarlos con una coladera, lavarlos con agua corriente y colocarlos sobre una servilleta de papel para extraer el exceso de agua. El examen a simple vista de la colonia mostró pequeños granos de 1 a 3 mm de tamaño, aglomerados de forma irregular, lo que dificulta medir su volumen; por este motivo se prefirió medir su peso, como índice de crecimiento. Se decidió utilizar cuatro muestras para cada una de las leches, y tener así una idea de la repetibilidad del experimento. Las ocho muestras de bacilos se colocaron en 8 vasos pequeños numerados, a los que se les agregó una copa de leche ($1 \text{ copa} = 31 \text{ cm}^3$); dos días después, cuando ya se había transformado toda la leche en leche búlgara, se colaron nuevamente, se lavaron y escurrieron sobre una servilleta de papel, después de lo cual se pesaron con una balanza Ohaus, mod. 311, capaz de medir hasta centésimas de gramo. Los pesos obtenidos se muestran en la tabla 5.1. Después de pesados se regresaron a su mismo recipiente limpio y se les agregó otra copa de leche diferente de la que se les agregó en la primera ocasión, con objeto de compensar la actividad propia de la muestra. Inicialmente, a las muestras 1 a 4 se les agregó leche rehidratada y a las 5 a 8, leche natural. ΔP indica el incremento de peso, y se divide entre el peso inicial para poder comparar los crecimientos de vasos distintos que tienen diferentes pesos iniciales. Observamos que la dispersión de valores en la rapidez de crecimiento normalizada ($\Delta P/P_i$) es mayor que la esperada, gracias a la precisión de las medidas, lo que se debe al gran número de factores que intervienen en el fenómeno y que no fueron controlados. Para un experimento biológico, cuatro es un número sumamente pequeño. Nótese que

TABLA 5.1

Vaso	Peso ₁	Peso ₂	$\Delta P/P_1$	Peso ₃	$\Delta P/P_2$
1	1.35	1.47	0.089	1.69	0.150
2	1.46	1.37	-0.062	1.48	0.080
3	1.23	1.42	0.154	1.40	-0.014
4	1.30	1.64	0.262	1.85	0.128
	<i>Leche en polvo</i>		0.443	<i>Leche natural</i>	0.344
5	1.33	1.49	0.120	1.62	0.087
6	1.40	1.53	0.093	1.62	0.059
7	1.43	1.79	0.252	1.92	0.073
8	1.34	1.62	0.209	1.57	-0.031
	<i>Leche natural</i>		0.674	<i>Leche en polvo</i>	0.188
	± 0.02 g	± 0.02 g		± 0.02 g	

si sólo se hubiera hecho una vez con cada leche podríamos haber obtenido cualquier combinación, incluyendo que la leche los destruye. Dividiendo entre cuatro cada una de las sumas hechas en la tabla 5.1, obtendremos las siguientes velocidades promedio de crecimiento para los cuatro vasos:

	$\Delta P/P_1$	$\Delta P/P_2$
<i>Leche en polvo</i>	0.11 ± 0.09	0.05 ± 0.04
<i>Leche natural</i>	0.17 ± 0.05	0.09 ± 0.04

en donde las incertidumbres medidas corresponden a la desviación promedio en valor absoluto, por considerar que cuatro puntos son demasiado pocos para calcular una desviación normal.

Conclusiones

De los valores anteriores se ve que los bacilos colocados en leche natural (entera, de vaca, pasteurizada y homogeneizada) crecen casi al doble de velocidad que cuando se les coloca en leche en polvo rehidratada. Esperamos que esta diferencia sea significativa ya que es mayor o igual que la desviación promedio; aunque existen variables (como la temperatura del día) no controladas y que hicieron que en el segundo intento la velocidad

de crecimiento en ambas leches se viera reducida a la mitad aproximadamente. La velocidad de crecimiento de nuestra cepa de bacilos búlgaros varía entre 9 y 17% si se le cultiva en leche natural; o entre 5 y 11% si es en leche en polvo rehidratada. Esta información contesta la pregunta original: sí hay diferencias entre las dos leches. Para planear una producción industrial los resultados tienen demasiada incertidumbre, la que se puede reducir aumentando el número de muestras, y llevando un control estricto de la temperatura y de los procesos de limpieza del medio de cultivo, incluyendo su pasteurización *in situ*, filtrado del aire, etc., para eliminar la posibilidad de contaminación por otras bacterias. Un experimento burdo como este ayuda en la planeación de un experimento industrial o científico en el que la inversión de equipo y tiempo justifica ampliamente un diseño experimental meticuloso.

5.3. CONCENTRACIÓN DE PLOMO SOLUBLE EN RECIPIENTES DE BARRO

La contaminación ambiental es un problema general de las grandes ciudades, el cual se vuelve más importante conforme aumenta el número de habitantes de la Tierra; el desarrollo de métodos de medida de los diferentes contaminantes es un paso preliminar en la lucha por eliminarlos. Esperemos que los científicos de las nuevas generaciones se avoquen a la solución de los problemas más apremiantes de un futuro próximo, que son: la producción de alimentos, de energía y control de la contaminación ambiental. En México, además, tenemos un problema propio de contaminación, consistente en que algunos de los recipientes de barro usados para cocinar desprenden plomo soluble, el cual contamina los alimentos. Dado que una gran parte de la población cocina y come en recipientes de barro, es necesario medir la concentración de plomo soluble en líquidos contenidos por ellos.

El plomo es un veneno de efectos acumulativos, siendo muy difícil que el cuerpo lo pueda eliminar; sus efectos no son inmediatos ni espectaculares (excepto en dosis masivas raramente ingeridas) lo que hace que el afectado no se dé cuenta fácilmente. Puede causar desde ligero retardo mental hasta la muerte.

En la industria, el plomo es uno de los riesgos ocupacionales para trabajadores de fábricas de pintura, de acumuladores, artículos de cerámica, de hule, de muebles de baño, impresores, litógrafos, mineros, etc. Los síntomas de envenenamiento industrial incluyen debilidad, pérdida de peso, dolores abdominales y cólicos, vómito y dolores de cabeza.

En los recipientes de barro el plomo está contenido en el vidriado que se les aplica para impermeabilizarlos, en forma de óxidos de plomo, los cuales al calentarse en los hornos cerámicos se fijan en las paredes del recipiente; desgraciadamente si la temperatura no es la suficiente, parte del plomo no queda fijo y será disuelto por los ácidos orgánicos contenidos

en alimentos picantes, en los cítricos o en el vinagre. Los hornos utilizados en la manufactura de objetos de barro, alimentados con leña, se caracterizan por la no uniformidad de temperatura en su interior, de modo que aún en una misma hornada, diferentes objetos pueden desprender plomo en diferentes cantidades, debido a lo cual es necesario medir la cantidad de plomo soluble presente en cada utensilio. La prueba normal consiste en llenar el recipiente con una solución al 4% de ácido acético, dejarlo reposar durante 24 horas y medir el plomo disuelto en forma de acetato de plomo en la solución. Si la solución contiene más de 7 ppm (partes por millón) de plomo, se considera nocivo para la salud y debe destruirse o, al menos, perforarse para que sólo pueda usarse con fines de ornato. Lo anteriormente dicho no debe causarnos espanto y privarnos de los ricos alimentos de la cocina mexicana, algunos de los cuales cambian de sabor si no son cocinados en recipientes de barro; sino que es recomendable que les hagamos la prueba del ácido acético (el cual no los destruye) y tengamos la seguridad de que al menos nuestros familiares están a salvo de ese veneno insidioso.

Al hacer una revisión bibliográfica se encontrará que existen muchos métodos para determinar plomo, pero pocos tienen la sensibilidad necesaria para detectar partes por millón. Los pocos que la tienen están basados en equipos como los espectrofotómetros de absorción óptica o de absorción atómica, los que proporcionan la concentración midiendo la absorción de cierta longitud de onda de la luz al pasar por una solución o entre los átomos disociados por una flama de acetileno. Estos métodos son simples y fáciles pero dichos equipos raramente están en los laboratorios de una escuela de enseñanza media superior. Por tal motivo es importante el trabajo publicado por A. Díaz, J. A. García, J. Campo y A. Valdez, de la UNAM, publicado en la *Revista Mexicana de Física*, vol. 26, pág. 525 (1980), con el título "Método colorimétrico simple para determinar plomo soluble en esmaltes cerámicos" del cual hemos tomado el procedimiento (con pequeños cambios) que aplicamos para determinar el plomo soluble. En este caso se tienen dos pistas para encontrar el procedimiento: una ya la dimos y es la manera de disolver el plomo con ácido acético al 4% y la otra la constituye el siguiente párrafo tomado textualmente de la publicación mencionada. "El método propuesto consiste básicamente en precipitar el plomo del acetato, como sulfuro de plomo, obteniéndose una coloración que tiende a ser más oscura a medida que el contenido de plomo en la solución es mayor. La determinación cuantitativa del contenido de plomo se logra mediante la comparación visual de la muestra problema, con una serie de muestras patrón de concentración conocida."

