



UNNOBA

NÚCLEOS

Revista científica

4

ABRIL DE 2017



FORMACIÓN PARA EL DESARROLLO HUMANO

**SÍMIL ENTRE
TRANSICIONES
DE FASE EN FÍSICA
Y COLAPSO
DE ANTIGUAS
CIVILIZACIONES**

JUAN C. FLORES ARAYA

**DESCUBRIENDO
EL UNIVERSO:
LAS PIEZAS
OSCURAS DEL
ROMPECABEZAS
CÓSMICO**

CLAUDIA G. SCÓCCOLA

**ACERCA
DEL ESTUDIO
DE LA RESISTENCIA
DE LOS CUERPOS
MATERIALES**

LUIS J. LIMA

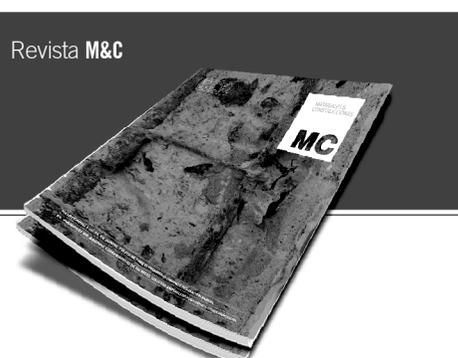
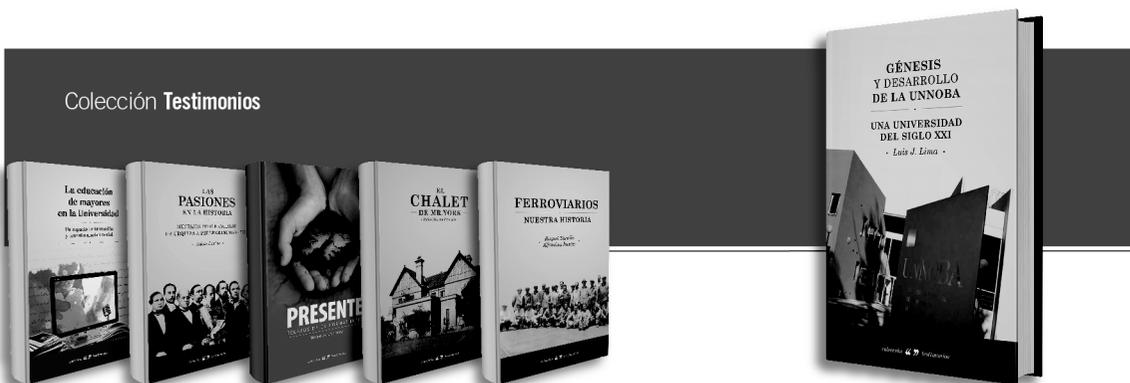
**CÓMO, CUÁNTO, CUÁLES
Y POR QUÉ: UN ANÁLISIS
DE LOS ÚLTIMOS
30 AÑOS DE LA
PALEOMASTOZOOLOGÍA
ARGENTINA**

EDGARDO ORTIZ JAUREGUIZAR;
PAULA POSADAS

El área editorial y de diseño de la Unnoba, tiene como objetivo: contribuir por un lado al mejoramiento de la comunicación interna de la Universidad, y por otro al aporte de las estrategias de vinculación con la comunidad local/regional/nacional e internacional, desde una propuesta de identificación integradora y regional.

En estos últimos años ha desarrollado su actividad en el área editorial conformando dos colecciones. La primera, dirigida principalmente al lector académico y/o especializado que abarca 3 áreas: "Docencia", "Separata", "Investigación"; y una segunda colección más abarcativa, orientada al público en general denominada: "Testimonios".

Este Centro completa su catálogo con dos publicaciones periódicas, la Revista Núcleos de divulgación científica, dirigida por el Dr. Angel Plastino y la Revista M&C orientada al análisis de los materiales y construcción, dirigida por el Ing. Luis Lima.



AUTORIDADES ACADÉMICAS

Rector: Dr. Guillermo R. Tamarit

Vicerrectora: Mg. Danya V. Tavela

Secretaria Académica: Abog. Ma. Florencia Castro

Secretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: Mg. Silvina Sansarriq

Secretario de Extensión Universitaria: Lic. Juan P. Itoiz

Secretario General: Abog. Diego J. Batalla

Secretaria de Asuntos Económico-Financieros: Cdora. Mariela E. García

Secretaria de Cultura: Lic. Laura Durán

Directora Centro de Edición y Diseño: Mg. Ma. de las Mercedes Filpe

Guardasellos: Ing. Luis J. Lima

DIRECTOR DE LA REVISTA

Dr. Ángel L. Plastino

SUMARIO

#4 FORMACIÓN PARA EL DESARROLLO HUMANO

PÁG. 4 — SÍMIL ENTRE TRANSICIONES DE FASE EN FÍSICA Y COLAPSO DE ANTIGUAS CIVILIZACIONES

JUAN C. FLORES ARAYA

PÁG. 12 — DESCUBRIENDO EL UNIVERSO: LAS PIEZAS OSCURAS DEL ROMPECABEZAS CÓSMICO

CLAUDIA G. SCÓCCOLA

PÁG. 21 — ACERCA DEL ESTUDIO DE LA RESISTENCIA DE LOS CUERPOS MATERIALES

LUIS J. LIMA

PÁG. 44 — CÓMO, CUÁNTO, CUÁLES Y POR QUÉ: UN ANÁLISIS DE LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS DE LA PALEOMASTOZOLOGÍA ARGENTINA

EDGARDO ORTIZ JAUREGUIZAR; PAULA POSADAS

Edita



CEDI Centro de Edición y Diseño. UNNOBA
DCV Ma. de las Mercedes Filpe

Callao 289 3.º piso, CP.1022
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina

Diseño y diagramación

CEDI Centro de Edición y Diseño
Coordinador: DCV Cristian Rava,
DCV Claudia Di Paola, DCV Bernabé Díaz

Corrector de estilo: Mariángel Mauri
Fotografía: DG Sofía Ginestra

Impresión

Imaginaria S.A. | Presspoint

Año 3 N.º 4

Abril de 2017

Tirada 500 ejemplares

ISSN 2408-4492

Queda hecho el depósito
que marca la ley 11723

Se invita a potenciales colaboradores
a remitir sus trabajos al CEDI
(cedi@unnoba.edu.ar)

Sede Junín

Libertad 555, CP. 6000
Tel 54 236 4407750
Junín, prov. de Buenos Aires, Argentina

Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP. 2700
Tel 54 2477 409500.
Pergamino, prov. de Buenos Aires, Argentina

www.unnoba.edu.ar

EDITORIAL

Acercamos al amable lector el cuarto número de nuestra revista de divulgación científica *NÚCLEOS*, de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, en el que se tratan asuntos de diversa naturaleza, referidos a distintos campos de la actividad científico-tecnológica, de gran relevancia, con interesante e importante temática.

En la página 4, Juan C. Flores Arraya construye un fascinante símil entre un fenómeno básico de la física, las llamadas transiciones de fase, y un fenómeno histórico-antropológico: el colapso de antiguas civilizaciones.

Pasamos a la astronomía en la página 12. Allí Claudia Scoccola nos habla sobre cómo se construye nuestra actual visión del Universo.

En la página 21, Luis J. Lima nos presenta un tema tecnológico de inmensa importancia: la resistencia de los cuerpos materiales.

Para finalizar, en la página 44 Edgardo Ortiz Jaureguizar y Paula Posadas, en una vena histórico-biológica, nos hablan sobre la paleomastozoología en nuestro país en los últimos treinta años.

Confiamos plenamente en que este abanico de problemáticas tan variadas pueda suscitar el interés de nuestros lectores en esta cuarta entrega.

Dr. Ángel Luis Plastino
Director revista NÚCLEOS

SÍMIL ENTRE TRANSICIONES DE FASE EN FÍSICA Y COLAPSO DE ANTIGUAS CIVILIZACIONES

INTRODUCCIÓN

Existen elementos comunes en el auge y subsecuente colapso de las civilizaciones antiguas. En efecto, los períodos de gestación de las civilizaciones suelen ser usualmente largos, pero el del colapso, en cambio, es relativamente corto. Por otro lado, las causas del colapso pueden ser variadas y, en ocasiones, superponerse unas a otras. También, dichas causas pueden estar relacionadas con fenómenos reiterativos, como por ejemplo una serie de lluvias abundantes o, a veces, únicos, como en el caso de Pompeya y la explosión del volcán Danubio.

Además, podemos separar dos tipos de causas ligadas al colapso de una antigua civilización. La primera, debida a condiciones naturales y la segunda, de carácter antropogénico. Veamos cada una de ellas:

(1) Entre las causas naturales ligadas al colapso de las civilizaciones antiguas podríamos considerar, por ejemplo, las extremas y prolongadas sequías, como en el caso de la civilización tiwanaku (1200 d. C.), los mayas de las tierras bajas (800 d. C.) o los anasazi (1200 d. C.). También pudieron existir otras causas naturales, como terremotos y tsunamis (minoicos, 1400 a. C.), entre otras.

(2) Además, el origen del colapso de las civilizaciones pudo estar vinculado con causas antropogénicas. Ese fue el caso, por ejemplo, de los incas y los aztecas, que estuvieron sujetos a invasiones transcontinentales. Se pueden también mencionar otras causas relacionadas con la excesiva explotación de los recursos naturales, como fue el caso de los rapanui (Isla de Pascua) hacia el 1400 d. C. Otras fuentes de colapso de carácter antropogénico podrían ser las internas ligadas a desigualdades sociales como parece haber sido el caso de la civilización teotihuacana (600 d. C.).

Con todo, es importante hacer notar que en este artículo, como usualmente ocurre con respecto a los problemas arqueológicos, las fechas son estimativas. Por otra parte, haremos siempre referencia a civilizaciones tecnológicas antiguas, es decir, aquellas capaces de construir estructuras arquitectónicas monumentales.

UNA BREVE DESCRIPCIÓN DE TRANSICIONES DE FASE: FERROMAGNETOS

Las propiedades generales de los imanes (ferromagnetos) son bien conocidas. Las brújulas son un ejemplo práctico de esos sistemas físicos.

Cada átomo se comporta como un pequeño magneto. Ese magneto se llama (del inglés) "spin". El estado ferromagnético del hierro y otras sustancias o aleaciones se debe principalmente a la alineación de

los “spins” atómicos (eventualmente moleculares) que lo componen. Si bien es cierto que el concepto de “spin” (debido a W. Pauli) es de origen mecánico-cuántico, se puede pensar toscamente en la analogía con pequeños imanes atómicos o moleculares. Dicho orden ferromagnético, en distintos materiales, se puede romper a distintas temperaturas dependiendo de la sustancia. Estas son las llamadas transiciones de fase (ferromagnéticas).

La teoría microscópica (es decir, en términos de átomos) de las transiciones de fase es, sin duda, una teoría compleja y matemáticamente bastante elaborada. Este nivel de abstracción se corresponde con propiedades topológicas y clases de universalidades relacionadas con aspectos fundamentales de la física. Es un campo fascinante que está sujeto aún a avances tanto matemáticos como físicos. En el presente artículo solo trataremos los antecedentes básicos y una aproximación más simple, llamada fenomenológica, debida esencialmente al físico ruso Lev Landáu.

Existen dos definiciones fundamentales que serán replicadas con la correspondiente analogía en el caso del colapso de civilizaciones antiguas:

(1) **Parámetro de orden.** Corresponde a la magnetización M del ferromagneto. Esta cantidad física está relacionada directamente con el número de magnetos microscópicos (ya mencionados) y es una medida práctica de la intensidad y número de spins microscópicos. En términos prácticos —y básicos— es una medida de la capacidad mayor, o menor, de atraer otro imán.

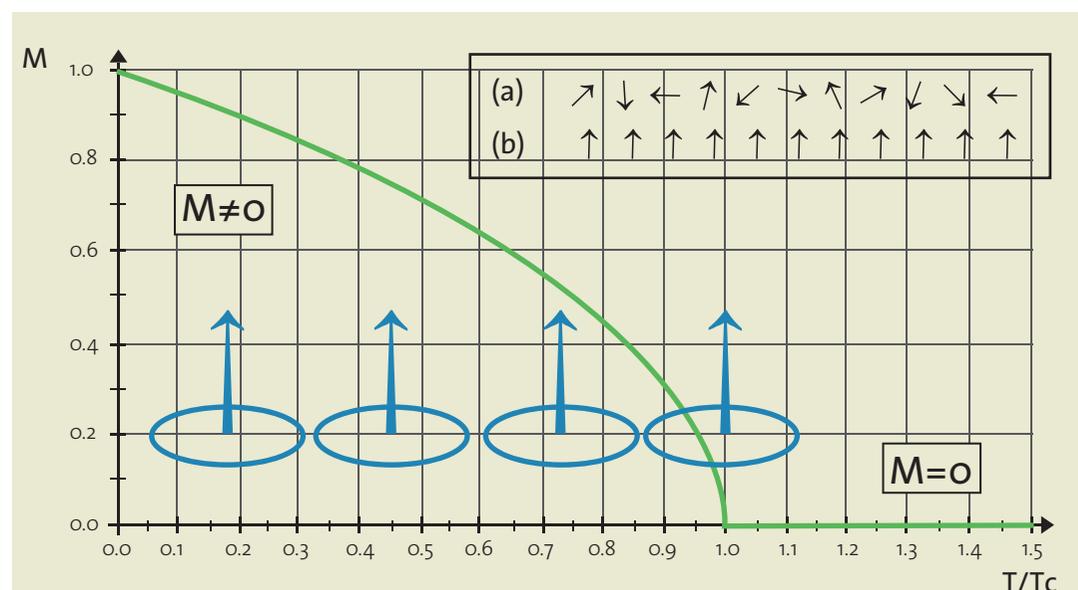
(2) **Parámetro de control.** Es, esencialmente, en el caso de los ferromagnetos, la temperatura T . En efecto, para el hierro a temperaturas mayores que una temperatura especial llamada crítica (o de Curie), denotada por el símbolo T_c , la “imantación” se pierde ($T > T_c$). Opuestamente, para temperaturas menores que la crítica ($T < T_c$), la imantación, una vez producida, se mantiene. Para el hierro la temperatura de Curie es del orden de 770 grados centígrados.

La Figura 1 muestra esquemáticamente la situación descrita. En el eje de las ordenadas se encuentra el parámetro de orden correspondiente a la magnetización M . En el eje de las abscisas se ubica el parámetro de control que corresponde a la temperatura T (relativa a T_c). La curva en verde de la figura describe la magnetización. Claramente para temperaturas mayores que la temperatura crítica o de Curie, la magnetización es cero y el material “no está magnetizado”. Al contrario, para temperaturas T menores que T_c , la magnetización M es distinta de cero ($M \neq 0$).

La idea que subyace, y que será explotada en las secciones relacionadas con el auge y colapso de civilizaciones antiguas, es que variando el parámetro de control se puede tener una fase *ordenada* (con magnetización) u otra fase *desordenada* (sin magnetización). Siempre en la Figura 1, el recuadro superior muestra pictóricamente ambas situaciones. En el caso (a) los spins están desordenados y la magnetización (el promedio del sentido de las flechas) es cero. Opuestamente, el caso (b) muestra magnetización correspondiente a $T < T_c$ (orden). Las figurillas en azul solo hacen referencia a una pictografía que muestra una situación con magnetización.