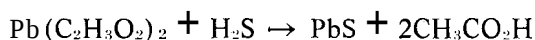
Si has acreditado el curso de química inorgánica, entenderás que el secreto está en la obtención de sulfuro de plomo (insoluble) en lugar del acetato de plomo (soluble); si se ha entendido esto, es un buen momento para suspender la lectura y tratar de idear un procedimiento que permita llevar a cabo la medida. De no ser así, los párrafos siguientes darán un procedimiento que se podrá efectuar en laboratorios escolares dada la simplicidad del equipo requerido.

Objetivo del experimento

Determinación de la concentración de plomo soluble en una solución de ácido acético al 4%, contenida en un recipiente de barro.

Introducción

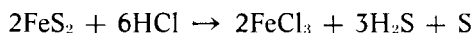
Debido a las propiedades venenosas del plomo, es necesario determinar si la solución, después de reposar 24 horas en el recipiente de barro a temperatura ambiente, contiene más o menos de 7 ppm de plomo, valor límite para que el recipiente de barro se considere inofensivo. El plomo extraído estará en solución en forma de acetato de plomo, el cual se transforma en sulfuro de plomo mediante una sulfhidración (burbujear en la solución, ácido sulfhídrico):



acetato de plomo + ácido sulfhídrico $\rightarrow$ sulfuro de plomo + ácido acético.

En la reacción anterior el acetato de plomo es soluble y el sulfuro de plomo no lo es, por lo que precipita dándole una coloración más o menos oscura según su concentración. Afortunadamente en el intervalo de 2 a 10 ppm de plomo las diferentes coloraciones se distinguen fácilmente por el ojo humano, el cual servirá como comparador visual con muestras patrón artificiales. Lo que nos evita el uso de un espectrofotómetro de absorción óptica.

La generación del ácido sulfhídrico se puede hacer mediante la siguiente reacción:



sulfuro de hierro + ácido clorhídrico + cloruro férrico + ácido sulfhídrico

en la cual el ácido sulfhídrico se desprende en forma gaseosa, lo que permite burbujearlo a través de la solución de acetato de plomo.

Procedimiento experimental

Para construir los patrones de referencia podemos utilizar acetato de plomo, que es la sal que esperamos se forme con el ácido acético. Normalmente se acostumbra partir de un patrón que tenga 1 000 $\mu\text{gPb/ml}$ (1 000 ppm) en la solución; para prepararla se acostumbra utilizar un litro de solución, lo que indica que necesitamos un gramo de Pb para disolverlo en un litro de solución. Utilizando los pesos moleculares del plomo y del acetato de plomo, obtenemos:

$$\begin{array}{ll} \text{Peso molecular del acetato de plomo} & = 325.28 \text{ g} \\ \text{Peso molecular del plomo} & = 207.19 \text{ g} \end{array}$$

Aplicamos la regla de tres para saber qué cantidad de acetato de plomo se necesita para tener 1 g de plomo.

$$\begin{array}{r} 325.28 \\ x \end{array} \quad \begin{array}{r} 207.19 \\ 1.00 \end{array}$$

Despejando x se tiene:

$$x = 325.28 \div 207.19 = 1.570 \text{ g}$$

o sea que requerimos 1.570 g de acetato de plomo para tener 1.000 g de plomo. Para preparar la solución requerimos de un matraz aforado de 1 000 ml, en el que colocaremos 1.570 g de acetato de plomo, el cual disolveremos en medio litro de agua destilada y, una vez disuelto, aforamos (llenamos) a un litro, agitando fuertemente después para asegurar que la solución sea homogénea y contenga la concentración C siguiente:

$$C = 1.000 \text{ g Pb} / 1\,000 \text{ ml} = 1.000 \text{ mgPb/ml} = 1\,000 \text{ } \mu\text{gPb/ml}.$$

Esto significa que cada ml de la solución contiene 1 000 μgPb .

Si se prepara un patrón de 100 ml, se requeriría 0.157 g, cantidad más difícil de pesar con precisión; por tal motivo se trabaja con un litro aunque se desperdicie la mayor parte de la solución. Si se usan 10 litros de solución podría lograrse mayor precisión en el peso, pero las dificultades en el manejo de 10 litros de solución cancelan sus ventajas.

Para comparar si la solución que vamos a medir contiene una cantidad mayor o menor que 7 $\mu\text{gPb/ml}$ (7 ppm), sería suficiente preparar una solución patrón con dicha concentración; pero si se desea saber qué tan arriba o debajo se está del valor 7 ppm, es necesario preparar soluciones patrón de 10 y 4 ppm.

Para preparar la solución patrón de 10 $\mu\text{gPb/ml}$ o 10 ppm, se toman 10 ml de la solución que ya se preparó y por tratarse de 10 ml se tendrán 10 000 μgPb (ya que cada mililitro contiene 1000 μgPb). Estos 10 ml se colocan en un matraz y se agrega agua destilada hasta obtener un litro; de esta manera los 1000 μgPb se diluyen en 1000 ml de solución, así que cada mililitro de esta nueva solución tendrá 10 μgPb ; o sea, la solución tendrá 10 $\mu\text{gPb/ml}$ o 10 ppm.

Las soluciones de 7 y 4 ppm se preparan tomando 70 y 40 ml de la segunda solución que preparamos; se colocan en diferentes matraces y se marcan con 7 y 4, respectivamente, para no confundirlos; de esta manera, se tendrán 700 y 400 μgPb en cada matraz. A continuación, se llena cada uno con agua destilada hasta completar 100 ml, con lo que se tendrán nuevas soluciones, donde cada mililitro tendrá 7 y 4 μgPb , respectivamente; o sea, las soluciones patrón de 7 y 4 ppm.

La muestra por medir se obtiene después de dejar por 24 horas una solución al 4% de ácido acético en el recipiente; parte de ella se coloca en un tubo de ensayo debidamente marcado; en otros tres tubos de ensayo

se colocan soluciones de 4, 7 y 10 $\mu\text{gPb/ml}$, y las cuatro se colocan en una gradilla mientras se prepara el generador de ácido sulfhídrico.

La figura 5.5 muestra un dispositivo para generarlo; en el primer frasco se colocan 10 g de pirita (FeS_2), se cubren con agua y se agrega lentamente ácido clorhídrico (al 50%) hasta que se desprenda un flujo continuo de burbujas. El frasco intermedio actúa como lavador del ácido sulfhídrico, que atrapa las partículas sólidas de pirita que podría arrastrar el flujo y que darían color a la muestra analizada. El gas al burbujear en las muestras patrón cambia la coloración de la misma y se considera terminada la reacción cuando ya no se observa cambio en el color. Se burbujan las cuatro soluciones, tres patrones y la muestra por medir, y se compara el color para ver si está arriba o abajo de 4, 7 o 10 $\mu\text{gPb/ml}$.

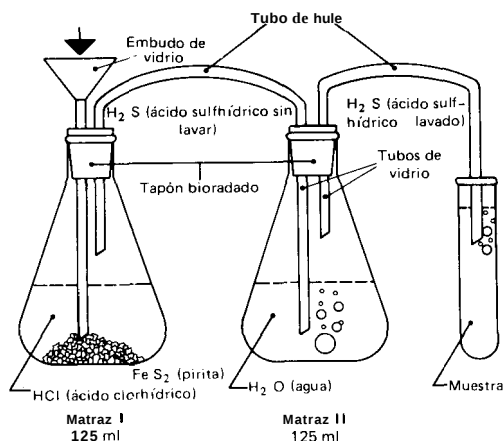


Fig. 5.5. Generador de ácido sulfhídrico, el cual sólo se debe usar en lugar ventilado, por peligro de envenenamiento y explosión.