Figura 1. Gráfico de las soluciones de equilibrio (estables) de la ecuación (1)

Figura 1. Curva de magnetización promedio M (parámetro de orden) en función de la temperatura relativa T/T_c para un ferromagneto. La fase ordenada ($M \neq 0$) corresponde a la región donde la temperatura es menor que la temperatura crítica ($T < T_c$). La fase desordenada concierne a aquella donde el promedio de la magnetización es cero (ver recuadro superior) y pertenece a la región donde $T > T_c$. La evolución temporal es modelada por la ecuación (1) y el estado de equilibrio corresponde, justamente, a la gráfica que se muestra aquí.



La dinámica del proceso anterior puede ser descrita por una ecuación de primer orden temporal y no lineal. Esta es una forma usual de modelar físicamente algunos aspectos de la naturaleza. En efecto la ecuación

$$\frac{dM}{dt} = M \left[(T_c - T) - sM^2 \right] \quad [1]$$

describe la dinámica evolutiva y, sobre todo, la situación en el equilibrio cuando $dM/dt=0$. Efectivamente, la curva de la Figura 1 corresponde a la situación de equilibrio estable de la ecuación (1), ya discutida en el párrafo anterior. El parámetro s en la anterior ecuación corresponde al término de saturación, el cual impide crecimientos infinitos en el sistema físico.

En este punto algunas consideraciones de rigor se hacen indispensables. La primera tiene relación con el hecho de que la descripción anterior es fenomenológica y no microscópica. En efecto una descripción microscópica contiene más riqueza (Le Bellac, 1992), por ejemplo, las correlaciones de largo alcance entre spins cerca de la temperatura crítica o la universalidad (exponentes críticos) que no resulta demasiado accesible a través de una descripción como la anterior. Sin embargo, para los propósitos del presente artículo, nos será suficiente la descripción fenomenológica discutida más arriba.

El colapso de antiguas civilizaciones (orden-desorden) presenta una analogía con el caso descrito de transiciones de fase. Para ello, deberemos asumir la correcta equivalencia de los parámetros de orden y de control. Esto será estudiado en la próxima sección.

COLAPSO EN LA ARQUITECTURA MONUMENTAL DE ANTIGUAS CIVILIZACIONES: DEFINICIONES Y ECUACIONES

En esta sección damos a conocer las definiciones de los parámetros usados en el modelo. Además, proponemos una ecuación no lineal que describe el auge y colapso de una antigua civilización tecnológica.

Definiremos como el parámetro de orden justamente el número de construcciones monumentales de una determinada civilización. Esto es, M representa el número total de pirámides, edificios públicos u otros equivalentes:

M es el número de construcciones monumentales

Es importante notar que consideramos solo las megaconstrucciones que corresponden, a nuestro juicio, a la traza de una civilización tecnológica. En este sentido, en este artículo, cuando hablamos de colapso nos referimos a la destrucción, o abatimiento, de estas construcciones monumentales.

La Figura 2 muestra algunos ejemplos de construcciones monumentales de algunas antiguas civilizaciones. Estas imágenes fueron tomadas de internet y corresponden a Teotihuacán (México), Caral (Perú) y a construcciones mayas de las tierras altas (Yucatán, México).

Figura 2. Algunos ejemplos de construcciones monumentales de antiguas civilizaciones

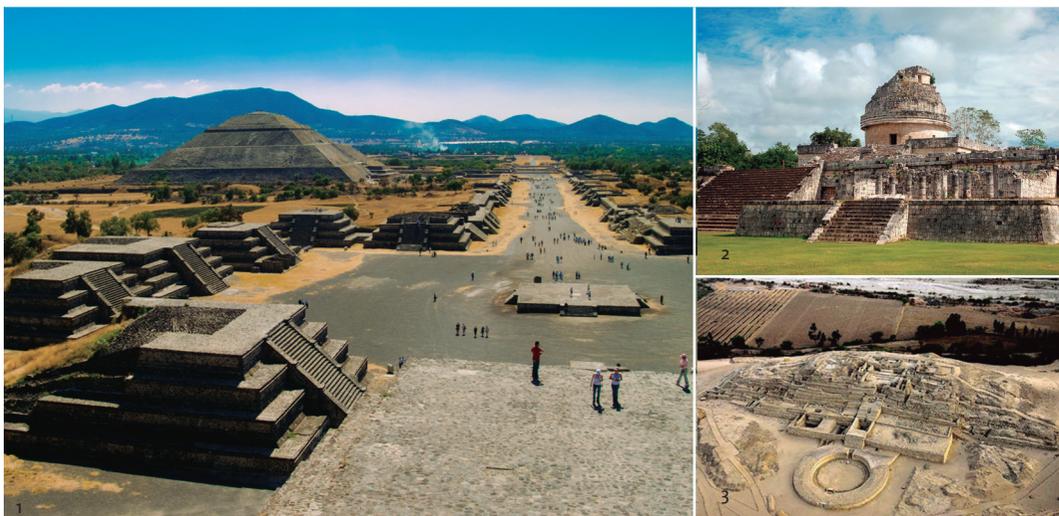


Figura 2. Algunas construcciones monumentales de la antigüedad.

En este trabajo se presume que el número M de construcciones monumentales de una antigua civilización corresponde al parámetro de orden en el símil con las transiciones de fase.

1. Teotihuacán, México. (Foto: Laura Rush).
2. La ciudad de Caral, Perú. (Recuperado de <https://planedia.com/blog/peru-beyond-machu-picchu/>).
3. Observatorio maya de Chichén Itzá, México. (Foto: Gomez Janette [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons).

Además, presumiremos que existe una *tasa de destrucción* r (1/100 años) de la arquitectura monumental. Esto es, por ejemplo, la existencia perjudicial de condiciones climáticas adversas (El Niño (ENSO), terremotos, guerras, entre otras) que destruyen las construcciones. Es decir:

r es la tasa de destrucción de construcciones monumentales

También, parece apropiado suponer que existe una tasa de destrucción máxima r_c , de tal forma que, cuando la tasa de destrucción r es mayor que r_c , entonces la arquitectura no es funcional. Esto es:

cuando $r > r_c$ la arquitectura monumental no se recupera

En otras palabras, bajo condiciones climatológicas (u otras) muy adversas, la civilización colapsa.

Por otro lado, supondremos que existe una tasa K (1/100 años) de intercambio entre los centros urbanizados, eventualmente asentamientos, que definen la civilización. Esta tasa describe el intercambio de productos, nuevas tecnologías, ciencia y nuevos conocimientos, entre otros. Este *parámetro tecnológico* puede, de hecho, ser la suma de varios términos. Entonces:

K es la tasa de intercambio y generación tecnológica

Finalmente, existe un término de saturación β relacionado con la conectividad efectiva entre diferentes centros urbanos (o asentamientos). Este término es una medida del número de caminos (rutas) efectivos que conectan los centros poblacionales que definen la civilización. De hecho, formalmente el inverso $1/\beta$ viene a ser un símil de la temperatura de la sección anterior; pero es solo formal y sin ninguna interpretación mayor. En términos específicos

β cuantifica la conectividad efectiva entre centros (o asentamientos)

Con estas definiciones estamos en condiciones de escribir la ecuación dinámica que puntualiza la evolución (y colapso) de antiguas civilizaciones. En efecto, el número M de construcciones monumentales que definen la traza de una antigua civilización tecnológica puede evolucionar con el tiempo (t) mediante:

$$\frac{dM}{dt} = -rM \left[1 - (2K/r)M + (1/\beta^2)M^2 \right] \quad [2]$$

Nótese que tiene una estructura similar a la ecuación (1) relacionada con transiciones de fase en ferromagnetos. Es decir, una primera derivada temporal y un polinomio de tercer grado para el parámetro de orden (M).

En este artículo no escribiremos explícitamente las soluciones analíticas de equilibrio del sistema descrito por la ecuación (2). Para esto, ver Flores (2015). Sin embargo, mostraremos sus soluciones gráficas y sus respectivas consecuencias. Nótese que $M=0$ es siempre una solución de la ecuación anterior.

SOLUCIONES (GRÁFICAS) DE EQUILIBRIO: AUGE Y COLAPSO DE CIVILIZACIONES TECNOLÓGICAS ANTIGUAS

La Figura 3a muestra las tres soluciones de equilibrio de la ecuación (2) que describen el auge y colapso de una civilización. Esta gráfica muestra el número relativo de construcciones M/β como función de la tasa relativa de destrucción $r/K\beta$. De hecho, es análoga a la gráfica de la Figura 1, que posee menos parámetros; pero es análoga.

Siempre respecto a la Figura 3a, la curva en rojo corresponde a la solución de equilibrio inestable, es decir, las trayectorias evolutivas de una civilización se alejan sistemáticamente de esa curva. Las dos soluciones en verde describen los “atractores”, o sea, donde se tienden a estabilizar las soluciones. La curva verde superior corresponde al desarrollo de la civilización. La curva verde inferior ($M=0$) corresponde a la inexistencia de la civilización. El punto azul es el denominado “tip-point” que describe, en su entorno, el colapso por las variaciones del “parámetro de control” $r/K\beta$.

Figura 3a. Las soluciones de equilibrio $M(r)$ se pueden graficar. Dos estables (verdes) y una inestable (roja)

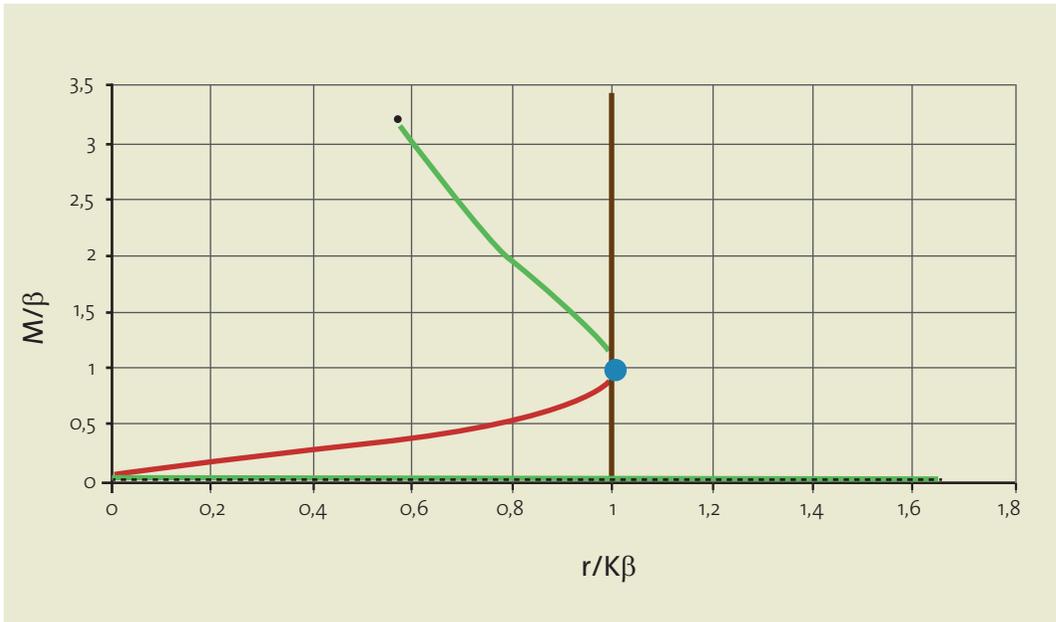


Figura 3a. La ecuación (2), que describe el auge y colapso de una antigua civilización, tiene tres soluciones de equilibrio. La gráfica muestra el número de construcciones monumentales M/β en función del parámetro de destrucción normalizado $r/K\beta$. Las curvas de color verde corresponden a los atractores, es decir, a donde la civilización tiende a llegar. La curva roja es la de equilibrio inestable, o “repulsor”. Es decir, la evolución de una civilización hipotética tiende a alejarse de esta curva.

Más interesante que la anterior gráfica, aunque basada en ella, es la descripción de los tipos de evoluciones ligadas a la ecuación (2). En efecto, la Figura 3b muestra las cuatro fases relacionadas con las soluciones de la mencionada ecuación. Estas cuatro fases son:

- Crecimiento (*growth*)
- Ajuste (*adjust*)
- Abortamiento (*abort*)
- Colapso (*collapse*)

Las tres primeras ocurren cuando $r/K\beta < 1$. La del colapso, relacionada con frágiles condiciones climatológicas o técnicas de mantenimiento, sucede cuando $r/K\beta > 1$. Veamos el detalle de cada una de estas situaciones con la ayuda de la Figura 3b:

Crecimiento. Cualquier civilización que se encuentre con valores de M/β y $r/K\beta$ en la región de crecimiento (flechas verdes en la Figura 3b) crecerá hasta alcanzar el atractor superior. Es decir, la civilización se desarrolla alcanzando un número óptimo de mega construcciones.

Figura 3b. Las soluciones de equilibrio de la ecuación (2), puntos en negrita y sus correspondientes regiones de atracción. Estas regiones definen el colapso o crecimiento de una hipotética civilización

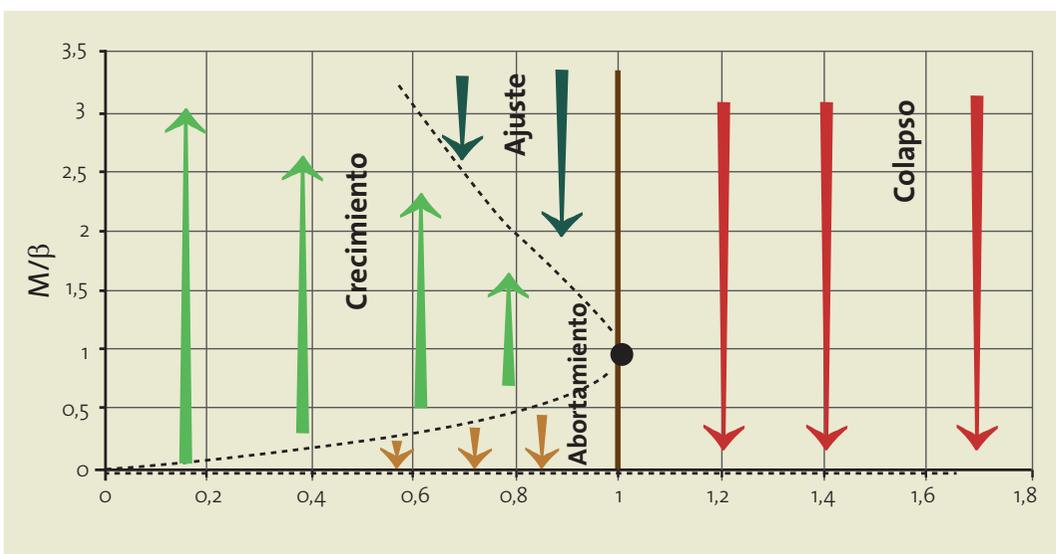


Figura 3b. La solución de equilibrio de la ecuación (2), descrita en la Figura 3a, define cuatro regiones relacionadas con la evolución de una antigua civilización con trazas tecnológicas (construcciones monumentales). Las regiones están descritas en detalle en este artículo y es el principal resultado de estas investigaciones.

Ajuste. Cualquier civilización que esté por encima del punto óptimo (atractor superior en la Figura 3a) caerá a dicho atractor (flechas verde oscuro). Esto puede deberse, por ejemplo, a un ajuste económico debido a un exceso de construcciones y sus costes de reparaciones o mantenimientos.

Abortamiento. Esta región es bastante intrigante y —aparentemente— sustenta la clave de cómo podría eventualmente nacer una civilización. En efecto, cuando el número de construcciones es demasiado pequeño, se cae al atractor $M=0$ (flechas naranjas). Es decir, no existe un efecto multiplicador de construcciones. Sin embargo, si $r/K\beta$ es muy pequeño (óptimas condiciones climatológicas y tecnológicas), cualquier fluctuación en el parámetro M se propaga. Efectivamente, la solución inestable (roja en la Figura 3a) puede ser tan pequeña que es fácil superarla y terminar en la región de crecimiento (a) (de flechas verdes). En estas condiciones climatológicas —y posiblemente técnicas— óptimas, ¿qué podría causar esta fluctuación positiva en el número de construcciones? Es aún una pregunta abierta.