Material y equipo

- 2 matraces aforados de 1 000 ml.
- 2 matraces de 100 ml.
- 1 pipeta de 10 ml.
- 4 tubos de ensayo.
- 1 embudo de vidrio.
- 2 erlen mayer de 25 ml, con tapón bioradado.
- 5 tramos de tubo de vidrio (que pasen por los tapones).
- 2 tramos de manguera de hule (para conectar con tubo de vidrio).
- 1 gradilla.

Material

- ácido acético al 4%.
- ácido clorhídrico al 50%.

- pirita, 10 gramos.
- acetato de plomo, 1.570 gramos.
- agua destilada.

Este procedimiento debe llevarse a cabo con ayuda de una campana de extracción de aire, ya que el ácido sulfhídrico perjudica las vías respiratorias ¡y es altamente inflamable *con riesgo de explosión!* Aunque este procedimiento se puede ver afectado por la presencia de otros metales pesados, es poco probable que se encuentren presentes en cantidades comparables al plomo, ya que éste es el principal metal usado en esmaltes cerámicos.

Como se puede apreciar, el método es laborioso, no muy complicado, sensible y bastante útil; esperamos que la mayor parte de los utensilios estén libres de plomo, para que puedas decidir conservarlos o no, con conocimiento de causa. Una recomendación final: no se deben mordisquear los lápices pintados de color amarillo, porque pueden contener plomo.

El conocimiento y aplicación del método experimental, además de permitir un enfoque adecuado para trabajar cualquier problema científico, proporciona una herramienta poderosa que puede cambiar la forma de ser y de pensar de quien lo conoce; ya no se buscarán soluciones porque sí. estarán apoyadas siempre en razonamientos lógicos y reglas coherentes que llegarán a infiltrarse hasta en aquellas situaciones de la vida diaria, que no por considerarse poco o nada científicas, son menos importantes. El deseo de que los individuos entiendan por qué hacen las cosas antes de actuar. es quizá el móvil de las autoridades educativas para enseñar el método científico a los estudiantes; es posible que al principio parezca complicado y engorroso, pero poco a poco se dará cuenta el lector de que su aprendizaje les proporcionará una de las armas más útiles en su vida, cualquiera que sea su actividad, porque tendrá siempre una visión más clara de aquello que va a hacer y, en consecuencia, de lo que puede esperar.

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. Calcule, con la constante solar extraterrestre y la distancia Tierra-Sol. la cantidad de energía que pierde el Sol cada segundo. Usando la equivalencia entre masa y energía ($E = mc^2$), puede calcular la masa que pierde el Sol por segundo.
2. Calcule la máxima cantidad de agua que se puede destilar en 4 horas de Sol, por metro cuadrado de evaporador, en el patio de su casa, sabiendo que a 40°C el calor latente de evaporación del agua es de 574 cal/g.
3. Diseñe un experimento para comparar lo "negro" de diferentes pinturas o recubrimientos.
4. Diseñe un experimento para medir la rapidez de fermentación de la leche búlgara.
5. ¿Se podrá eliminar el plomo de un recipiente de barro contaminado, bañándolo en vinagre (o ácido acético)? ¿Por qué?

Apéndice

- A. Ciencia y filosofía
- B. Distribución binomial
- C. Distribución normal o de Gauss
- D. Propagación de incertidumbres
- E. Mínimos cuadrados

A. CIENCIA Y FILOSOFÍA

La ciencia y la filosofía están íntimamente relacionadas; ambas utilizan el razonamiento para obtener conclusiones, pero difieren en la generalidad de sus resultados. La ciencia trata de explicar el comportamiento de la naturaleza en áreas particulares, y la filosofía busca la naturaleza última de las cosas, tratando de generalizar los resultados de la ciencia. El científico estudia el "cómo" ocurren las cosas, el filósofo busca "qué" son las cosas y "porqué" ocurren las cosas.

El científico utiliza muchos de los resultados de los filósofos, como la validez de la lógica y los postulados acerca de la naturaleza, mencionados en el capítulo 2. El físico estudia el comportamiento de las cosas materiales; el biólogo, el de los organismos; el psicólogo, el de los seres humanos; etc. Ninguno de ellos intenta poner sus diferentes resultados en una perspectiva consistente del Universo; este es el objetivo del filósofo. Por eso, los resultados de los científicos lo afectan profundamente. El triunfo de la mecánica clásica impulsó notablemente las ideas deterministas. Nuestros conceptos de espacio y tiempo, como entes separados, fueron enterrados por los resultados de la Teoría de la Relatividad de Einstein. Las incertidumbres asociadas con la mecánica cuántica permiten el desarrollo del libre albedrío.

Para su estudio, la filosofía se puede dividir en tres grandes áreas; metodología, metafísica y teoría de los valores. Ya que la *filosofía* es el estudio del conocimiento, uno de sus problemas es el estudio de los métodos de obtención del conocimiento, campo cubierto por la metodología. Ésta trata de responder cuatro preguntas fundamentales:

- a) ¿Cuál es la relación entre las sensaciones y la realidad?
- b) ¿Cuáles son las fuentes de conocimiento?
- c) ¿Cuál es la naturaleza de la verdad?
- d) ¿Cuáles son las formas válidas de razonamiento?

Las tres primeras son estudiadas por la epistemología y la cuarta la estudia la lógica.

Según sea la respuesta, se clasifican las diferentes posiciones filosóficas.

La *metafísica* busca la "esencia" de las cosas,^a y para su estudio se le divide en *ontología*, que busca la relación entre materia y pensamiento,^b y la *cosmología*, que estudia el "orden" en la naturaleza, o sea la estructura y composición del Universo.

^a O sea la razón fundamental de su existencia.
^b Es decir, el por qué las "cosas" son.

La *teoría de los valores* estudia los valores últimos reconocidos por el hombre: verdad, bondad y belleza. Estrictamente la filosofía busca sólo la verdad, dejando la bondad a la moral y la belleza al arte. Cuando busca la verdad dentro de éstas últimas lo hace mediante la ética y la estética.

CUADRO A.I

F I L O S O F Í A	Metodología	Epistemología	{ Relación sensación- realidad Fuentes de conocimiento Naturaleza de la verdad	
		Lógica	{ Estudio del razonamiento válido	
	Metafísica	Ontología	{ Relación materia-pensamiento	
		Cosmología	{ Orden en el Universo Estructura del Universo Composición del Universo	
	Teoría de los valores	Ética	{ Verdad en la moral	{ Bueno Malo
		Estética	{ Verdad en la belleza	{ Bello Feo

En el cuadro **A.I** se presentan las diferentes ramas de conocimiento que estudia la filosofía.

B. DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

Consideremos un experimento en el que lanzamos una moneda al aire, se dice que la probabilidad de que salga águila (o sol) es $p = \frac{1}{2} = 0.5$, basados en la experiencia que nos indica que si hacemos un gran número de lanzamientos, la mitad de ellos saldrá águila. De no ser así sospechamos que la moneda fue arreglada o que tiene "dos águilas". Si representamos por p y q las probabilidades de que salga águila o sol, respectivamente, podemos escribir:

$$q + p = 1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

ecuación que nos dice que la suma de las probabilidades de todos los eventos debe ser igual a uno.

Si lanzamos dos monedas, tenemos cuatro posibles resultados AA, AS, SA y SS, según cada moneda salga águila (A) o sol (S); en muchos lanzamientos esperamos que un cuarto de ellos, $\frac{1}{4} = 0.25$, caigan dos águilas o dos soles y, en un medio (0.5) de ellos $\left(\frac{1}{2} = 0.5\right)$, caiga un águila y un sol; esto equivale a decir que cada uno de los posibles resultados tiene la misma probabilidad, y que no distinguimos entre AS y SA.

Consideremos la ecuación:

$$(q + p)^2 = q^2 + 2pq + p^2 = 1$$

la cual es igual a 1, ya que 1 elevado a cualquier potencia es 1. Por otra parte:

$$p^2 = 0.25 = \frac{1}{4}; \quad q^2 = \frac{1}{4} = 0.25 \quad \text{y} \quad 2pq = 0.5 = \frac{1}{2}$$

verifica el resultado anterior. Cada término nos puede representar la probabilidad de que salga la combinación correspondiente de águilas y soles.

Si lanzamos tres monedas tenemos ocho posibles resultados: dos posibilidades para la primera moneda por dos de la segunda por dos de la tercera, de los que sólo cuatro son diferentes, ya que no distinguimos el orden de caída (AAS = ASA = SAA). Consideremos:

$$(q + p)^3 = q^3 + 3q^2p + 3qp^2 + p^3 = 1$$

Sustituyendo los valores numéricos de p y q , obtenemos:

$$\frac{1}{8} + \frac{3}{8} + \frac{3}{8} + \frac{1}{8} = 1$$

Podemos interpretar cada sumando como la probabilidad de que salga la combinación de águilas y soles correspondiente. En muchos lanzamientos esperamos que en un octavo de ellos salgan tres águilas (o soles).