Colapso. Por último, en esta región de valores para los parámetros el número de construcciones disminuye sistemáticamente. Corresponde, por ejemplo, a variaciones climatológicas extremas o, eventualmente, a conflictos relacionados con pérdidas de tecnología y su poder reparador.

Finalmente, notemos que, en el caso del auge de la civilización de Caral, que analizaremos en la próxima sección, una estimación de los parámetros da como resultado $r/K\beta \approx 0,199$, situándolo en un extremo bastante propicio del gráfico de la Figura 3b.

CONDICIONES ÓPTIMAS PARA UN DESARROLLO PIONERO: CIVILIZACIÓN DE CARAL (4500 AÑOS ANTES DEL PRESENTE)

La civilización precerámica de Caral fue, en toda América, la primera con arquitectura monumental (Shady *et al.*, 2001). Más aun, poseía redes de comercio (Shady *et al.*, 2001; Shady, 2006) y conectividad que involucraba una zona del orden de 300 x 400 km², incluyendo la región del valle de Supe (al norte de Lima, Perú). La Figura 4 muestra algunas vistas aéreas de la antigua ciudad de Caral (Google Maps), así como fotografías tomadas por el autor.

Figura 4. El valle de Supe y algunas construcciones monumentales de la antigua civilización Caral. (Google Maps, 2016).

Figura 4. Como aplicación del modelo tipo “transiciones de fase” aquí discutido, se considera la civilización de Caral (4500 años antes del presente) en el valle de Supe (Perú) y su entorno.



Siguiendo la referencia paleoclimatológica de Moy *et al.* (2002), por un espacio de cerca de mil años hacia el 2500 a. C., las fluctuaciones del fenómeno de El Niño (ENSO) en el Pacífico Sur fueron bastante débiles. Es decir, ese período coincide con condiciones climatológicas benignas en la región. Más aun, de esa misma referencia se pueden estimar las tasas de fluctuaciones del El Niño $r \approx 1$ (1/100 años) y la tasa crítica

mencionada en la misma referencia $r_c \approx 5$ (1/100 años). Un cálculo aproximado, relacionado con el volumen construido, permite estimar el número total de megaconstrucciones (en el valle de Supe). Este número es del orden de $M \approx 36$. Con estos valores, y las soluciones analíticas óptimas (no incluidas en este artículo, ver Flores 2015), se pueden estimar los valores de $\beta \approx 3,6$ y $K \approx 1,9$ (1/100 años).

En este sentido, usando datos paleoclimáticos y arqueológicos, se estimaron, para el caso de la civilización de Caral, todos los parámetros del modelo relacionado con la ecuación (2). Finalmente la Figura 5 exhibe la solución numérica del sistema de Caral. En ella se muestra la posible evolución (tres curvas) del número de construcciones monumentales en el valle de Supe.

Figura 5. Evolución dinámica para la civilización de Caral según el modelo definido por la ecuación (2)

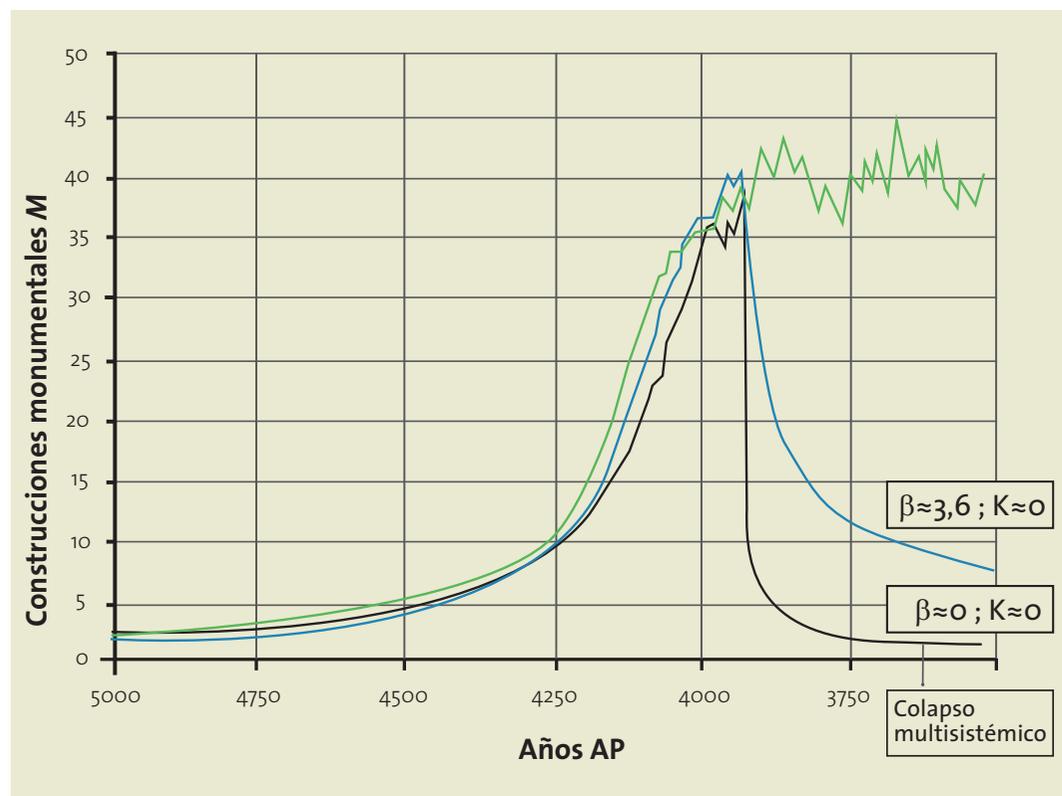


Figura 5. La evolución numérica (ecuación (2)) del número de construcciones monumentales para la civilización de Caral. Las tres curvas corresponden a distintos valores de los parámetros y a su eventual colapso. Se presume que el colapso estuvo relacionado con grandes fluctuaciones del fenómeno de El Niño (Moy *et al.*, 2002). La curva superior (verde) es, hipotéticamente, aquella sin colapso. La segunda curva (azul) corresponde a un posible colapso por desaparición de capacidades tecnológicas. La tercera, en negro, corresponde al colapso multisistémico con pérdida de capacidades tecnológicas y, además, condiciones climatológicas adversas.

(a) La curva superior, en verde, corresponde a aquella hipotética y sin colapso en la cual los parámetros se mantienen con los valores $\beta \approx 3,6$ y $K \approx 1,9$ (1/100 años).

(b) La segunda curva, en azul, rotulada con $\beta \approx 3,6$ y $K \approx 0$, corresponde a un hipotético colapso como resultado de la pérdida de capacidades tecnológicas ($K \approx 0$), por ejemplo, debido a conflictos internos. Corresponde posiblemente a la civilización de Teotihuacán en México.

(c) La tercera curva, en negro, la más baja en el gráfico y rotulada con $\beta \approx 0$ y $K \approx 0$, corresponde a un colapso multisistémico producido, por ejemplo, por una serie de condiciones climatológicas adversas, de acuerdo con la referencia paleoclimatológica de Moy *et al.* (2002). Es decir, se pierde conectividad $\beta \approx 0$ y capacidades tecnológicas $K \approx 0$, etc. En particular, se asume la llegada de grandes fluctuaciones climáticas debido a la reinstalación del fenómeno de El Niño.

COMENTARIOS FINALES

La transición orden-desorden relacionada con fenómenos críticos parece ser una buena herramienta matemática para describir el crecimiento y colapso de antiguas civilizaciones. En efecto, el parámetro de orden indicado parece ser el número de construcciones monumentales realizadas por la civilización. En el caso particular de este artículo, se estudió el caso de la antigua civilización de Caral en Perú. Sin embargo, también pueden considerarse aplicaciones al caso de las civilizaciones maya y rapanui (Flores, 2015).

Parte de esta investigación fue apoyada por un proyecto FONDECYT regular (1120344).

REFERENCIAS

- Flores, J. C. (2015). "A phase-transition model for the rise and collapse of ancient civilizations: A pre-ceramic Andean case study". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 440, pp. 155-160.
- Google Maps. (2016). [Caral, Perú] [Earth map]. Recuperado de <https://www.google.com.ar/maps/place/Anfiteatro+Principal/@-10.9017427,-77.521977,906a,13.1y,42.4t/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1sox-0000000000000000:ox6dao22524ceff5>
- Le Bellac, M. (1992). *Quantum and Statistical Field Theory*, Oxford Science Publications, Oxford: Clarendon Press.
- Moy, C. M.; Seltzer, G. O.; Rodbell, D. T. y Anderson, D. M. (2002). "Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch". *Nature*, 420, pp. 162-165.
- Shady, R. (2006). "La civilización de Caral: sistema social y manejo del territorio y sus recursos. Su trascendencia en el proceso cultural andino", en: P. Kaulicke y T. D. Dillehay (eds.), *Procesos y expresiones de poder, identidad y orden tempranos en Sudamérica. Primera parte, Boletín de Arqueología PUCP*, 10, Lima, pp. 59-89.
- Shady, R.; Hass, J. y Creamer, W. (2001). "Dating Caral, a preceramic urban center in the Supe Valley on the central coast of Peru". *Science*, 292, pp. 723-726.

Juan César Flores Araya es doctor en Ciencias por la Universidad de Ginebra, Suiza, y profesor titular de la Universidad de Tarapacá en Arica, Chile. Sus actividades de investigación se relacionan con campos de la física matemática y modelamiento matemático de sistemas biológicos y arqueológicos. Tiene más de sesenta publicaciones internacionales en revistas de corriente principal (ISI).

DESCUBRIENDO EL UNIVERSO: LAS PIEZAS OSCURAS DEL ROMPECABEZAS CÓSMICO

NUESTRO LUGAR EN EL UNIVERSO

A lo largo de los tiempos, la visión del hombre sobre su lugar en el mundo ha cambiado dramáticamente. En el siglo II d.C., Ptolomeo dejó plasmado en el *Almagesto*¹ un modelo de Universo geocéntrico en el que el Sol, la Luna y los planetas describían complicadas órbitas alrededor de la Tierra. Este modelo fue aceptado sin cuestionamientos durante más de quince siglos. Solo fue desplazado por el modelo heliocéntrico² de Copérnico, publicado póstumamente en la obra *Sobre las revoluciones de las esferas celestes*³ en 1543 d. C. Este trabajo sentó las bases de la astronomía moderna. Hoy sabemos que la Tierra pertenece a un sistema planetario que gira alrededor del Sol y que este forma parte de una galaxia: un conjunto de cien mil millones de estrellas que forman un único sistema ligado por la fuerza gravitatoria. Pero eso no es todo. Nuestra Galaxia forma parte de un grupo local de galaxias y, más aún, en el Universo visible hay aproximadamente cien mil millones de galaxias. Para poder explicar cuál es el modelo actual del Universo es necesario presentar dos hechos observacionales contundentes que dieron forma a lo que hoy llamamos Modelo Cosmológico Estándar: la expansión del Universo y el Fondo Cósmico de Radiación.

Notación científica

Dado que en astronomía aparecen escalas físicas muy dispares, es común que la magnitud de alguna cantidad en ciertas unidades sea un número muy grande o muy pequeño. Para tener una intuición más clara del orden de magnitud de la cantidad y, a la vez, facilitar la escritura, se utiliza la “notación científica”, en la que el número se escribe en unidades de potencias de 10. Así, cien mil millones puede escribirse como 10^{11} , y suele describirse coloquialmente como “un 1 seguido de 11 ceros”.

Por otra parte, un número muy pequeño puede representarse con potencias negativas de 10. Como veremos más adelante, las longitudes de onda de la luz visible se expresan en unidades de nanómetros, cuya relación con el metro es de $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000000001$, es decir, “un 1 en la novena posición después del punto decimal”.

UNIVERSO EN EXPANSIÓN

Cuando hablamos de que el Universo se expande, estamos diciendo que la distancia entre cualquier par de puntos en el Universo está creciendo. No de cualquier manera, sino cada una de forma proporcional a sí misma. Se describe matemáticamente como:

$$r(t) = a(t) \cdot x$$

donde $r(t)$ es la distancia física entre dos puntos del espacio y x es la distancia comóvil, así llamada porque se mide en unidades que se estiran con la expansión y, por lo tanto, su magnitud permanece constante. El factor de expansión $a(t)$ describe cómo crecen las distancias en función del tiempo. Es decir, tiene en cuenta cómo se desarrolla la expansión. Pero ¿cómo se mide la expansión del Universo? Para responder esta pregunta, es necesario introducirnos en el mundo de la astronomía y recordar que mucho de lo que se sabe del Universo es debido a la observación de la luz que nos llega de objetos distantes. Si sabemos interpretar el efecto que tienen distintos fenómenos físicos en la luz que recibimos, podemos obtener información del Universo, algo fundamental para una rama de la ciencia en la que no es posible reproducir en un laboratorio las condiciones observadas en los sistemas astrofísicos y en el Universo en general.

EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Cuando la luz pasa por un prisma, se descompone en los colores del arcoíris. Dicho de otra manera, la luz blanca está compuesta por ondas de distintas longitudes de onda, o colores. La luz de color violeta tiene una longitud de onda de 380 nm,⁴ mientras que la luz roja tiene una longitud de onda de 750 nm. Sin embargo, el espectro electromagnético es aún más extenso: abarca la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma hacia longitudes de onda más cortas, y el infrarrojo, microondas y ondas de radio hacia longitudes de onda más largas.

Figura 1. Espectro electromagnético.
Recuperado de: <http://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
(NASA-Imagine the Universe!).
Traducción propia.

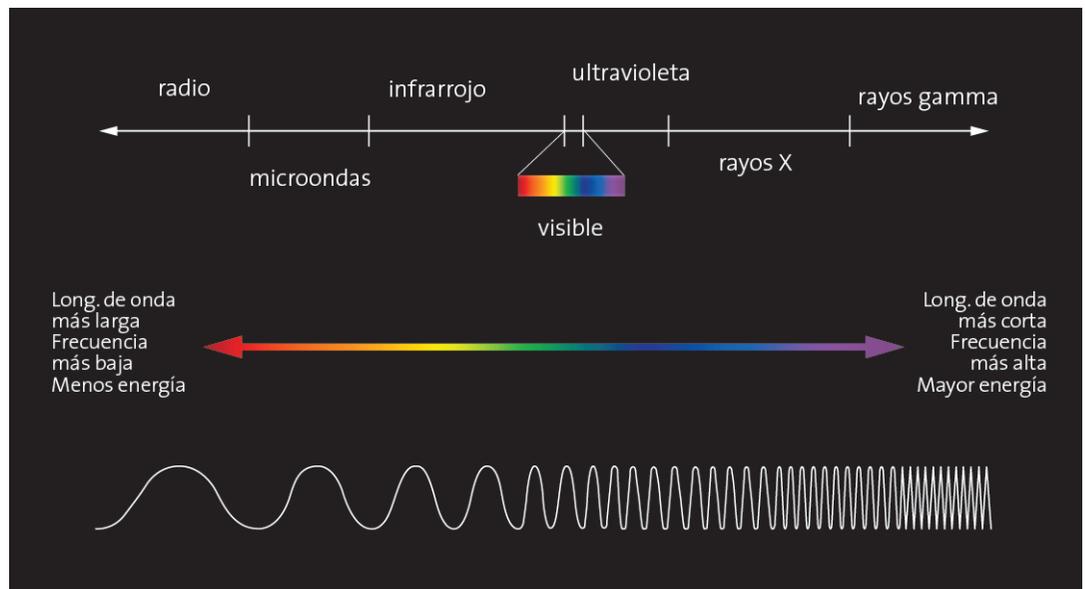
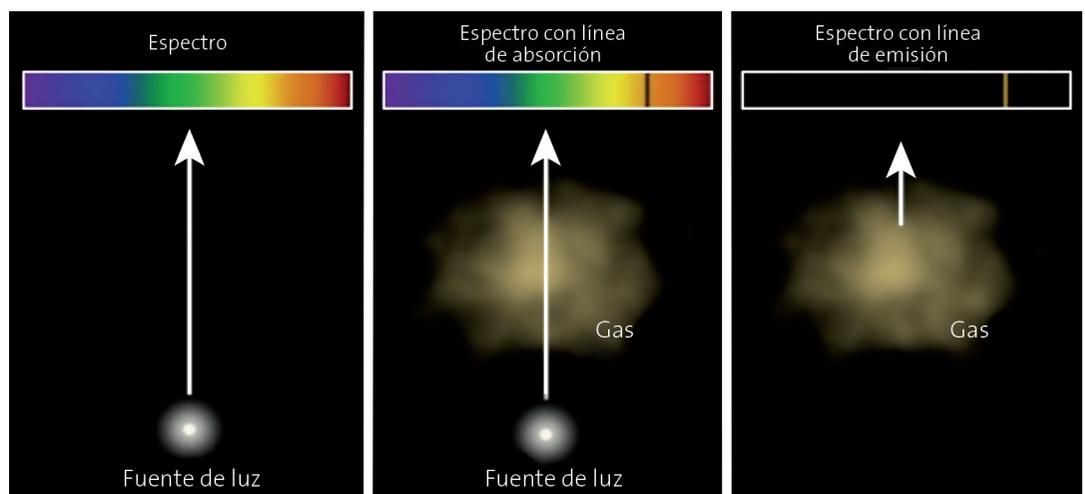


Figura 2. Esquema del espectro de absorción y de emisión de un gas.
Recuperado de: https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/l3_p6.html
Traducción propia.



Cuando un gas de algún elemento químico está caliente emite radiación en ciertas longitudes de onda, que se denominan líneas de emisión (ver Figura 2). El patrón de estas líneas está determinado por

los niveles de energía de los electrones dentro del átomo y resulta característico de cada elemento (ver Figura 3). Si una nube de gas frío se encuentra entre una fuente de luz y el observador, el gas absorberá energía en las longitudes de onda características, y las líneas se observarán en absorción, es decir, como líneas oscuras sobre el fondo luminoso de la fuente, lo que nos permitirá inferir cómo está compuesta la nube. Gracias a este fenómeno, la luz que llega de las estrellas nos trae información de los elementos químicos que existen en su atmósfera.

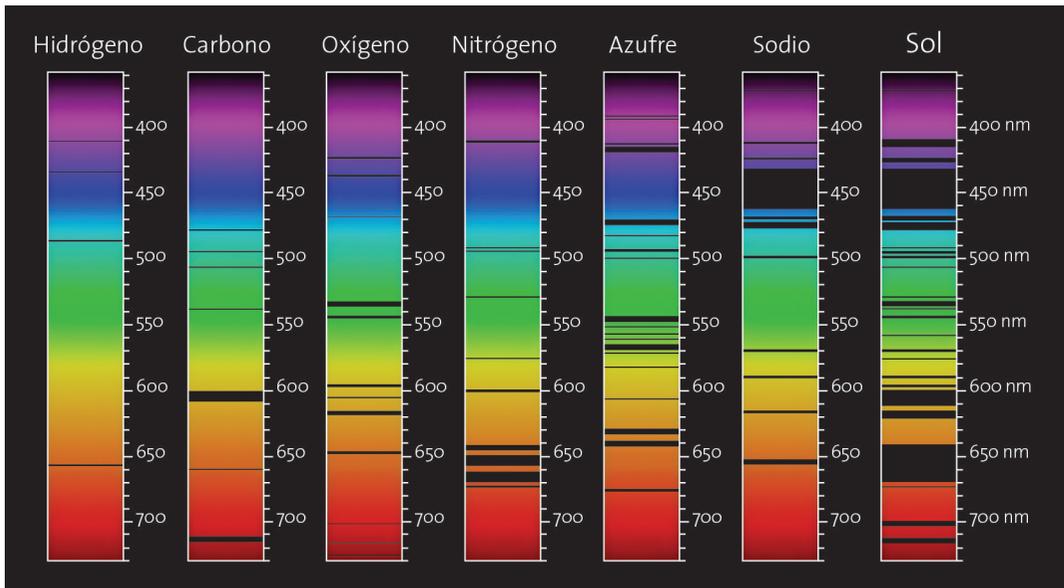


Figura 3. Cada elemento químico presenta un patrón de líneas característico que lo distingue. En esta figura se observan líneas de absorción. Recuperado de: <https://www.khanacademy.org/partner-content/nasa/measuring-universe/spectroscopy/e/absorption-emission-lines>. Traducción propia.

CORRIMIENTO AL ROJO Y RECESIÓN DE LAS GALAXIAS

Recurramos por un momento a la siguiente analogía: Cuando una fuente de sonido está en movimiento, la frecuencia del sonido que escucha el receptor es diferente de la frecuencia emitida. Si la fuente se mueve hacia el receptor, este la percibe con una frecuencia mayor (longitud de onda más corta). En cambio, si la fuente de sonido se aleja del receptor, este la percibe con una frecuencia menor (longitud de onda más larga). Algo similar ocurre con la luz (ondas electromagnéticas). Si la fuente que emite al fotón (partícula de luz) se mueve hacia el observador, este distingue una luz con longitud de onda más corta (corrimiento hacia el azul), mientras que, si la fuente se mueve alejándose del observador, este distingue una luz con la longitud de onda más larga (corrimiento hacia el rojo). Matemáticamente, se define el “corrimiento al rojo” como:

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} - 1 = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1 \approx \frac{v}{c}$$

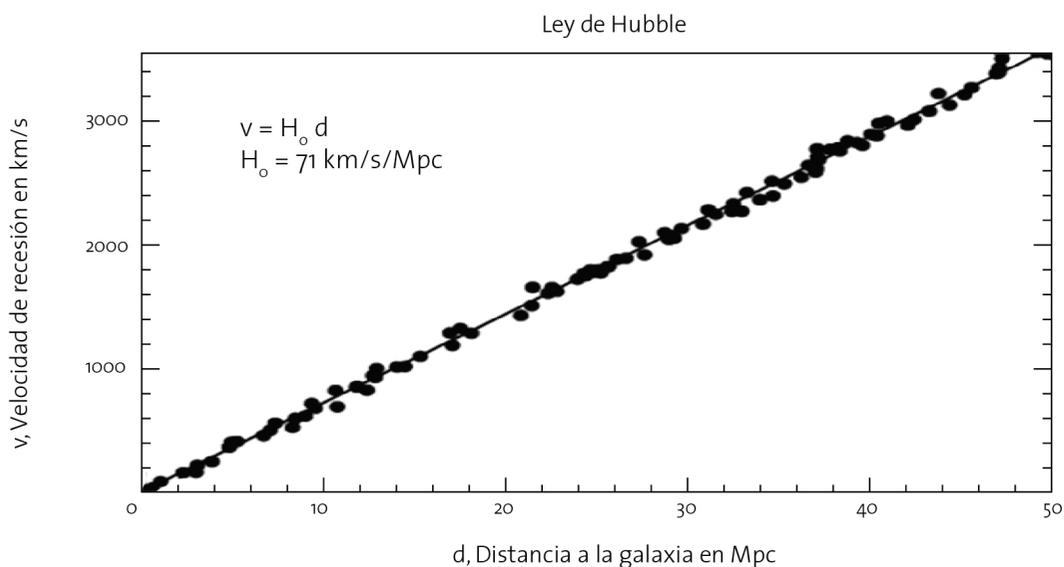


Figura 4. Diagrama de Hubble.

En 1929, gracias a la observación de numerosas galaxias, Edwin Hubble descubrió que las galaxias más distantes se estaban alejando de nosotros con una velocidad de recesión (velocidad de alejamiento) que era proporcional a la distancia al observador. Determinó la distancia a las galaxias usando la relación período-luminosidad de un tipo de estrellas variables llamadas Cefeidas y midió la velocidad de recesión a partir del corrimiento al rojo de las líneas en los espectros de las galaxias. En la Figura 4 puede verse el diagrama de Hubble.

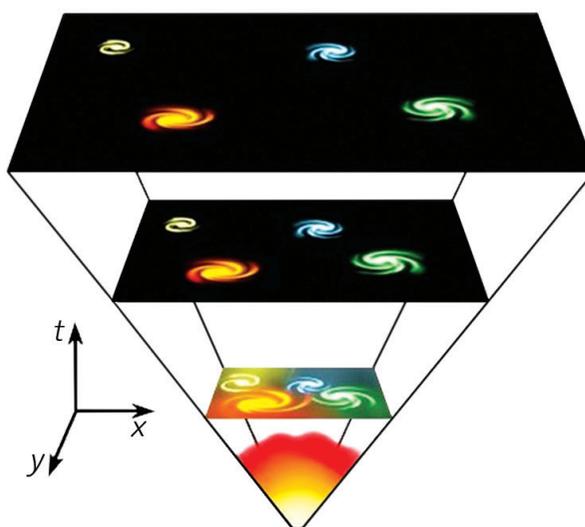
Pero ¿por qué razón todas las galaxias se están alejando de la Tierra? La explicación es que las galaxias no se están moviendo, sino que el espacio entre ellas está creciendo. El espacio se está expandiendo, y las observaciones de Hubble no son más que la evidencia observacional de dicha expansión. Desde cualquier punto del Universo se vería lo mismo. No hay un centro de expansión.

El marco teórico que explica este fenómeno ya había sido planteado por Albert Einstein cuando, en 1915, formuló la Teoría de la Relatividad General. En esta teoría, el espacio y el tiempo son cantidades dinámicas cuya evolución está determinada por la materia y la energía contenida en el Universo. Asimismo, la materia sigue órbitas determinadas por la estructura del espacio-tiempo. Las ecuaciones de la Relatividad General predicen naturalmente un Universo en expansión. Estas soluciones fueron encontradas casi simultáneamente por A. Friedmann (1922) y G. Lemaître (1927). En un intento por conseguir soluciones estacionarias, Einstein introdujo la famosa “constante cosmológica”. Después del descubrimiento de Hubble, Einstein se refirió a esta manipulación matemática como su “mayor torpeza”. Más adelante veremos que no lo fue tanto.

CONSECUENCIAS DE LA EXPANSIÓN

El Universo se expande y, por lo tanto, si retrocedemos en el tiempo, las distancias entre las galaxias se acortan.

Figura 5. Esquema de la evolución del Universo. Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang.



La consecuencia inmediata de esto es que el Universo debe de haber sido muy diferente en el pasado remoto.

Las ecuaciones de la Relatividad General predicen que estas distancias son cero a un tiempo finito en el pasado, hace 13 800 millones de años. Esto implicaría que el Universo estuvo concentrado en un único punto de densidad infinita, lo cual constituye una singularidad en el espacio-tiempo. Nos referimos a ese instante de tiempo como Big Bang, pero, en realidad, no se trata de una teoría para el origen del Universo, sino de una muestra de que nuestra comprensión del modelo es aún incompleta. Debido a que la velocidad de la luz es finita,⁵ al mirar objetos lejanos, estamos observando cómo era el Universo en el pasado, ya que a la luz le toma un tiempo viajar desde donde se emite hasta el observador. Efectivamente, se observa que el Universo está evolucionando. Por ejemplo, las propiedades de las galaxias lejanas son diferentes a las de las galaxias cercanas. Así es que somos capaces de hacer mediciones a lo largo de la historia del Universo para poder compararlas directamente con los modelos.

FONDO CÓSMICO DE RADIACIÓN

A pesar de que no es posible describir el instante inicial del Universo mediante las teorías actuales, sí podemos detallar lo que ocurrió a partir de 10^{-35} segundos después de ese instante inicial. En los primeros tres minutos del Universo ocurren procesos muy variados, que abarcan desde la formación de *quarks* (partículas subatómicas) a la aniquilación de materia-antimateria y la formación de núcleos livianos, durante la Nucleosíntesis Primordial. A partir de entonces, el Universo está formado por un plasma caliente de fotones, bariones, leptones y núcleos de elementos químicos livianos (principalmente hidrógeno y helio, y en menor cantidad deuterio y litio). El plasma presenta pequeñas inhomogeneidades en la densidad (diferencias de tan solo una parte en cien mil respecto del valor promedio) que constituyen las semillas a partir de las cuales se formarán, por colapso gravitatorio, las grandes estructuras del Universo. Debido a la expansión, la temperatura y la densidad del Universo decrecen. Cuatrocientos mil años después del Big Bang, la temperatura desciende por debajo de los 3000 grados kelvin (K) y se forman los átomos neutros. Los fotones, que hasta ese momento interactuaban a través de la dispersión de Thomson con los electrones, viajan libremente por el Universo y sus longitudes de onda se desplazan al rojo. Hoy esos fotones llegan hasta nosotros 13 800 millones de años después de ese momento de desacople de materia y radiación, en lo que se conoce como Fondo Cósmico de Radiación (FCR), en la zona de microondas del espectro electromagnético. Esta radiación tiene una distribución en longitudes de onda que respeta la ley de cuerpo negro, con una temperatura de 2,75 K, y es muy isotrópica en el cielo (la misma temperatura en cualquier dirección en que se mire). Solo presenta pequeñas anisotropías de una parte en cien mil, debido a las fluctuaciones iniciales en la densidad de materia y energía del Universo.