Esta interpretación probabilística es válida para cualquier número N de monedas, y podemos decir que: **El binomio de Newton:**

$$(q + p)^N = q^N + Nq^{N-1}p + \dots + \frac{N!}{r!(N-r)!} q^{N-r}p^r + \dots + p^N = 1, \quad (\text{B.1})$$

en donde $N! = N(N-1)(N-2)(N-3) \dots \times 3 \times 2 \times 1 \dots$ **representa en general el resultado del lanzamiento de N monedas.** Calculando para

$$N = 25 \quad \text{y} \quad p = q = \frac{1}{2}$$

se encuentra:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)^{25} &= 1 = \left(\frac{1}{2}\right)^{25} + 25 \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{25 \times 24}{2 \times 1} \left(\frac{1}{2}\right)^{23} \\ &+ \frac{25 \times 24 \times 23}{3 \times 2 \times 1} \left(\frac{1}{2}\right)^{22} + \dots + 25 \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^0 \\ &= f_r(0) + f_r(1) + f_r(2) + f_r(3) + \dots + f_r(24) + f_r(25) \\ f_r(n) &= \frac{N! p^n q^{N-n}}{n! (N-n)!} \end{aligned}$$

Los valores numéricos obtenidos se muestran en la tabla B.1, los cuales fueron graficados en el capítulo 4.

TABLA B.1

Núm. de águilas	Frecuencia relativa	Núm. de soles
0	3.0×10^{-8}	25
1	7.4×10^{-7}	24
2	8.9×10^{-6}	23
3	6.8×10^{-5}	22
4	3.8×10^{-4}	21
5	1.6×10^{-3}	20
6	5.3×10^{-3}	19
7	1.43×10^{-2}	18
8	3.22×10^{-2}	17
9	6.09×10^{-2}	16
10	9.74×10^{-2}	15
11	13.3×10^{-2}	14
12	15.5×10^{-2}	13

El valor promedio del número de águilas (n) lo podemos obtener de su definición:

$$\langle n \rangle = \frac{\sum_{n=0}^N n_i f(n_i)}{N} = \sum_{n=0}^N n_i f_r(n_i) = \sum n_i p_i$$

en donde n_i es el número de águilas obtenidas f veces y

$$f_r(n_i) = \frac{f(n_i)}{N}$$

es la frecuencia relativa, igual a la probabilidad $p(n_i)$ de obtener n_i águilas.

Para efectuar la suma conviene fijarnos en que la frecuencia relativa es la misma para dos valores de n_i , o sea que

$$f_r(0) = f_r(25), f_r(1) = f_r(24), \dots, f_r(12) = f_r(13),$$

hecho que se puede aprovechar para sumar sacando como factor común a las frecuencias iguales:

$$\begin{aligned} \langle n \rangle &= 0 \times f_r(0) + 1 \times f_r(1) + 2f_r(2) + \dots + 24f_r(24) + 25f_r(25) \\ &= (0 + 25)f_r(0) + (1 + 24)f_r(1) + (2 + 23)f_r(2) + \dots + \\ &\quad (12 + 13)f_r(12) \end{aligned}$$

Sin embargo, ahora 25 es factor común de todos los términos:

$$\langle n \rangle = 25[f_r(0) + f_r(1) + f_r(2) + \dots + f_r(12)]$$

pero:

$$f_r(0) + f_r(1) + f_r(2) + \dots + f_r(12) = \frac{1}{2} = f_r(13) + f_r(14) + \dots + f_r(25)$$

ya que la suma de todas las frecuencias relativas o probabilidades es 1.

Por lo tanto,

$$\langle n \rangle = \frac{25}{2} = 12.5,$$

resultado que podíamos haber obtenido al considerar que si para cada moneda la probabilidad es p , para N moneda será Np .

Sustituyendo: $\langle n \rangle = Np = 12.5$.

Para calcular la desviación normal será necesario hacer uso de **cálculo diferencial**, del modo siguiente:

Sea

$$\begin{aligned} g(z) &= (q + zp)^N = q^N + zNq^{N-1}p + z^2q^{N-2}p^2 + \dots + z^Np^N \\ &= f_r(0) + zf_r(1) + z^2f_r(2) + \dots + z^Nf_r(N) \\ &= \sum \frac{N!(z^np^n)}{n!(N-n)!} \times q^{N-n} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{dg}{dz}\right) = \sum \frac{nN!z^{n-1}p^nq^{N-n}}{n!(N-n)!} = N(q + zp)^{N-1} \times p$$

donde derivamos la última y la primera igualdades.

Para $z = 1$,

$$Np(q + p)^{N-1} = \sum \frac{nN!p^nq^{N-n}}{n!(N-n)!} = \sum n f_r(n) = \langle n \rangle$$

en donde se sustituye $f_r(n) = \frac{N!p^nq^{N-n}}{n!(N-n)!}$ y como

$$(q + p) = 1; \quad (q + p)^{N-1} = 1$$

entonces,

$$\langle n \rangle = Np, \text{ resultado que ya sabíamos.}$$

Calculando la 2ª derivada:

$$\begin{aligned} \frac{d^2g}{dz^2} &= \frac{d}{dz} \left(\frac{dg}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\sum \frac{nN!z^{n-1}p^nq^{N-n}}{n!(N-n)!} \right) = \sum \frac{n(n-1)N!z^{n-2}p^nq^{N-n}}{n!(N-n)!} \\ &= \frac{d}{dz} [Np(q + zp)^{N-1}] = Np(N-1)(q + zp)^{N-2} \times p \end{aligned}$$

Para $z = 1$,

$$\begin{aligned} \frac{d^2g}{dz^2} &= \sum \frac{n(n-1)N!p^nq^{N-n}}{n!(N-n)!} = \sum n(n-1)f_r(n) = \langle n(n-1) \rangle \\ &= N(N-1)p^2 \end{aligned}$$

y como:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\sum (n - \langle n \rangle)^2}{M} = \sum (n - \langle n \rangle)^2 f_r(n) = \langle (n - \langle n \rangle)^2 \rangle \\ &= \langle n^2 - 2n\langle n \rangle + \langle n \rangle^2 \rangle \end{aligned}$$

aprovechando que el tomar promedio, es distributivo (ya que es una suma):

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \langle n^2 \rangle - \langle (2n\langle n \rangle) \rangle + \langle (\langle n \rangle^2) \rangle \\ &= \langle n^2 \rangle - 2\langle n \rangle \langle n \rangle + \langle n \rangle^2 \\ &= \langle n^2 \rangle - (\langle n \rangle)^2 = \langle (n(n-1) + n) \rangle - (\langle n \rangle)^2 \\ &= \langle n(n-1) \rangle + \langle n \rangle - (\langle n \rangle)^2 \end{aligned}$$

Sustituyendo:

$$\langle n(n-1) \rangle = N(N-1)p^2$$

y $\langle n \rangle = Np$

$$\sigma^2 = N(N-1)p^2 + Np - N^2p^2 = Np(1-p) = Npq; \sigma = \sqrt{Npq}$$

Si $N = 25$ y $q = p = \frac{1}{2} = \sqrt{\frac{25}{4}} = \sqrt{6.25} = 2.5$

C. DISTRIBUCION NORMAL O DE GAUSS

Hemos visto que la distribución binomial sirve para representar los posibles resultados de N causas de error, del mismo tamaño y con igual posibilidad de ser positivas o negativas. Se puede demostrar (ver **Baird**)⁹ que si el número N de causas de error crece, y la magnitud de su efecto decrece, la distribución de valores se hace casi continua. En el límite, cuando N tiende a infinito, se obtiene una distribución continua en la que se supone que cada observación es el resultado de gran número de errores independientes, pero discretos y muy pequeños, aproximadamente iguales en magnitud y con igual probabilidad de ser positivos o negativos. La curva de probabilidad correspondiente se conoce como distribución normal de error o de Gauss y está dada por:

$$P(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \exp[-(x - \langle x \rangle)^2 / 2\sigma^2] \quad (C.1)$$

en donde $\langle x \rangle$ es su valor promedio y σ la desviación normal. $P(x)$ representa la probabilidad de que una medida se encuentre en el intervalo x y $(x + dx)$. La figura C.1 muestra dos "gaussianas" calculadas para diferentes valores del promedio y de la desviación normal.