El FCR fue descubierto de manera fortuita, en 1965, por Arno Penzias y Robert Wilson. Mientras hacían observaciones de la Vía Láctea, detectaron una señal constante en el cielo que no podían eliminar. Ese ruido no era más que la radiación reliquia de los comienzos del Universo cuya existencia había sido predicha teóricamente alrededor de los años 50. En 1978, Penzias y Wilson recibieron el Premio Nobel de Física por su hallazgo.⁶ Desde entonces, el FCR ha sido observado con numerosos instrumentos desde la Tierra, experimentos en globos aerostáticos y satélites espaciales. El primero de los satélites enviados para el estudio de esta radiación se llamó Cosmic Background Explorer (COBE).⁷ En 1992 pudo medir diferencias en la temperatura del FCR, de una parte en cien mil, lo cual confirmó una vez más el escenario del Big Bang y de las fluctuaciones iniciales que dan lugar a las estructuras a gran escala del Universo. En el año 2006, este descubrimiento fue galardonado con el Premio Nobel de Física.⁸ El segundo satélite en caracterizar el FCR

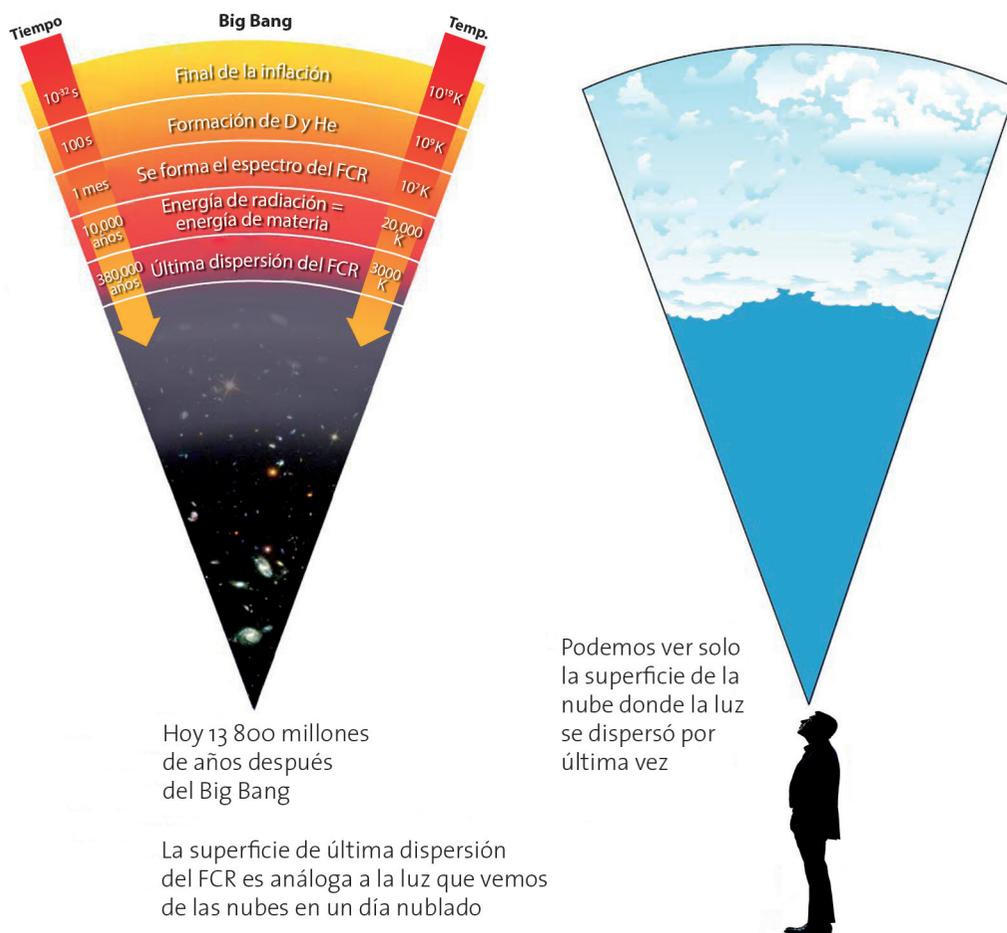


Figura 6. La superficie de última dispersión representa la distancia más lejana desde donde nos pueden llegar fotones del Universo. Todo lo que pasó antes de la formación del hidrógeno neutro debe ser medido indirectamente a partir de este u otros observables. Recuperado de: NASA / WMAP Science Team. Traducción propia.

Figura 7. El Fondo Cósmico de Radiación provee una “huella digital” del Universo que sirve para encontrar la teoría que mejor se ajusta a las observaciones. Recuperado de: NASA/WMAP Science Team.



fue el WMAP,⁹ cuyos primeros datos vieron la luz en 2003. La gran mejora en resolución angular y precisión de las medidas hizo que la cosmología se convirtiera en una ciencia de precisión. Después de muchos años de ser una rama de la física fuertemente teórica, los grandes avances en el conocimiento de esta ciencia comenzaron a darse en el plano observacional.

En los últimos años, el tercer satélite dedicado al FCR, el satélite Planck,¹⁰ hizo públicos sus datos. Estos mejoran ampliamente la resolución y precisión del WMAP, pero confirman la mayoría de sus resultados. Esta radiación, que ha viajado por el Universo durante casi toda su existencia, nos trae información no solo de la infancia del Universo, sino también de los procesos que ocurrieron a lo largo de su historia y que han dejado su huella en los fotones que hoy recibimos en el FCR. La Figura 6 presenta un esquema de cómo vemos el Universo a medida que observamos objetos más distantes. El FCR es lo más distante que podemos observar el Universo. Cualquier evento anterior debe medirse por sus efectos sobre el FCR u otros observables.

Los modelos teóricos hacen predicciones acerca de las características de las anisotropías en la temperatura del FCR (diferencias relativas de temperatura en distintas direcciones del cielo). En el mapa de temperatura, al cual se le resta la temperatura media del mapa y el efecto causado por el movimiento del sistema Sol-Tierra, aparecen pequeñas diferencias de temperatura que traen información del estado del Universo en épocas muy remotas. Es importante medir los tamaños de esas “manchas” y determinar cuántas hay de cada tamaño para poder comparar con los modelos y encontrar el que mejor se ajusta a los datos.

Los últimos datos del satélite Planck confirmaron que, del total de materia y energía del Universo, menos del 5% corresponde a la materia ordinaria que conocemos (llamada materia bariónica) y que es la materia de la que están compuestas todas las estrellas, planetas, gas e incluso nosotros mismos. El resto, más del 95% de la materia y energía del Universo, está compuesto por algo que aún nos resulta desconocido.

PIEZAS OSCURAS DEL ROMPECABEZAS

Algunas de las piezas que faltan en este rompecabezas cósmico son los componentes de materia y energía del Universo cuya naturaleza todavía no conocemos. Sin embargo, tenemos muchas evidencias de que existen, especialmente la materia oscura. A continuación, daremos cuenta de las evidencias observacionales que nos conducen a esta conclusión.

MATERIA OSCURA

La materia oscura es una hipotética clase de materia que no absorbe ni emite radiación electromagnética. Solo interactúa gravitatoriamente y, por eso, se la detecta a través de fenómenos que involucren la gravedad. Hay teorías alternativas que no requieren de un componente extra de materia no bariónica, pero estas no logran explicar todas las observaciones existentes.

Dichas observaciones se clasifican de la siguiente manera:

Curva de rotación de galaxias espirales: la materia que gira alrededor del centro de una galaxia espiral debería rotar con una velocidad que decae con la distancia al centro de la galaxia y que sea directamente proporcional a la masa contenida dentro de su órbita. Sin embargo, en las zonas más externas de las galaxias espirales se observa que la velocidad se mantiene constante. Esto es evidencia de que podría haber más materia que no emite ningún tipo de radiación, pero cuyo efecto gravitatorio se hace notar.



Figura 8. Cúmulo de galaxias Abell 1689.
Fuente: Rayos X: NASA/CXC/MIT/E.-H Peng
et al.; Óptica: NASA/STScI.

Cúmulos de galaxias: constituyen los sistemas ligados más grandes en equilibrio hidrostático del Universo. Estos conjuntos de galaxias facilitan numerosos escenarios en los que se ponen a prueba las leyes de la física, por lo cual sirven de laboratorio para verificar las teorías.

Gracias a ellos, tenemos evidencias diversas de la existencia de materia oscura que resultan independientes entre sí:

Los movimientos de galaxias dentro de cúmulos: las galaxias miembros de cúmulos de galaxias se mueven con una dispersión de velocidades muy alta, del orden de 1000 km/s. Esto implica una masa del sistema mucho mayor a la medida a partir de las estrellas que se observa en dichas galaxias y al gas intracúmulo. Ya en 1933, Fritz Zwicky propuso la existencia de materia oscura para explicar este fenómeno. Hoy parece la explicación más aceptada.

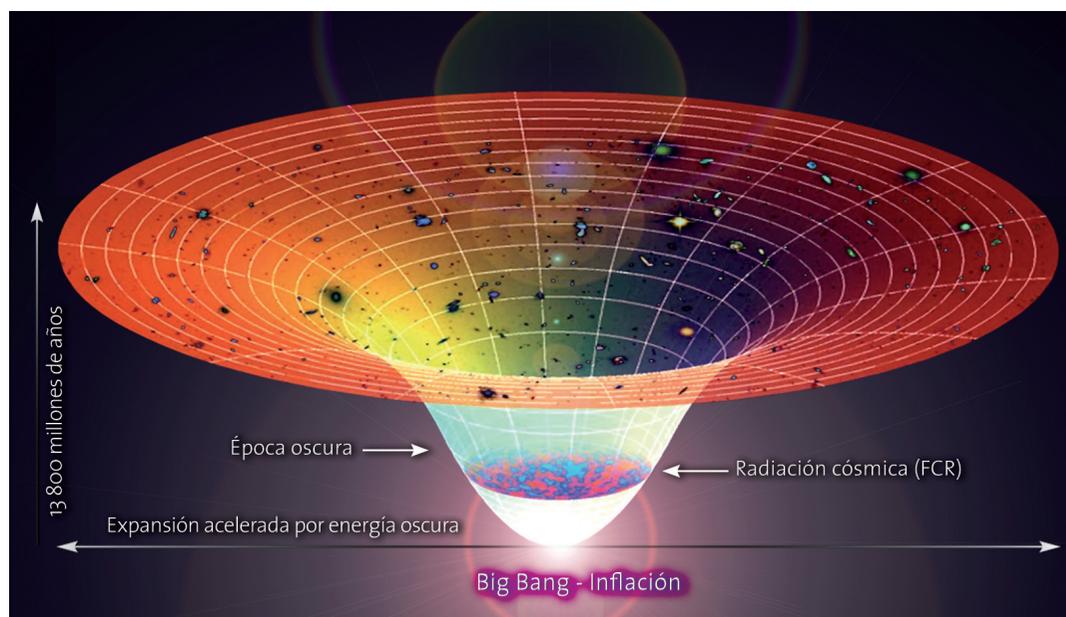
Confinamiento de gas caliente en los cúmulos: en los cúmulos de galaxias se observa, por su emisión en rayos X, la presencia de gas caliente ionizado, y se puede estimar la masa del gas. La masa total (masa bariónica y no bariónica) se infiere a partir de observaciones del gas intracúmulo, bajo la hipótesis de equilibrio hidrostático entre la atracción gravitatoria y la presión del gas (presión térmica y no térmica, por la turbulencia del gas). La masa total estimada es mucho mayor que la masa del gas y de las estrellas que componen las galaxias.

Efecto de lente gravitacional: este efecto se produce cuando la luz de alguna fuente lejana, como un cuásar o una galaxia, nos llega en la misma línea de visión de un cúmulo de galaxias muy masivo. Debido a la deformación de la trayectoria de los rayos de luz de la fuente lejana, se produce un efecto de lente, que magnifica la luz recibida y deforma la imagen. Es posible estimar la masa del objeto que hizo las veces de "lente gravitacional", es decir, el cúmulo de galaxias, y se observa que es mayor que la masa luminosa, constituyendo así otra evidencia en favor de la materia oscura.

ENERGÍA OSCURA

Hoy por hoy, sabemos muy poco sobre la energía oscura, aunque normalmente ese sea el nombre elegido para denominar lo que sea que constituya la razón de la expansión acelerada del Universo. En 1998, dos equipos independientes (el Supernova Cosmology Project¹¹ y el High-Z SN Search Team¹²) se embarcaron en la tarea de medir la historia de expansión del Universo. Su objetivo era medir la tasa

Figura 9. Historia de la expansión del Universo. Recuperado de: Wikipedia.



de frenado de la expansión del Universo. El razonamiento, dicho de manera simplificada, era: Si todo comenzó con una gran explosión que dio lugar a la expansión, en algún momento debe frenarse y, por acción de la gravedad, volver a contraerse. En el peor de los casos, expandirse hasta el infinito con una velocidad que tienda a cero.

Sin embargo, la sorpresa fue mayúscula cuando las observaciones mostraron que, en realidad, ¡ocurría exactamente lo contrario! Los dos equipos, de manera totalmente independiente, encontraron que la expansión del Universo se está acelerando. Para hacer las observaciones, utilizaron mediciones de curvas de luz de supernovas lejanas y encontraron que las SN eran más débiles de lo esperado.

Tan revolucionario fue este hallazgo que, en el año 2011, los líderes de ambos equipos, Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess, recibieron el Premio Nobel de Física por este descubrimiento.¹³

¿QUÉ SABEMOS DE LA ENERGÍA OSCURA?

Actualmente sabemos muy poco acerca de la energía oscura. Podríamos decir que llamamos “energía oscura” a la responsable de la expansión acelerada del Universo. Podemos visualizarla como un fluido con presión negativa. La analogía simple dice que, si pusiéramos un poco de energía oscura en un pistón y presionáramos, el fluido, en lugar de resistir, tendería a meterse más.

Una opción matemática simple podría ser la introducción de una constante cosmológica en las ecuaciones de la Relatividad General, aquella que Einstein señalara como su error más grosero, e interpretarla como energía del vacío con densidad constante.

Otra opción es que la Relatividad General sea una teoría de gravedad incompleta y que todavía tengamos que encontrar una generalización que explique las observaciones de las supernovas lejanas.

Todavía no tenemos la respuesta a cuál es la razón de la aceleración en la expansión del Universo. Esta es una de las grandes preguntas de la física moderna.

CONCLUSIONES

Nuestra imagen actual del Universo es muy diferente de la de nuestros antecesores. Sabemos que el Universo es inmenso, con cientos de miles de millones de galaxias; que tuvo un comienzo y que se expande aceleradamente. Actualmente, se está trabajando para catalogar millones de galaxias y hacer mapas tridimensionales extraordinariamente grandes, y así poder estudiar la historia de la expansión y dilucidar uno de los misterios más grandes del Universo: el porqué de su expansión acelerada. Pero las respuestas tal vez nos lleven a nuevas preguntas y desafíos, lo que demuestra que la curiosidad humana no tiene límites y que el Universo no dejará de maravillarnos jamás.

NOTAS

1. Traducido al latín desde el árabe por Gerardo de Cremona c.1175.
2. Con el Sol en el centro.
3. Copérnico, Nicolás (1473-1543). Obra original: De revolutioibvs orbium coelestium, Libri VI. Edición de Norimbergæ, apud Ioh, Petreium, (1543).
4. Un nanómetro (nm) equivale a 10^{-9} metros.
5. Aproximadamente 300 000 km/s.
6. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1978/
7. <http://science.nasa.gov/missions/cobe/>
8. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2006/
9. <http://map.gsfc.nasa.gov/>
10. <http://sci.esa.int/planck/>
11. <http://panisse.lbl.gov/>
12. <https://www.cfa.harvard.edu/supernova//HighZ.html>
13. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/

REFERENCIAS

- Einstein, A. Título original: "Zur allgemeinen Relativitätstheorie", Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlín, pp. 778-786. (1915).
- Friedmann, A. (1922). "Über die Krümmung des Raumes", Zeitschrift für Physik, 10, pp. 377-386.
- Hubble, E. (1929). "A Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-Galactic Nebulae", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 15(3), pp. 168-173.
- Lemaître, G. (1927). "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques", Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, A47, pp. 49-59.
- Penzias, A. A y Wilson, R. W. (1965). "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s." Astrophysical Journal, 142, pp.419-421.
- Zwicky, F. (1933). "Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln", Helvetica Physica Acta, 6, pp. 110-127.

Claudia G. Scóccola es doctora en Astronomía por la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Tuvo posiciones posdoctorales en el Max Planck Institute for Astrophysics, en Munich, en el Instituto de Astrofísica de Canarias, Tenerife, y en el Instituto de Física Teórica de Madrid. Actualmente, es investigadora adjunta del CONICET, investigadora asociada del ICTP, Trieste, y docente en la FCAG-UNLP. Sus actividades de investigación se focalizan en las áreas de cosmología y astrofísica.

ACERCA DEL ESTUDIO DE LA RESISTENCIA DE LOS CUERPOS MATERIALES¹

La humanidad progresa a pasos agigantados pero, si bien la tecnología se socializa con enorme rapidez, el conocimiento puro queda restringido a un número muy reducido de individuos.

José María Bermúdez de Castro, *La evolución del talento*.

EXORDIO

Lo que Bermúdez de Castro afirma en forma genérica, se da también, por supuesto, en las ingenierías, donde dicho desfase puede tener consecuencias más que complejas, particularmente, en la ingeniería estructural. Ello se debe a que en una época en que —más allá de sus fuertes limitaciones intrínsecas— la computación parece no tener límites en su capacidad de afrontar nuevos problemas y de encarar los viejos con más detalle cada vez (las más de las veces innecesariamente), esta realidad evidente representa, en alguna medida, un grave problema, pues, por ese camino, se recurre a *modelos matemáticos* cada vez más complejos cuyo manejo conceptual requiere una formación teórica básica mucho más profunda y abarcadora. Esto no siempre —o, mejor dicho, casi nunca— ocurre: en buena medida porque no se les transmite adecuadamente a los ingenieros proyectistas de estructuras esta compleja circunstancia y los serios inconvenientes que esto les puede ocasionar en su vida profesional. Es demasiado frecuente que quien dispone de un programa de cálculo complejo lo opere sin tener, ni remotamente, la capacidad mínima imprescindible para hacerlo. Y así son los resultados que se obtienen.

Estas dos situaciones se resuelven con educación, profundizando la formación teórica, por un lado, a fin de ir formando recursos humanos que puedan comprender y manejar con solvencia modelos matemáticos complejos y, por otro, informando adecuadamente sobre cuál es la verdadera utilidad de los programas de computación destinados al estudio de los *cueros materiales* denominados estructuras resistentes, pues en tales casos, en general, son tan inconducentes los modelos demasiado elementales como los excesivamente complejos. El presente escrito busca colaborar en la solución del primero de estos problemas.

Para comenzar partiremos de la siguiente premisa insoslayable: el ingeniero debe poder encarar cualquier problema de su especialidad con papel y lápiz y, una vez hallada una solución aparentemente satisfactoria, recién entonces habrá de recurrir a la informática para afinar su solución. El camino nunca puede ser el inverso, al menos, si se pretende llegar a resultados tanto de utilidad pública cuanto ingenierilmente satisfactorios.

1. POR QUÉ ESTUDIAR LOS CUERPOS MATERIALES

La importancia que tienen los cuerpos sólidos en todos los aspectos de la vida humana es más que evidente y no requiere mayor fundamentación.² Su importancia se basa en el tipo de prestaciones que ellos brindan al hombre, las que se apoyan en la forma en que se comportan —diremos: de la forma en que reaccionan— frente a acciones externas de variado tipo: eléctricas, térmicas, mecánicas. Es precisamente esto último, la reacción de los cuerpos materiales frente a acciones externas de tipo mecánico, las que interesan en el caso de las estructuras resistentes.

En estas condiciones, “estudiar” el comportamiento de un cuerpo material significa poder prever su reacción frente a las acciones externas que correspondan. En otras palabras, estudiamos los cuerpos resistentes para poder predecir su comportamiento bajo determinadas acciones y en circunstancias bien definidas y determinar, de esta forma, su posible utilización para los fines propuestos.

Cuando nos referimos al estudio de los cuerpos materiales denominados estructuras resistentes,³ esto implica que queremos conocer de ellas todas las propiedades que las hacen aptas para tal fin y las alteraciones que por tal motivo sufren respecto del estado “descargado”⁴ en el que se encontraban antes de la aplicación de las cargas consideradas. Todo ello para cualquier estado de cargas posible y para cualquier secuencia de aplicación de ellas. En resumen, lo que queremos saber respecto de las estructuras resistentes cuando las “estudiamos” es lo siguiente:

a) Cómo lograr su equilibrio frente al sistema de referencia que se adopte: en el presente caso, la corteza terrestre, lo que lleva a definir los vínculos necesarios para que la estructura no se desplace respecto de ella, los que, diremos, constituyen sus apoyos.

a) Cómo va a cambiar de forma la estructura en función de las cargas actuantes y de los apoyos disponibles (deformaciones específicas, giros, corrimientos).

c) Qué esfuerzos internos habrá que resistir para que ello sea posible y que, además, lo sea con adecuada seguridad. Esto se logra mediante la determinación de las trayectorias que va a seguir, en el interior del cuerpo, cada una de las cargas actuantes para “trasladarse” de sus puntos de aplicación a los apoyos en el terreno. La teoría matemática que interpreta estos fenómenos físicos —y que intentaremos esbozar en este artículo— lo hace mediante la construcción de una serie de diagramas de “esfuerzos internos” correspondientes a lo que se supone que son las componentes primarias que permiten reconstruir las cargas actuantes en cada punto del cuerpo en magnitud, dirección y sentido. Se trata de los diagramas de momentos (flectores y torsores), esfuerzos normales (compresión y tracción) y esfuerzos de corte. En conclusión, ellos nos indican qué tipo de esfuerzos habrá que resistir en cada uno de los puntos de la estructura —físicamente hablando, en cada una de sus “regiones”—⁵ y, a partir de ello, poder decidir cuáles van a resistir bien y cuáles no y con qué seguridad lo harán.

En otras palabras, lo que se busca es prever el *comportamiento resistente*, bajo diversas circunstancias, del cuerpo material analizado.

Debe quedar bien claro antes de proseguir que lo que se hace es *verificar* una estructura ya definida. ¿Quién define entonces la estructura que analizamos? Lo hace el mismo proyectista en una etapa del proceso del proyecto previa al cálculo: la etapa en que el proyectista *piensa* el problema que tiene que resolver e imagina, basándose en sus propios conocimientos teóricos y prácticos sobre el tema, cuál podrá ser la estructura que lo resuelva mejor. Esta se va a transformar en la “estructura dada”, la que luego se verificará y ajustará en función del cálculo. Es esto lo que quisimos expresar cuando dijimos que “el ingeniero debe poder resolver cualquier problema de su especialidad con papel y lápiz”. El lector ya está en condiciones de comenzar a comprender por qué, para proyectar estructuras complejas, se requiere una extensa y bien fundada formación teórica básica previa que ningún programa de cálculo, por completo que sea, puede sustituir. De aquí en más nos ocuparemos principalmente de esa formación teórica que ayuda al ingeniero a “pensar correctamente”, pero que no puede reemplazar de ningún modo el proceso creativo, solo ayuda. Pero puede ayudar mucho.

Estrictamente hablando, la única forma efectiva de estudiar y comprender el comportamiento resistente de un cuerpo material consiste en analizarlo experimentalmente, es decir, construir el cuerpo cuyo comportamiento se desea conocer, someterlo a los estados de carga previstos y observar con suficiente precisión los cambios que sufre. Evidentemente, en muchos casos esta no es una solución viable, por lo que resulta necesario sustituirla.

En el estado actual de nuestros conocimientos ello se logra mediante la construcción de teorías de base matemática que representen suficientemente bien el comportamiento estructural que se desea

conocer. Estas teorías se apoyan y se validan con base en resultados experimentales adecuados y suficientes, lo que les permite constituirse en *representaciones válidas* de los fenómenos físicos que abarcan. Más allá de la indiscutible utilidad de estas teorías, hay algo que debe comprenderse perfectamente desde un principio. De acuerdo con Weinberg (2011): “La matemática misma no es nunca una explicación de algo: es solo el medio que utilizamos para explicar un conjunto de hechos a partir de otros y (constituye) el lenguaje en el que expresamos nuestras explicaciones”.⁶

En estas condiciones, los caminos teóricos para estudiar las estructuras resistentes se apoyan en la representación matemática de fenómenos físicos determinados experimentalmente; una forma de representación que ha recorrido un largo camino desde sus inicios hasta llegar al actual concepto de “modelo matemático”.

Pero vamos por parte, pues hemos introducido una serie de conceptos que, antes de proseguir, deben ser adecuadamente definidos y analizados en detalle.

2. ALGUNAS DEFINICIONES NECESARIAS

Como decíamos, va a ser necesario, antes de entrar de lleno en el tema, definir con cierta precisión algunos conceptos que van a ser esenciales para comprender con más facilidad la teoría que expondremos.

Un *cuerpo material* es una porción finita de materia en estado sólido, delimitada espacialmente por una forma geométrica cerrada bien definida. Las *propiedades mecánicas* de este cuerpo material, que son las que gobiernan su deformabilidad y capacidad resistente, dependen tanto de las propiedades físicas del material cuanto de las propiedades geométricas de la forma que lo contiene. A partir de esta definición resulta evidente que las *estructuras resistentes*⁷ de la ingeniería son todas ellas cuerpos materiales.

Tenemos, entonces, una primera constatación interesante: no son los materiales los que resisten sino los cuerpos que con ellos se construyen, a los que normalmente se denomina estructuras resistentes. Por ejemplo, si se le pregunta a cualquier persona si el acero resiste compresiones, la respuesta casi unánime va a ser que sí. Sin embargo, una cadena de acero, o un cable del mismo material, no lo hacen. Desde el punto de vista resistente, estas dos estructuras de acero, la cadena y el cable, son equivalentes: resisten bien tracciones y no resisten compresiones.

Pero su capacidad resistente no agota las posibilidades estructurales de los cuerpos. Naturalmente, ellos deben resistir, pero cuando se los emplea en relación con una actividad humana, además de resistir, deben hacerlo con adecuada seguridad. Aparece entonces un concepto esencial de las estructuras resistentes: su ductilidad, a la que podríamos definir, en una primera aproximación, como el comportamiento de un cuerpo material que indica que este se está acercando a su rotura. La cadena del ejemplo anterior es una estructura frágil, pues en general se rompe cuando lo hace el primer eslabón, cosa que normalmente ocurre sin aviso previo.⁸ Por el contrario, un cable es una estructura dúctil, pues los primeros que se rompen son los hilos menos resistentes, lo cual resulta evidente a simple vista, y solo se rompe el cable cuando ya se han roto previamente una cantidad apreciable de hilos.⁹

Cuando a un cuerpo material libre en el espacio se le aplican cargas externas, este se pone en movimiento o cambia su velocidad de desplazamiento (si inicialmente lo estaba). Por el contrario, si el cuerpo está firmemente vinculado a la corteza terrestre, entonces, como no se puede desplazar, se deforma,¹⁰ pues no existen en la naturaleza cuerpos indeformables. Esta deformabilidad de los cuerpos cargados es la que les permite generar las fuerzas internas capaces de equilibrar las cargas externas que les son aplicadas. Esto, a su vez, las habilita para oponerse en cierta medida a las deformaciones, pues los cuerpos cargados se deforman la mínima cantidad necesaria como para generar las fuerzas internas que les impidan seguir deformándose. Estas cualidades, por su parte, implican que las estructuras resistentes poseen *capacidad portante*, es decir, *resistencia*: aptitud para *trasladar cargas* entre diferentes lugares del espacio físico.

En cuanto a qué es un modelo matemático,¹¹ podemos decir que es una interpretación empirista de la realidad, un artefacto teórico que constituye una imagen abstracta del dato empírico. El discurso de la ciencia sirve de vínculo entre la *realidad empírica* y la *forma teórica*.¹²

La diferencia entre lo empírico y lo formal no es otra cosa que la diferencia entre lo constatable experimentalmente y el lenguaje artificial mediante el cual ese constatable es representado y se hace inteligible.

En este contexto, entendemos la ciencia como lo que vincula epistemológicamente un *objeto real* sobre el cual se debe indagar: la estructura, y un *objeto artificial* destinado a reproducir en sus efectos al objeto real: el modelo matemático que la interpreta.

Como *objeto artificial*, el modelo es controlable, es decir que se puede prever de qué manera reaccionará en el caso de que se modifique uno cualquiera de sus elementos componentes. Esta *previsibilidad* es lo que constituye la *transparencia* teórica del modelo y surge del hecho de que este está construido de manera tal que la opacidad atribuida a lo real no se reproduzca en él. Desde este punto de vista, podemos decir que el modelo no es una transformación práctica de lo real, de *su* real, pues pertenece al campo de la pura invención y está dotado, consecuentemente, de una “irrealidad” formal.

Nuestros modelos, que son puramente teóricos, o matemáticos, están contruidos a partir de un conjunto de hipótesis, que se supone completo respecto del dominio estudiado y cuya coherencia y el posterior desarrollo deductivo con el que, a partir de ellas, se construye la teoría están garantizados por un código matemático.

La no coincidencia exacta del *hecho físico* con el *modelo matemático* que pretende representarlo permite construir, para cada caso particular, varios *modelos* distintos, según los contextos y las circunstancias que se consideren y los enfoques que se utilicen en ellos para efectuar el análisis. Esto implica que, a partir de un determinado problema físico que se quiera resolver, se pueden construir distintos modelos matemáticos que lo interpreten, cada uno de los cuales en general posibilitará diferentes generalizaciones y conclusiones.

En resumen, y volviendo al origen de estas consideraciones sobre el empleo de la herramienta matemática en el estudio de las estructuras resistentes, un esquema matemático construido a partir de una estructura real es un “modelo” en el marco de una teoría formal hipotético-deductiva, si y solo si todos los axiomas de esta teoría son válidos en la estructura considerada.

Para concluir este apartado, resulta interesante transcribir el siguiente comentario de Gregory Chaitin (2015):¹³

El proceso mediante el cual se construye un modelo se integra por los siguientes pasos: 1) establecimiento de los *axiomas*; 2) desarrollos analíticos que se construyen a partir de ellos; 3) obtención de los modelos. Luego, los *axiomas* constituyen un “sistema condensado” que contiene (o del que se derivan) todos los modelos, de allí la importancia esencial de encontrar todos, y solo, los axiomas necesarios, definirlos con precisión y comprender en profundidad sus significados estructurales.

3. LA REALIDAD DE LA INGENIERÍA

La ingeniería no puede consistir (bajo ningún aspecto, y debido a que se trata de una actividad esencialmente creadora) en cargar un programa de cómputo electrónico y esperar sus resultados. El problema es totalmente al revés: un programa de cálculo electrónico, por sofisticado que sea, nunca es más que una herramienta para verificar que las ideas producidas y desarrolladas por el ingeniero son aceptables y dan una buena respuesta al problema que les dio origen.

Lo que terminamos de decir no debe malinterpretarse: el hecho de que existan programas de cálculo muy completos y abarcadores constituye una excelente ayuda para los buenos ingenieros —los que son capaces de generar soluciones originales para problemas también originales—, pues les permiten encarar proyectos más audaces y comprometidos. Pero esto tiene una contracara que no siempre —o casi nunca— se tiene en cuenta: el empleo de estos programas, que muchas veces requieren un especialista informático para operarlos, obliga a quien se sirve de ellos a saber mucha más ingeniería que antes. A diferencia de los programas electrónicos de dibujo técnico, que han sustituido totalmente a los antiguos dibujantes (los de paralelógrafo, compás y escuadra), los programas de cálculo jamás van a sustituir al ingeniero en su actividad creativa. Pero sí lo van a ayudar, y mucho, en la puesta en funcionamiento de modelos matemáticos más aproximados y, por consiguiente, más complejos, de los cuerpos que estudia.