Veremos ahora que la ecuación anterior cumple las propiedades necesarias para poder representar una posible distribución de medidas. La primera condición que le pedimos es que la suma de todas las probabilidades de los eventos posibles sea uno, es decir: para una distribución discreta:

$$\sum f_1(x) = \sum P(x) = 1 \quad (C.2)$$

Para una continua:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx = 1 \quad (C.3)$$

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp - \left(\frac{(x - \langle x \rangle)^2}{2\sigma^2} \right) \cdot dx = 1 \quad (C.4)$$

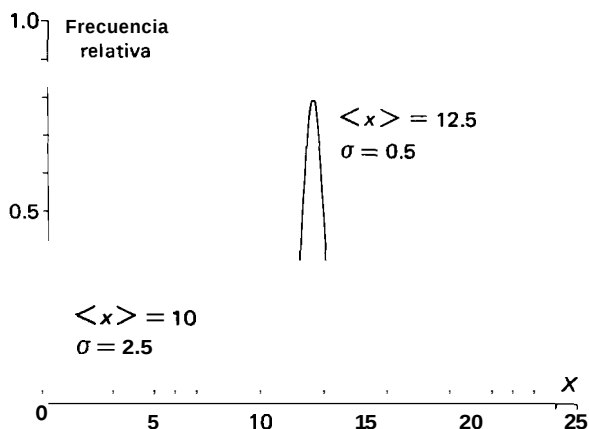


Fig. C.1. Distribución normal de error, calculada para diferentes promedios y desviaciones normales. El área bajo cada curva vale 1.

Comenzaremos por hacer un cambio de variable:

$$y = \frac{x - \langle x \rangle}{\sqrt{2} \sigma} \quad dy = \frac{dx}{\sqrt{2} \sigma} \quad (\text{C.5})$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) \cdot \sqrt{2} \sigma dy = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(y^2) dy \quad (\text{C.6})$$

Sea

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) dy = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2) dx \quad (\text{C.7})$$

ya que la variable de integración desaparece al efectuar la integral definida:

$$U^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) dy \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-(x^2 + y^2)] dx dy \quad (\text{C.8})$$

Cambiando a coordenadas polares, $x^2 + y^2 = r^2$

$$\text{y } ds = dx dy = r dr d\theta$$

$$U^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp(-r^2) r dr d\theta = 2\pi \int_0^{\infty} \exp(-r^2) r dr = 2\pi \left[\frac{1}{2} \exp(-r^2) \right]_0^{\infty}$$

$$U^2 = \pi \quad ; \quad U = \sqrt{\pi}$$

Sustituyendo en (C.6):

$$I = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot U = 1$$

lo que nos confirma que la suma de todas las probabilidades es uno.

El valor promedio se calcula como:

en el caso discreto $\langle x \rangle = \sum \frac{x_i}{N} = \sum x_i f_i = \sum x_i p_i$

en el caso continuo, $\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x P(x) dx$

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[\frac{-(x - \langle x \rangle)^2}{2\sigma^2} \right] \cdot dx$$

Cambiando la variable:

$$y = \frac{x - \langle x \rangle}{\sqrt{2}\sigma}$$

$$\langle x \rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int (y\sqrt{2}\sigma + \langle x \rangle) \cdot \exp(-y^2) \sqrt{2}\sigma dy$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left[2\sigma^2 \int_{-\infty}^{\infty} y \exp(-y^2) dy + \langle x \rangle \sqrt{2}\sigma \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) dy \right]$$

$$\langle x \rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left[2\sigma^2 \left[-\frac{\exp(-y^2)}{2} \right]_{-\infty}^{\infty} + \langle x \rangle \sqrt{2}\sigma U \right]$$

$$\therefore \langle x \rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left[2\sigma^2 (-0 + 0) + \langle x \rangle \sqrt{2}\sigma \sqrt{\pi} \right] = \langle x \rangle$$

Confirmando que $\langle x \rangle$ representa el promedio de la distribución. **Análo-**gamente se puede demostrar que σ es la desviación normal de la distribución

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \langle x \rangle)^2 P(x) dx}$$

Finalmente la figura C.2 muestra la distribución binomial de 25 causas de errores con igual probabilidad y tamaño (distribución discreta de águilas y soles) y la distribución gaussiana con el mismo promedio y desviación normal. Se puede ver que son muy parecidas para los puntos correspondientes. La distribución normal queda completamente caracterizada por dos parámetros: el valor promedio y la desviación normal o típica.

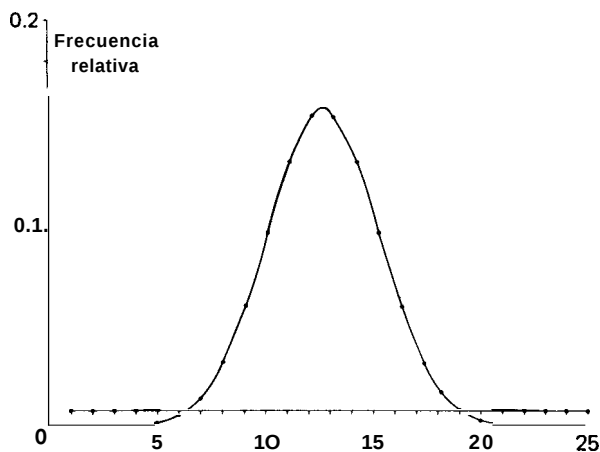


Fig. C.2. Los puntos (+) muestran la frecuencia relativa de la distribución binomial para $p = q = 0.5$ y $N = 25$. La curva continua es la distribución normal de error o gaussiana para $\langle x \rangle = 12.5$ y $\sigma = 2.5$.

D. PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRES

Supongamos que se miden directamente los valores de las variables a , b , c , y obtenemos los resultados siguientes:

$$a = \langle a \rangle \pm s_a$$

$$b = \langle b \rangle \pm s_b$$

$$c = \langle c \rangle \pm s_c$$

valores que usaremos para calcular la variable z , usaremos la relación $z = f(a, b, c)$, que define el valor de z , conocidos a , b , c . Esto es lo que se conoce como una medida indirecta de z . Podría calcularse $z_{i,j,k}$ para cada terna de valores a_i , b_j , c_k medidas originalmente; y calcular $\langle z \rangle$ y s_z utilizando las definiciones usuales.

Un procedimiento más rápido, aplicable sólo si z es continua y con derivadas continuas, utiliza la siguiente propiedad:

$$\langle z \rangle = f(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle)$$

Válida si:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial a^2} S_a^2 \ll \frac{\partial z}{\partial a} S_a; \quad \frac{\partial^2 z}{\partial b^2} S_b^2 \ll \frac{\partial z}{\partial b} S_b \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial c^2} S_c^2 \ll \frac{\partial z}{\partial c} S_c$$

condición que equivale a despreciar el 3^{er} término en la expansión en serie de Taylor, o que se puede aproximar a z por funciones lineales para variación de una sola variable, como muestra la figura D.1.

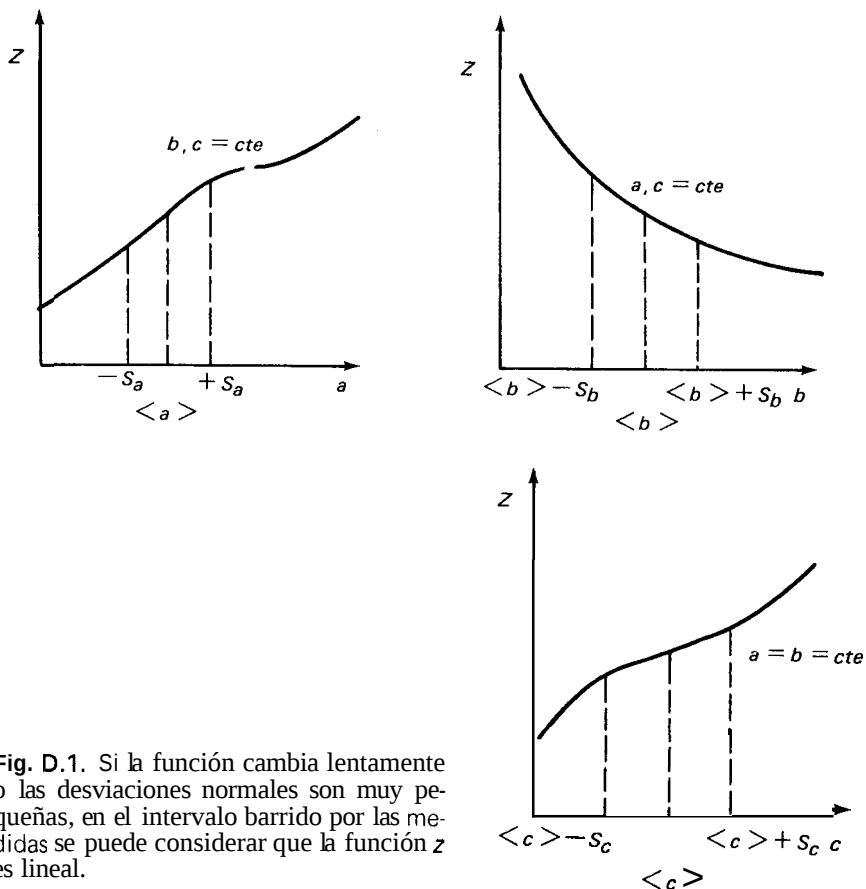


Fig. D.1. Si la función cambia lentamente o las desviaciones normales son muy pequeñas, en el intervalo barrido por las medidas se puede considerar que la función z es lineal.