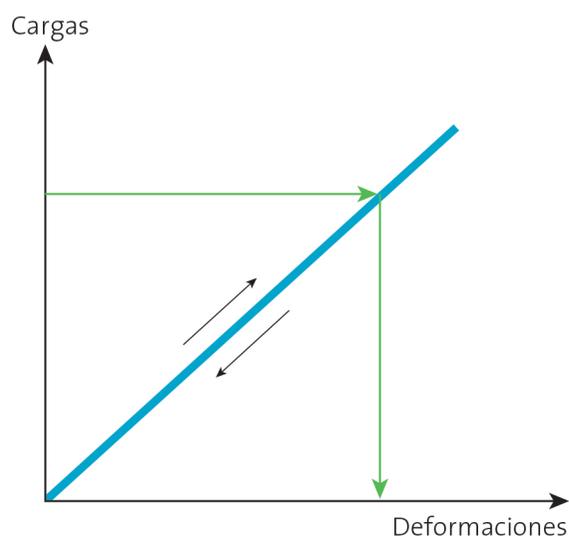
4. ACERCA DE LA RESISTENCIA DE LOS CUERPOS MATERIALES

El iniciador de los estudios referidos a la *resistencia de los cuerpos materiales* fue Galileo Galilei quien, a comienzos del siglo XVII, imaginó una ciencia que estudiara la fractura (hoy se dice, en general, resistencia o también rotura) de los cuerpos, a la que con el tiempo pasó a denominarse resistencia de materia-

les. Hoy sabemos que, dada la enorme variedad de materiales aptos para construir cuerpos capaces de transmitir cargas, no se los puede estudiar a todos mediante la misma ciencia. De hecho existen muchas *resistencias de los cuerpos materiales*, tantas como grupos de materiales con diferentes propiedades básicas, por ejemplo, acero, maderas, tierra, rocas, hormigón armado, etc. De todas formas, debido a la simplicidad de su planteo teórico y a la versatilidad de sus posibles aplicaciones, hay una que predomina netamente sobre todas las demás y que recibe el nombre¹⁴ de resistencia de materiales. Si bien solo es estrictamente aplicable a materiales como el acero cuando las estructuras construidas con él trabajan bajo cargas de servicio (por ejemplo, no se puede calcular en forma directa en ningún caso la seguridad a rotura de una estructura), dada la sencillez operativa que muestra, se la aplica a una gran variedad de materiales, incluso a materiales compuestos, como el hormigón armado, haciendo, naturalmente, las adaptaciones específicas que cada caso requiere.

La resistencia de materiales es una teoría hipotético-deductiva que debe la sencillez de sus procedimientos a la simplicidad de su hipótesis básica, pues supone que los materiales que constituyen las estructuras que con ella se pueden estudiar son continuos, homogéneos, isotrópicos y, fundamentalmente, linealmente elásticos. Este último supuesto, en el cual se apoya básicamente su simplicidad operativa, supone dos cosas esenciales (Figura 1): que las deformaciones que sufren los cuerpos son proporcionales a las cargas a ellos aplicadas y que todo el trabajo que se les entrega al cargarlos se transforma en energía interna de deformación, la cual se recupera como trabajo, sin ningún tipo de pérdida, si se le permite al cuerpo recobrar su estado inicial no deformado.¹⁵

Figura 1



5. FUNDAMENTO DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES DE BASE ELÁSTICA

A fin de evitar ambigüedades interpretativas, la resistencia de materiales elástica será denominada aquí Teoría de la Elasticidad, que es un nombre mucho más apropiado.

5.1. Hipótesis que fundamentan la Teoría de la Elasticidad

Si bien los cuatro postulados básicos enunciados en el apartado precedente delimitan con buena precisión las posibilidades de aplicación estructural de la Teoría de la Elasticidad, es decir, definen bastante bien el tipo de cuerpos materiales a los que les es aplicable, cuando se entra de lleno en estas aplicaciones (que no son otra cosa que rigurosos desarrollos matemáticos), dicha “buena” precisión en las posibilidades de su utilización va a resultar insuficiente y, para mejorarla lo necesario, habrá que plantear un conjunto bastante numeroso de hipótesis complementarias y definiciones específicas que lo posibiliten.^{16 17} Lo que se busca, al intentar fundar en forma matemáticamente adecuada la Teoría de la Elasticidad, es lograr que ella habilite el “estudio de las características resistentes de objetos que se describen por sus propiedades mecánicas, las que se adoptan como axiomas básicos de esta teoría”,¹⁸ lo que significa ajustar dicha teoría a los requisitos de una de las estructuras básicas de las matemáticas: la axiomática. Los “objetos” señalados no son otros que las estructuras resistentes, y la teoría nos conduce a la construcción de *modelos matemáticos* que las representen

adecuadamente. Luego, lo primero que debe discernirse es cuántos y cuáles son los *axiomas básicos* que se necesitan para definir sin ambigüedades el comportamiento resistente de las estructuras, en otras palabras, cuántos y cuáles son los axiomas básicos *necesarios* y *suficientes* para fundamentar la teoría, incluyendo como axiomas, como ya adelantamos, hipótesis y definiciones.

En este encuadre general, y en el marco que proveen la geometría de Euclides y la física de Newton, las hipótesis que fundamentan la Teoría de la Elasticidad son las siguientes:

5.1.1. Hipótesis básicas.¹⁹ Deben cumplirse en todas las aplicaciones de la teoría y establecen que los cuerpos que se estudian deben ser:

- 1) *Continuos*;
- 2) *Homogéneos*;
- 3) *Isótropos*;
- 4) Con *relación biunívoca* entre cargas y deformaciones;
- 5) Con *relación lineal* entre cargas y deformaciones;
- 6) Con *relación elástica* entre cargas y deformaciones;

5.1.2. Hipótesis complementarias. Se trata de hipótesis simplificadoras, en su mayoría utilizadas en el cálculo de *estructuras de barras*.

- 7) Las propiedades de los cuerpos son invariantes respecto al tiempo;
- 8) Los apoyos son indeformables;
- 9) En las estructuras de barras los *nudos* son indeformables;
- 10) Las deformaciones de las estructuras no tienen significación en los resultados;
- 11) En estructuras de barras no se toma en cuenta el trabajo de las fuerzas perpendiculares al eje de las barras;
- 12) Una sección normal inicialmente plana se mantiene plana hasta su rotura;
- 13) En las estructuras de barras sus deformaciones²⁰ están esencialmente originadas por los momentos flectores;
- 14) El principio de Barré de Saint-Venant se considera válido.

5.1.3. Definiciones. Están destinadas a aclarar conceptos y a facilitar la resolución de casos específicos.

- 15) *Cuerpo material*: porción finita de materia en estado sólido que tiene una forma espacial perfectamente determinada.
- 16) *Barra*: cuerpo con una de sus dimensiones bastante mayor que las dos restantes.
- 17) *Placas-láminas*: cuerpo comprendido entre dos superficies sensiblemente paralelas, con una de sus dimensiones bastante menor que las dos restantes.
- 18) *Eje de un cuerpo*: curva que une los centros geométricos de sus secciones.
- 19) *Superficie media de una placa o lámina*: superficie equidistante a las que delimitan al cuerpo.
- 20) *Estructura*: cuerpo, o conjunto de cuerpos vinculados entre sí de alguna forma, capaz de realizar *trabajo mecánico*.
- 21) *Estructura de barras*: estructura resistente cuyos componentes son barras.

- 22) *Carga*: acción originada en causas externas que produce en una estructura sea deformaciones, sea esfuerzos internos.²¹
- 23) *Suficientemente aproximado*: resultado, hipótesis o supuesto que, aplicado a una estructura determinada y en el marco de una determinada teoría, permite garantizar que el comportamiento mecánico que esta nos presenta concuerda bien con el del hecho físico que se quiere representar.
- 24) *Adecuada seguridad*: estructura cuya probabilidad de falla o colapso es igual o menor que la establecida.
- 25) *Cuerpo en equilibrio*: situación de un cuerpo cuyas deformaciones internas se corresponden con las cargas aplicadas, por lo que el estado de “equilibrio interno” es un estado que solo se altera si existe una causa externa que origine la alteración.

5.2. Explicación y fundamentación de las hipótesis hechas

El conjunto de los axiomas que terminamos de establecer para fundar la Teoría de la Elasticidad, y algunos de ellos particularmente, requieren ser analizados con cierto detalle para así comprender mejor sus fundamentos estructurales.²² De ello pasaremos a ocuparnos seguidamente.

Para comenzar, reiteremos que este conjunto de axiomas debe cumplir las siguientes condiciones de existencia, en su calidad de conjunto de *hipótesis básicas* de una teoría hipotético-deductiva: 1) los axiomas deben ser *compatibles entre sí*, es decir que, en base a ellos, no se pueda demostrar lícitamente una propiedad y su contraria; 2) los axiomas deben ser *independientes unos de otros*, en otras palabras, el conjunto no debe ser redundante.²³

Antes de comenzar a analizar y desarrollar los supuestos sobre los que se fundamenta y construye la Teoría de la Elasticidad, debemos recordar y reafirmar el marco de referencia en el cual esta teoría es válida, pues a las hipótesis que definen dicho marco también habrá que tenerlas en cuenta y respetarlas. En tal sentido, el planteo de la teoría se efectúa en un *espacio cartesiano* de tres (3) dimensiones espaciales y una (1) temporal, en el cual es válida la *geometría de Euclides* y la *física de Isaac Newton*, por lo que, además de las hipótesis específicas de la Teoría de las Elasticidad, vamos a suponer también la validez de las que sustentan la geometría euclidiana y las leyes de Newton, algunas de las cuales, como los principios de *inercia* y de *conservación de la energía*, las utilizaremos permanentemente. El primero de estos principios nos dice que los cuerpos sobre los que no actúan fuerzas están en reposo o se mueven recorriendo una línea recta a velocidad constante; el segundo, que la energía no se pierde, solo se transforma.

El principio de *conservación de la energía* establece que en un sistema cerrado –como podemos considerar al ámbito terrestre– la cantidad de energía existente se mantiene constante, no aumenta ni disminuye, solo se transforma de una manera de manifestarse a otra. Si bien, en la realidad, este problema es sumamente complejo, en los sistemas mecánicos puramente elásticos, como el que estamos estudiando, se simplifica enormemente porque nos ocuparemos solamente de dos de sus formas de manifestarse: 1) el *trabajo*, que es el producto de una fuerza por la distancia que ella recorre y que es el que realizan las cargas externas cuando el cuerpo sobre el que se las aplica se deforma, al que denominaremos en nuestro caso *trabajo mecánico externo* (U_e), y 2) la energía que el cuerpo acumula al deformarse, conocida como *energía elástica de deformación* (W_d), que es la energía almacenada en un cuerpo deformado y que se volverá a transformar en trabajo si se permite al cuerpo recuperar sus dimensiones iniciales.

5.2.1. Hipótesis básicas.²⁴ Deben cumplirse en todas las aplicaciones de la teoría, dado que constituyen su sustento esencial. En base a ello se postula que los cuerpos materiales que componen una estructura deben responder a las siguientes características:

- 1) Ser **continuos**, lo que significa que, cuando un cuerpo se deforma, no aparecen discontinuidades en su masa (por ejemplo, fisuras), ni existen superposiciones entre los elementos puntuales que lo componen.
- 2) Ser **homogéneos**, que quiere decir que en todos los puntos de su masa el cuerpo presenta las mismas propiedades; en el presente caso las mismas propiedades mecánicas.
- 3) Ser **isótropos**, lo que indica que en todas las direcciones pasantes por un punto cualquiera de la masa del cuerpo sus propiedades son las mismas.

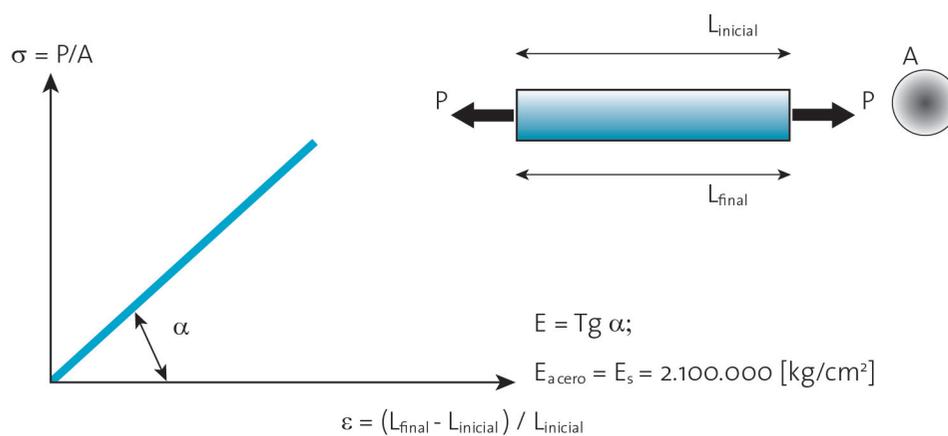
4) Mostrar, al ser solicitados, una **relación biunívoca**, o sea, única, entre las cargas aplicadas y las deformaciones por ellas producidas en el cuerpo considerado, la cual será siempre la misma, independientemente del tipo de carga de que se trate y del número de veces que se la haya aplicado al mismo cuerpo.

5) La relación entre cargas y deformaciones es **lineal**, por lo que se puede representar mediante una expresión de la siguiente forma:²⁵

$$y = K \cdot x \quad [1]$$

En ella la variable (x) representa las deformaciones, la variable (y) las cargas, y (K) es una constante de proporcionalidad —conocida como “módulo de deformación elástica” o también como “constante de rigidez”— cuyo valor depende del material que se haya utilizado para materializar el cuerpo, de las características geométricas de este y del tipo de carga actuante. Naturalmente, esta hipótesis se debe cumplir para cualquier tipo de carga que se aplique al cuerpo y, como al aplicar una carga a un cuerpo material este se deforma haciendo que la carga aplicada realice un trabajo, el tipo de deformación que sufra el cuerpo será el necesario para que la carga que la produce realice dicho trabajo. En consecuencia, si las cargas son fuerzas, las deformaciones serán variaciones de longitud y, si son momentos, serán rotaciones. En el presente caso, dadas las características de los cuerpos que se consideran, la aplicación del principio de conservación de la energía conduce a que el trabajo de las cargas aplicadas al cuerpo va a ser igual a la energía de deformación almacenada en él por esta causa.

6) La relación entre cargas y deformaciones es **elástica**, lo que implica que, al descargar, la energía de deformación acumulada en el cuerpo durante el proceso de carga se recupera íntegramente como trabajo mecánico.²⁶ En otras palabras, la fórmula [1] vale tanto para cargas como para descargas, independientemente del número de veces que este proceso de carga y descarga se repita. Por esto la constante “K” se denomina *módulo de deformación elástica*. En el caso particular de los esfuerzos axiales, a este módulo se lo conoce simplemente como *módulo de elasticidad* y se lo designa con la letra (E).²⁷ El valor numérico del módulo de elasticidad constituye una constante de cada material con comportamiento elástico, la que se utiliza comúnmente para caracterizarlo.



Este valor de “E” depende de un conjunto de parámetros, principalmente del tipo de material constitutivo del cuerpo y de las características geométricas de este.²⁸ En el caso del acero se denomina *módulo de elasticidad* al obtenido ensayando a tracción pura un cuerpo cilíndrico, perfectamente definido, denominado *probeta*.²⁹ En este caso, a fin de dar mayor generalidad al valor de “E”, las cargas de tracción aplicadas (P) se expresan por unidad de superficie, es decir, como “tensiones” ($\sigma = P/A$)³⁰ y las deformaciones sufridas por la probeta se expresan como “deformaciones específicas” (ϵ),³¹ con lo que la expresión [1] se transforma en:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad [2]$$

Como se puede observar en la Figura 2, el valor numérico de (E) corresponde al de la tangente del ángulo que forma, respecto del eje de las deformaciones, la recta que relaciona a estas con las cargas.

La importancia de (E) en los casos prácticos consiste en que los *módulos de deformación elástica* correspondientes a otros tipos de carga se pueden expresar en función de (E).