Consideremos la diferencial de la función z

$$dz = \frac{\partial z}{\partial a} da + \frac{\partial z}{\partial b} db + \frac{\partial z}{\partial c} dc$$

se pueden aproximar las diferenciales como perturbaciones alrededor del promedio correspondiente, si las variaciones

$$dz \approx \Delta z \quad da \approx \Delta a \quad db \approx \Delta b \quad dc \approx \Delta c$$

son pequeñas.
Entonces

$$\Delta z \approx \left(\frac{\partial z}{\partial a} \right) \Delta a + \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right) \Delta b + \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right) \Delta c$$

en donde Δz representa la variación en z , debida a los cambios Δa , Δb y Δc .

Si se repiten las medidas de a , b y c , n veces, para cada una puede calcularse Δa , Δb , Δc con respecto a sus valores promedio y calcular Δz . Puede entonces estimarse la desviación normal de z (s_z), utilizando

$$s_z = \sqrt{\frac{\sum \Delta z^2}{n-1}}$$

o sea

$$\begin{aligned} s_z^2 &= \frac{1}{n-1} \sum \left[\left(\frac{\partial z}{\partial a} \right) \Delta a + \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right) \Delta b + \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right) \Delta c \right]^2 \\ &= \frac{1}{n-1} \sum \left[\left(\frac{\partial z}{\partial a} \right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right)^2 (\Delta b)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right)^2 (\Delta c)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \left(\frac{\partial z}{\partial a} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right) \Delta a \Delta b + 2 \left(\frac{\partial z}{\partial a} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right) \Delta a \Delta c + 2 \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right) \Delta b \Delta c \right] \end{aligned}$$

Si se quita el factor común $\left(\frac{1}{n-1} \right) \sum$, y obtiene:

$$\begin{aligned} s_z^2 &= \left[\left(\frac{\partial z}{\partial a} \right)^2 \frac{\sum (\Delta a)^2}{n-1} + \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right)^2 \frac{\sum (\Delta b)^2}{n-1} + \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right)^2 \frac{\sum (\Delta c)^2}{n-1} + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial z}{\partial a} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right) \frac{\sum \Delta a \Delta b}{n-1} + \left(\frac{\partial z}{\partial a} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right) \frac{\sum \Delta a \Delta c}{n-1} + \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right) \frac{\sum \Delta b \Delta c}{n-1} \right] \end{aligned}$$

Pero: $\frac{\sum (\Delta a)^2}{n-1} = s_a^2$; $\frac{\sum (\Delta b)^2}{n-1} = s_b^2$; $\frac{\sum (\Delta c)^2}{n-1} = s_c^2$ por definición, y

$\sum \Delta a \Delta b = 0$; $\sum \Delta a \Delta c = 0$; $\sum \Delta b \Delta c = 0$ si las perturbaciones que originan los cambios en a , b , c son independientes; si no es así, mediante su relación se puede reducir el número de variables hasta quedar solamente las independientes.

De modo que

$$\boxed{s_z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial a} \right)^2 s_a^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial b} \right)^2 s_b^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial c} \right)^2 s_c^2} \quad (D.1)$$

nos relaciona la desviación normal de una variable medida indirectamente con las desviaciones de las variables medidas directamente.

Aplicémosla en casos particulares.

Si $z = a + b - c$, entonces

$$\left(\frac{\partial z}{\partial a}\right) = 1 \quad ; \quad \left(\frac{\partial z}{\partial b}\right) = 1 \quad ; \quad \left(\frac{\partial z}{\partial c}\right) = -1$$

sustituyendo estos valores en la ecuación (D.1), se obtiene:

$$s_z^2 = s_a^2 + s_b^2 + s_c^2$$

Si $z = \frac{ab}{c}$ entonces: $\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{b}{c}$; $\frac{\partial z}{\partial b} = \frac{a}{c}$; $\frac{\partial z}{\partial c} = -\frac{ab}{c^2}$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (D.1), queda:

$$s_z^2 = \frac{b^2}{c^2} s_a^2 + \frac{a^2}{c^2} s_b^2 + \frac{a^2 b^2}{c^4} s_c^2$$

dividiendo entre: $z^2 = \frac{a^2 b^2}{c^2}$

$$\left(\frac{s_z}{z}\right)^2 = \left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{c}\right)^2$$

Si $z = \frac{a^l b^m}{c^n}$; entonces $\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{l a^{l-1} b^m}{c^n}$

$$\frac{\partial z}{\partial b} = \frac{m a^l b^{m-1}}{c^n} \quad ; \quad \frac{\partial z}{\partial c} = -\frac{n a^l b^m}{c^{n+1}}$$

Sustituyendo estos valores en (D.1), se tiene:

$$s_z^2 = l^2 \left(\frac{a^{l-1} b^m}{c^n}\right)^2 s_a^2 + m^2 \left(\frac{a^l b^{m-1}}{c^n}\right)^2 s_b^2 + n^2 \left(\frac{a^l b^m}{c^{n+1}}\right)^2 s_c^2$$

dividiendo entre $z^2 = \left(\frac{a^l b^m}{c^n}\right)^2$

$$\left(\frac{s_z}{z}\right)^2 = l^2 \left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + m^2 \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + n^2 \left(\frac{s_c}{c}\right)^2$$

Si $z = e^x$, entonces: $\frac{\partial z}{\partial a} = e^x$; $\left(\frac{\partial z}{\partial b}\right) = \left(\frac{\partial z}{\partial c}\right) = 0$

Sustituyendo dichos valores en (D.1), obtenemos:

$$s_z^2 = (e^a)^2 s_a^2$$

Dividiendo entre $z^2 = (e^a)^2$

$$\left(\frac{s_z}{z} \right)^2 = s_a^2$$

Al sacar raíz cuadrada en ambos términos, se obtiene:

$$\boxed{\frac{s_z}{z} = s_a}$$

Si $z = \log a$, entonces: $\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{1}{a}$, $\frac{\partial z}{\partial b} - \frac{\partial z}{\partial c} = 0$

Al sustituir estos valores en (D.1), queda:

$$s_z^2 = \left(\frac{s_a}{a} \right)^2$$

Pero al sacar raíz cuadrada, queda finalmente:

$$\boxed{s_z = \frac{s_a}{a}}$$

E. MÍNIMOS CUADRADOS

Es frecuente al realizar un experimento, obtener un conjunto de parejas de números (x , y) por los cuales es necesario pasar no sólo una recta, sino ajustar la mejor recta que supondremos de antemano cumple la ecuación $y = b + mx$. Esto reduce el problema al calcular los valores de m y b en función de los valores obtenidos experimentalmente.

Para simplificar el problema, consideremos que los valores de x son exactos y los valores de y tienen incertidumbre. La figura E.1 muestra la recta ajustada usando el criterio de mínimos cuadrados. Llamemos d_i a la distancia a lo largo del eje Y , del punto (x_i, y_i) a la recta; si la recta está ajustada de acuerdo al criterio de mínimos cuadrados, se cumple la condición $\sum_{i=1}^n d_i^2$ es un mínimo, o sea que hace mínima la "dispersión" de

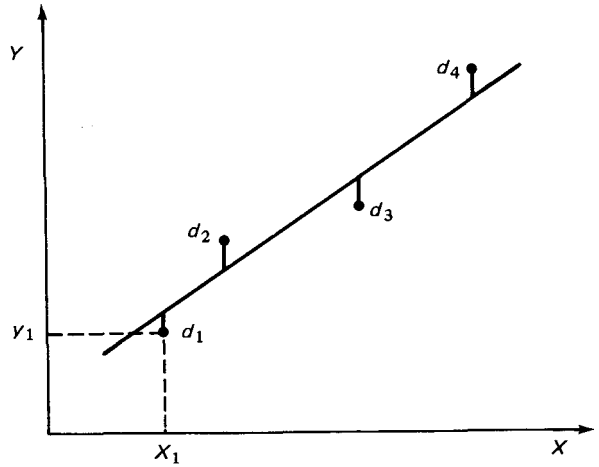


Fig. E.1. Distancias verticales de los puntos medidos a la línea recta. Si la suma de estas distancias es un mínimo, esa es la mejor recta. Se considera que la incertidumbre en x es mucho menor que en y .

los puntos alrededor de la recta. Expresando la condición en términos de m y b , tenemos:

$$d_i = y_i - y_R \quad (\text{E.1})$$

pero

$$y_R = mx_i + b \quad (\text{E.2})$$

Al sustituir (E.2) en (E.1), tenemos:

$$d_i = y_i - (mx_i + b)$$

Elevando al cuadrado ambos términos, se tiene:

$$\begin{aligned} d_i^2 &= y_i^2 - 2(mx_i + b)y_i + m^2 x_i^2 + 2bm x_i + b^2 \\ &= y_i^2 - 2mx_i y_i - 2by_i + m^2 x_i^2 + 2bm x_i + b^2 \end{aligned}$$

La suma s de los cuadrados de las desviaciones es: $s = \sum d_i^2$, que debe ser un mínimo y depende de m y b , por lo que se cumple: $ds = \frac{\partial s}{\partial m} dm + \frac{\partial s}{\partial b} db$; $ds = 0$ en el mínimo; y como m y b son independientes, entonces se requiere que:

$$\frac{\partial s}{\partial m} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial s}{\partial b} = 0 \quad \text{simultáneamente.}$$

Ahora:

$$\frac{\partial s}{\partial m} = \sum 2(-x_i y_i + m x_i^2 + b x_i) = 0 = m \sum x_i^2 - \sum x_i y_i + b \sum x_i \quad (\text{E.3})$$

$$\frac{\partial s}{\partial b} = \sum (-2y_i + 2m x_i + 2b) = 0 = m \sum x_i + b n - \sum y_i \quad (\text{E.4})$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones simultáneas (E.3) y (E.4) en m y b nos proporciona los siguientes valores:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

donde n es el número de puntos experimentales

$$b = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

Las desviaciones normales de m y b se pueden calcular a partir de los puntos, mediante las ecuaciones s_y , s_m , s_b ,

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-2}}$$

$$s_m = s_y \sqrt{\frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

$$s_b = s_y \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

Estas ecuaciones están demostradas en el libro de **Baird**.⁹

La aplicación del método de mínimos cuadrados **requiere de la construcción** de una tabla como la siguiente:

x	y	xy	x^2
x_1	y_1	$x_1 y_1$	x_1^2
x_2	y_2	$x_2 y_2$	x_2^2
$\sum x_i$	$\sum y_i$	$\sum x_i y_i$	$\sum x_i^2$

Estas cuatro sumas son los factores necesarios para calcular m y b . Los valores de m y b obtenidos mediante este procedimiento deben ser muy cercanos a los obtenidos por métodos gráficos (pendiente y ordenada al origen de la recta ajustada visualmente).

Finalmente, se calcula s_y con ayuda de la siguiente tabla:

x	y	d	d^2
x_1	y_1	$y_1 - mx_1 - b$	$(y_1 - mx_1 - b)^2$
			$(y_2 - mx_2 - b)^2$
			$\sum d_i^2$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum d_i}{n - 2}}$$

Referencias bibliográficas

1. The Open University, *La Ciencia: sus orígenes, escalas y limitaciones*, McGraw-Hill, México, 1975.
2. Ackoff, *Scientific Method optimizing applied research decisions*, Wiley, Nueva York, 1962.
3. Rosenblueth, *El Método Científico*, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, México, 1971.
4. Brandwein, Stollberg y Burnett, *Biología: La vida, sus formas y sus cambios*, Pub. Cultural, México, 1976, pág. 511.
5. Rosado, Amador, Acosta, Zavala y Mendoza, *Biología tres*, Trillas, México. 1978.
6. Félix, Oyarzábal y Velazco, *Lecciones Elementales de Física*, CECSA, México, 1974.
7. Bunge, *La investigación Científica*, Ariel, Barcelona, 1969.
8. Eli de Gortari, *La Metodología: una discusión*, Univ. Aut. de Nuevo León, México, 1976.
9. Baird, *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*, Prentice Hall, Nueva York, 1962.
10. Preti, Newton, *Hombres de la Historia*, Centro Ed. de América Latina, núm. 62, Buenos Aires, 1969.
11. Gee, *Social Science Research Methods*, Appleton-Century-Crofts, Nueva York, 1939.
12. Arana, *Método Experimental para principiantes*, Mortiz, México, 1975.

13. Tanur, *Estadística: Una guía hacia lo desconocido*, (en prensa), Trillas, México.
14. Squires, *Física práctica*, McGraw-Hill, México, 1972.
15. Boys, *Pompas de jabón*, EUDEBA, Buenos Aires, 1964.
16. Rosas y Riveros, *Método Científico Experimental*, Colegio de Ciencias y Humanidades, UNAM, México, 1980.
17. American Institute of Physics, *Style Manual*, AIP, Nueva York, 1965.
18. Taton, *Historia general de las ciencias* (vol. III), *La ciencia contemporánea* (vol. I), *El Siglo XIX*, Ed. Destino, Barcelona, 1973.
19. Thumm, *Rontgen's Discovery of X-Rays. The Physics Teacher*, vol. 13, págs. 207-214, 1975.
20. Noyola, *Antología de física*, UNAM, México, 1971. En Magie, *A source book in Physics*, McGraw-Hill, Nueva York, 1935.
21. Bernal, *Science in History* (vol. 2), *The Scientific and Industrial Revolutions*, MIT Press, Cambridge, 1974.
22. Nobel Foundation, *Nobel Lectures-Chemistry*, Elsevier Pub., Amsterdam, 1966.
23. Caminos Abiertos, *Louis Pasteur*, Ed. Hernando, Madrid, 1977.
24. De Kruif, *Los Cazadores de Microbios*, Ed. Época, México, 1975.
25. Eaton, De Geer y Freser, *The solar constant: a take home lab*, *The Physics Teacher*, vol. 15, pág. 172, 1977.
26. Caniato, *Um projeto brasileiro para o ensino de Física*, UNICAMP, Sao Paulo, 1974.
27. Meinel y Meinel, *Applied Solar Energy*, Addison-Wesley, Reading, 1976, pág. 41.
28. Walter y McBee, *Microbiología General*, Cía. Editorial Continental, México. 1965.
29. Díaz, García, Campo y Valdez, *Rev. Mex. de Física*, vol. 26, pág. 525, 1980.

Índice analítico

- Ácido láctico, obtención, 79-80
- Amoniaco
 - obtención, 75
 - síntesis del, 74-78
- Análisis de resultados, 65-67
 - componentes, 65
- Análisis gráfico, 48, 50-52, 104-109
- Arquímedes, **43, 44**
- Binomio de Newton, 143
- Bunge, M., clasificación de las ciencias, 25
- Campo, J., 133
- Caniato, R., 115
- Ciencia
 - características, 18
 - clasificación, 24-26
 - de Bunge, 25
 - de Rosenblueth, 25
 - definiciones, 17-18, 141
 - finalidad, 42
 - metodología de la, 25
 - origen, 13-15
 - y filosofía, 24, 141
 - y hecho, 18
 - y técnica, 42-45
 - y tecnología, 16
- Ciencias
 - exactas, 25
 - experimentales, 55
 - factuales**, 25, 55
 - formales, 25
 - humanas, 25
 - naturales, 25, 47, 55
 - sociales, 46-47
- Comunicación
 - el lenguaje como forma de, 14-15
 - formas de, 14-15
 - comunes, 14
 - exclusivas del ser humano, 14-15
- Conceptos
 - cualitativos, 85
 - cuantitativos, 85
- Conocimiento científico
 - definición, 19
 - y hecho, 18-19
- Constante solar, 114-115
 - valores de la, 115-116
- Cosmología, 141-142c
- Curva
 - de Gauss. Véase Curva normal de error
 - normal de error, 93
 - teórica, 105
- Datos, **análisis** estadístico, 88-89
- De Gortari, Eli, 25 (citado)
- De la Tour, Cagniard, 79
- Deducción, 20
 - de consecuencias de una hipótesis, 49
- Desalación, 114
- Descartes, René, 37, 38
- Destilación, 114
- Desviación
 - media, 95
 - e incertidumbre, 95
 - promedio. Véase Desviación media típica o normal, 95-96, 149
 - del promedio, 97-98, 103
 - e incertidumbre, 96
 - obtención, 97

- Díaz, A., 133
- Diseño experimental, 62-64, 70
características, 63
- Distribución
binomial, 142-147
continua, 147
de Gauss. Véase Distribución **normal**
de error
discreta, 147
normal de error, 96-97, 147-150
características, 149
- Ecuación empírica, 65
- Einstein, A., 33, 34, 41, 47, 141
- Energía solar, 113-128
- Epistemología, 141-142c
- Equilibrio térmico, 117
- Error
absoluto límite, 87
aleatorio, 87-88
curva normal de, 93
diferencia entre incertidumbre y, 27
estimado, 87
experimental, 47, 86
determinación, 94-97
propagación de, 98
sistemático, 87-88
- Estadística. Véase Método estadístico
- Estética, 142c
- Eter, 67, 74
- Ética, 142c
- Experimento
acuerdo entre teoría y, 32-34, 98, 105
de Michelson-Morley, 41
de prueba, finalidad, 64
definición, 49
diseño del, 62-64
ideal, 49
objetivo, 55
realización del, 64-65
- Extrapolación, 32, 51
- Fermentación, procesos de la, 78-81
- Filosofía
clasificación, 142c
definición, 141
y ciencia, 25, 141
- Fluorescencia, 72
- Fotones, 67
- Frecuencia relativa, cálculo de la, 92
- Función exponencial, 95-96
- Galileo, 37, 40, 43, 44, 49
- García, J. A., 133
- Gauss
curva de. Véase Curva normal de error
distribución de. Véase Distribución normal de error
- Generación espontánea, teorías de la, 80-81
- Gravitación universal, ley de la, 20, 22-23.47
- Haber, Fritz, 75-78
- Habilidades (del hombre), 13
para pensar, 13-14
manuales, 15
para hablar, 14
- Hecho
definición, 18
y ciencia, 18
y conocimiento científico, 18-19
- Hipótesis, 19-20
confiabilidad, 47
consecuencias, 48, 58
deducción de, 49
de trabajo, 58-62
definición, 19, 58
reglas para aceptar, rechazar o conjeturar, 67-68
verificación, 61
y ley, 33
- Histograma, 90
utilidad, 92
- Huyghens, modelo ondulatorio de la luz de, 67
- Incertidumbre(s)**, 27, 29, 96
combinación de, 98-103
determinación, 31
diferencia entre error e, 27
factores de los que depende la, 30
implicaciones, 32
intervalo de, 86, 87
propagación de, 150-154
uso, 32
y desviación media, 95
y desviación normal, 96
y probabilidad, 89
- Inducción, 19, 40, 47
- Informe científico
elaboración, 68-69
estructura, 68-69
- Interpolación**, 32, 51, 104

- Interpretación tentativa de resultados, 64
- Kepler, Juan, 19, **24**, **34**, 47
- Leche búlgara, obtención, 128-132
- Lenguaje
 - como forma de comunicación, **14-15**
 - matemático, formulación de leyes en, 22-23
 - tipos de, 14-15
 - comunes, 14
 - exclusivos del ser humano, 14-15
- Ley, 20-23, **32**
 - científica, 20
 - comprobación, 33
 - definición, 20
 - e hipótesis, 33
 - en lenguaje matemático, 22-23
 - reglas para aceptar, rechazar o conjeturar, 67-68
 - términos de una, 23
- Ley de la gravitación universal de Newton, 20, 22-23, **41**, 47
- Leyes de la herencia de Mendel, 20, 21f
- Límite de confianza, 87
- Lógica, 141
 - validez, 40
- Matemáticas y ciencia, 22
- Máximo error posible, 30, 87, 102, 103
 - definición, 86
- Mecánica clásica, 41, 141
- Mediana, 93
 - relación entre promedio, moda y, 94f
- Medición de variables, 26-27
- Meinel, A., 116
- Meinel, M., 116
- Mendel, leyes de la herencia de, 20 21f
- Metafísica, 141-**142c**
- Método
 - de casos, 45-46
 - de los **mínimos** cuadrados, 109, 154-157
 - deductivo, 48-49
 - estadístico, 46, 89
 - experimental, 49-50, 55
 - reglas, 56-71
 - inductivo, 47-48
 - reglas del, 38-39
- Método científico, 50
 - clasificación, 45
 - definición, 37
 - postulados, 39-41
 - reglas, 42
- Metodología, 141-**142c**
 - de la ciencia, 25
- Michelson-Morley, experimento de, 41
- Mínimos** cuadrados, método de los, 109, 154-157
- Moda, 93
 - relación entre promedio, mediana y, 94f
- Modelo
 - corpúscular de la luz, 67
 - de onda-corpúsculo de la luz de Planck, 67
 - definición, 24
 - formal, 24
 - material, 24
 - ondulatorio de la luz de Huyghens, 67
 - reglas para aceptar, rechazar o conjeturar un, 67-68
- Newton, Isaac, 34, 37, 47, 67
 - binomio de, 143
 - ley de la gravitación universal de, 20, 22-23, 47
 - reglas del método de, 38-39
- Observación
 - definición, 49
 - en el método experimental, 50
- Onda-corpúsculo de la luz, modelo de, 67
- Ontología, 141-**142c**
- Oxido nítrico, obtención, 76
- Pasteur, Louis, 78-81, 128
- Pasteurización, 80
- Planck, modelo de onda-corpúsculo de la luz de, 67
- Plomo, 132
 - soluble, concentración en recipientes de barro, 132-137
- Precisión. Véase Incertidumbre
- Probabilidad, 89
 - e incertidumbre, 89
 - teoría matemática de la, **30**, **46**
- Procedimiento experimental, 62, 69, 88
- Procesos de la fermentación, 78-81
- Promedio, 93
 - desviación normal ~~del~~, 97-98, 103
 - residuo, 95

- relación entre mediana, moda y, 94f
- Propagación
 - de errores, 98
 - de incertidumbres, 150-154
- Puntos experimentales, 65-67
- Putrefacción, 78
- Rayos catódicos, 71
- Rayos X, descubrimiento, 71-74
 - antecedentes, 71-72
 - consecuencias, 73
- Reacción exotérmica, 76
- Reglas del método de Newton, 38-39
- Relatividad, teoría general de la, 33, 34, 41, 141
- Residuo, 94
 - promedio, 95
- Resultados(s), 86
 - de una medida, 85-86
 - exacto, 88
 - preciso, 88
- Rontgen, W., 71-74
- Rosenblueth, A., 18, 39
 - clasificación de las ciencias, 25
- Russell, Bertrand, 33
- Sulfhidración, 134
- Técnica(s)
 - científicas, 45
 - de ajuste gráfico de ecuaciones, 48
 - de laboratorio, 62
 - finalidad, 42
 - y ciencia, 42-45
- Tecnología
 - definición, 16
 - origen, 15-16
 - y ciencia, 16
- Teoría(s)
 - acuerdo entre experimento y, 32-34, 98, 105
 - de la generación espontánea, 80-81
 - de los valores, 141-142c
 - definición, 23, 34
 - general de la relatividad, 33, 34, 41, 141
 - matemática de la probabilidad, 30, 46
 - reglas para aceptar, rechazar o conjeturar, 67-68
- Termodinámica, 85
- Thompson, Benjamín, 43-44
- Trabajo
 - experimental, clasificación, 61
 - hipótesis de, 58-62
- Tratamiento estadístico de datos, 88-89
- Valdez, A., 133
- Valor(es)
 - experimental, 30-31
 - medio. Véase Promedio
 - promedio, 29-30, 87, 149
 - definición, 144
 - desviación normal del, 97-98, 103
 - representativo. Véase Valor promedio
 - teoría de, 141-142c
- Variables, medición de, 26