5.2.2. Hipótesis complementarias.³² Se trata de hipótesis simplificadoras utilizadas, la mayoría, en el cálculo de *estructuras de barras*. Normalmente restringen el campo de validez de los resultados obtenidos, por lo cual, al adoptarlas, hay que tener en cuenta estas consecuencias:

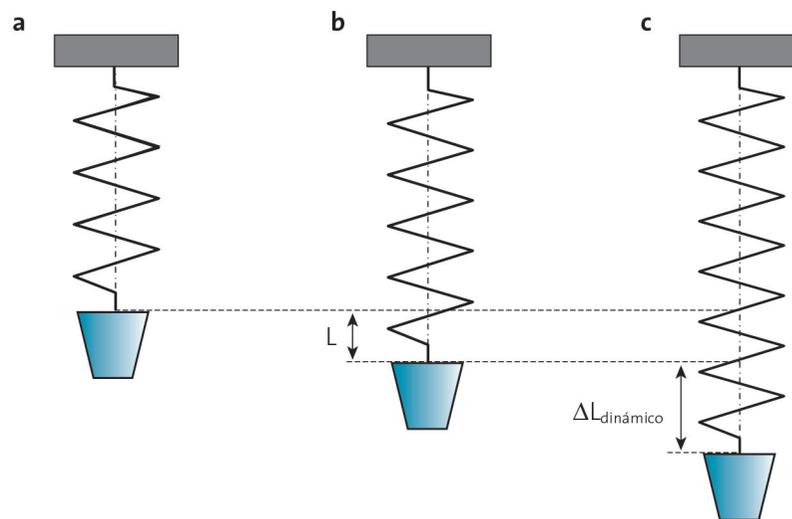
- 7) Tanto las propiedades geométricas como las físicas y, consecuentemente, las mecánicas de un cuerpo material se suponen invariantes en función del tiempo. Por consiguiente, el comportamiento resistente de los cuerpos materiales es también independiente del *tiempo*.

Esta hipótesis requiere algunas aclaraciones que permitan, por un lado, definir su campo de validez, pues no siempre se satisface, y, por otro, decidir cómo actuar en las situaciones en las que no se cumpla. Veamos entonces el problema un poco más en detalle:

Todos los cuerpos materiales sometidos a carga se deforman —en la naturaleza no existen sólidos perfectamente rígidos, es decir, con $E=\infty$ — y la concreción de estas deformaciones requiere un cierto tiempo, al que denominaremos (t_d). A su vez, la aplicación de las cargas también requiere un cierto tiempo —en la realidad física en que nos movemos tampoco existen cargas instantáneas—. Indicaremos con (t_c) a este tiempo cuyo valor depende del tipo de carga de que se trate y de las circunstancias en que ellas actúen.

Por su parte, diremos que un cuerpo está en *equilibrio mecánico* bajo un determinado estado de carga, cuando las deformaciones que presenta son las que corresponden, en el marco de la presente teoría, al estado de carga aplicado.³³ Si para un determinado estado de carga, cuyo tiempo de aplicación es [t_c], se tiene que para cualquier instante del proceso de su aplicación resulta [$K(t_c) > K(t_d)$],³⁴ entonces en todos los momentos del proceso de carga el cuerpo está en *equilibrio mecánico*. En estas condiciones el proceso es *independiente del tiempo*.

Figura 3



Si esto no ocurre, el efecto de las cargas sobre el cuerpo cargado se magnifica y se tienen los casos de “impacto”, en cuya discusión no entraremos. Para tratar de visualizar el significado de esta hipótesis, imaginemos un resorte cuya constante es “k” —esto significa que, para una carga ΔP , su alargamiento (ΔL) vale $(\Delta P/k)$ — y que está cargado con un recipiente que se llena de agua (Figura 3). En la Figura 3.a se tiene el sistema descargado. Si el recipiente se va llenando de agua lentamente (Figura 3.b), de forma que en cualquier instante (t_i) del proceso de carga sea $L(t_i) = k \cdot P(t_i)$, en todo momento el sistema está en *equilibrio mecánico*. Consecuentemente, el tiempo no interviene y tendremos un proceso de carga “normal” en el que la velocidad de deformación del resorte es siempre proporcional a la velocidad de aplicación de la carga. Si, por el contrario, el recipiente se llena muy rápidamente (Figura 3.c), el resorte se sobreestira en una longitud ($\Delta L_{\text{dinámico}}$) que, según el diagrama cargas-deformaciones implica un incremento de la carga de valor [$\Delta P_{\text{dinámico}} = \Delta L_{\text{dinámico}}/k$], este sobreestiramiento, que no corresponde a la carga realmente aplicada, genera en el resorte una fuerza opuesta que produce un acortamiento del mismo mayor que ($\Delta L_{\text{dinámico}}$), originándose vibraciones en él.³⁵ En este último caso la carga se magnifica produciéndose el fenómeno de “impacto” ya citado y, por consiguiente, la participación de la variable *tiempo* en la respuesta mecánica del cuerpo cargado.³⁶

8) Los *vínculos* o *apoyos*, que establecen puntos de contacto comunes a la estructura y al sistema de referencia en el que esta se materializa, son indeformables e indesplazables. En la realidad esto no ocurre, pero como la deformabilidad de los apoyos no tiene nada que ver con la de la estructura a la que vincula a tierra,³⁷ se los puede considerar “estructuras independientes” de la que les dio origen y, si en algún caso sus deformaciones no pueden despreciarse, sus efectos se consideran como “acciones externas”, que se conocen como *corrimientos de apoyos*.

9) En las estructuras de barras, los puntos de encuentro de dos o más componentes, denominados *nudos*, se consideran indeformables,³⁸ lo que implica que, por ejemplo, los ángulos entre dichos componentes no varían. Si en algún caso esto ocurriese, es decir, si el ángulo entre dos de las barras que llegan a un nudo varía, el efecto estructural de este hecho se incorpora al análisis como si fuese producido por una acción externa.³⁹

10) Las deformaciones producidas por las cargas son *despreciables*. Este supuesto se puede expresar diciendo que las deformaciones producidas por un sistema de cargas dado en una estructura determinada son magnitudes físicas que no tienen significación en el cálculo de las solicitaciones que dichas cargas producen en la estructura: son *insignificantes*, lo que implica que los cálculos se pueden efectuar a partir de la estructura *no deformada*, es decir, considerando la geometría que tiene antes de aplicársele las cargas. Este supuesto requiere algunas consideraciones adicionales a fin de evitar ambigüedades en su interpretación: **a)** para calcular las solicitaciones en una estructura hay que aceptar que, al cargarla, ella se deforma. Debido a esto las cargas aplicadas realizan *trabajo estructural* (el producto de cada una de las cargas actuantes por el desplazamiento, en la dirección de cada una de ellas, de sus puntos de aplicación). En consecuencia, si no hay deformación en los puntos de aplicación de las cargas, no hay *trabajo estructural*; **b)** más allá de ello, y salvo que se lo indique expresamente, en general se puede suponer con suficiente aproximación que las deformaciones que sufre la estructura por causa del sistema de cargas aplicado a ella no alteran en forma apreciable⁴⁰ las solicitaciones que dicho sistema ocasiona en ella si se la calcula en base a la estructura no deformada. En estas condiciones se dice que se opera en base a *cálculos de primer orden* o “lineales”. Hay que aclarar que el no cumplimiento de este supuesto no invalida la aplicación de la Teoría de la Elasticidad a la resolución de estructuras, porque aun en los casos en que las deformaciones no sean despreciables,⁴¹ se las puede resolver por métodos elásticos. Lo que ocurre en estas circunstancias, como veremos en el apartado 5.3, es que deja de ser válido el principio de superposición de resultados, lo cual complica bastante los procesos operativos.

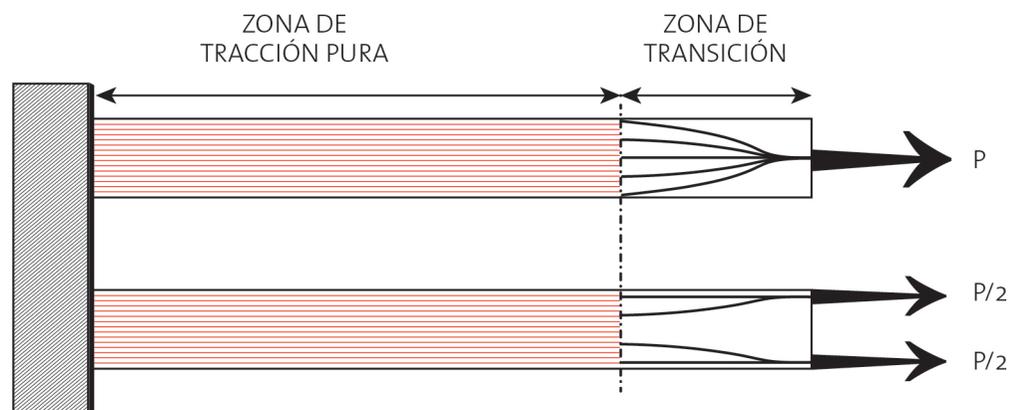
11) Salvo casos particulares específicos, en el cálculo de estructuras de barras no se toman en cuenta, en el *trabajo interno* de las barras, el trabajo que puedan realizar las tensiones normales (σ) perpendiculares a su eje.

12) Para el cálculo de los estados tensionales internos de una barra, en general se supone que *una sección normal*⁴² *inicialmente plana se mantiene plana durante todo el proceso de deformación del cuerpo*, incluso hasta llegar a su rotura. De ser necesario, esta hipótesis se puede sustituir por una menos restrictiva que diga que dos secciones normales suficientemente próximas que sean inicialmente planas se deforman de tal modo, al deformarse el elemento que las contiene, que se las puede superponer mediante una traslación adecuada.⁴³

13) Las deformaciones que sufre un cuerpo cargado están originadas por la acción de todas las solicitaciones que sobre él actúan, momentos flectores, esfuerzos normales, momentos torsores y esfuerzos de corte. En el caso de las estructuras de barras, normalmente se puede alcanzar una aproximación suficiente en los resultados considerando solo la acción de los momentos flectores, lo que simplifica mucho los procesos operativos. Cuando se emplee esta simplificación debe verificarse que en efecto sea aplicable.

14) El principio de Saint-Venant, que lleva el nombre de quien lo formulara, el matemático francés Barré de Saint-Venant, establece que: *Dados dos sistemas de cargas estáticamente equivalentes* (esto quiere decir que, en ambos casos, las cargas producen en la estructura considerada el mismo estado de sollicitación), *pero conformados por acciones diversas, aplicados a dos estructuras iguales, la influencia de esta diferencia solo se observa en la inmediata vecindad de los puntos de aplicación de las sollicitaciones y a una distancia suficiente de ellos no existe divergencia alguna en el estado tensional de las estructuras consideradas*. Para materiales efectivamente homogéneos, como podría ser el acero, Colonnetti (1941)⁴⁴ estima que la distancia necesaria para no tener ningún tipo de alteración es de 3 a 4 veces el mayor de los lados de la sección transversal de la barra. En materiales solo suficientemente homogéneos —o heterogéneos—, como sería el caso del hormigón, en general esta distancia se reduce a una vez dicho lado mayor.⁴⁵ En la Figura 4 se aplica este principio al caso de dos barras traccionadas mediante el análisis de las trayectorias de fuerzas en el interior de las mismas. Como se puede observar, estas solo difieren en la zona de transición, pero son exactamente iguales en el resto del elemento.

Figura 4



5.2.3. Definiciones.⁴⁶ Destinadas principalmente a aclarar conceptos y a facilitar también la resolución de casos específicos.

- 15) *Cuerpo material.* Porción finita de materia en estado sólido que tiene una forma espacial perfectamente determinada. Las propiedades mecánicas del cuerpo quedan definidas tanto por las propiedades geométricas de su forma espacial cuanto por las propiedades físicas del material que lo constituye. Si bien en los materiales que cumplen con las hipótesis básicas su masa es un continuo tridimensional, en algunas circunstancias del análisis estructural (por ejemplo, en el caso de los programas de cálculo con computadoras, pues para estas el del continuo resulta un problema inabordable) debe suponerse que el cuerpo está constituido por un conjunto finito de elementos espaciales finitos.
- 16) *Barra.* Cuerpo material con una de sus dimensiones bastante mayor que las dos restantes. Si bien la relación de dimensiones para que se tenga una barra depende del tipo de elemento estructural y del material de que se trate, puede suponerse que esto ocurre cuando la más grande de sus dimensiones es cuatro (4) o más veces mayor que la mayor de las restantes. En estos casos la barra puede ser representada por su eje sin cometer errores de significación. Este eje, pese a ser matemáticamente una línea, conserva estructuralmente las propiedades mecánicas y geométricas de las secciones rectas del elemento estructural al que representa: área, momento estático, momento de inercia. Si la relación anterior no se cumple, no es aplicable al cuerpo la teoría de barras y deberá considerárselo como bidimensional, entre otras cosas porque deja de cumplirse la hipótesis de mantenimiento de las secciones planas.
- 17) *Placas-láminas.* Cuerpo material comprendido entre dos superficies sensiblemente paralelas (planas en el caso de las placas y curvas en el de las láminas) con una de sus dimensiones bastante menor que las dos restantes. Si bien la relación de dimensiones para que esto ocurra depende del tipo de elemento estructural y material de que se trate,⁴⁷ puede suponerse que esto ocurre cuando la menor de sus dimensiones es seis (6) o más veces menor que la que le sigue en magnitud, por lo que el cuerpo puede ser representado por su *superficie media* sin cometer errores de significación. Esta superficie media, a pesar de ser matemáticamente una superficie sin espesor, conserva estructuralmente las propiedades mecánicas y geométricas de las secciones rectas⁴⁸ del elemento estructural al que representa: área, momento estático, momento de inercia. Si esta relación no se cumple, no es aplicable al cuerpo la teoría de placas y deberá considerárselo como tridimensional.
- 18) *Eje de un cuerpo material.* En el análisis de las estructuras que satisfacen las presentes hipótesis su eje es la curva que une los centros geométricos de sus secciones y, por consiguiente, coincide con el eje geométrico.⁴⁹
- 19) *Superficie media de una placa o lámina.* Superficie equidistante a las que delimitan al cuerpo. En el caso de las placas es un plano (plano medio) y en el de las láminas, una superficie curva (superficie media).
- 20) *Estructura.* Todo cuerpo material —o conjunto de cuerpos vinculados entre sí de algún modo— capaz de realizar *trabajo mecánico* resistiendo cargas y *trasladándolas* entre diferentes puntos del espacio.
- 21) *Estructura de barras.* Estructura resistente cuyos elementos componentes son barras.

22) *Carga*. Toda acción originada en causas externas⁵⁰ que produce sea deformaciones, sea esfuerzos internos en la estructura. Las más comunes son las fuerzas y los momentos, pero también son consideradas cargas, en el caso de estructuras estáticamente indeterminadas, los efectos de temperatura y los movimientos de los apoyos fijos.

23) *Suficientemente aproximado*. Resultado, hipótesis o supuesto que, aplicado al modelo matemático de una estructura determinada, permite garantizar que este va a simular un comportamiento mecánico cuya diferencia con el de la estructura real va a estar comprendido dentro de valores aceptables.

24) *Adecuada seguridad*. Se dice que una estructura posee “adecuada seguridad” cuando su probabilidad de falla es igual o menor que la aceptada en los códigos correspondientes⁵¹ o la expresamente especificada para la obra de que se trate.

25) *Cuerpo material en equilibrio*. Si se aplica una carga a un cuerpo rígido con apoyos también rígidos, el equilibrio es instantáneo, independientemente de cómo se apliquen las cargas. En otras palabras, durante el proceso de carga el sistema siempre está en equilibrio. Estos son los que podríamos denominar resultados de la estática y no son más que idealizaciones matemáticas sin sentido físico. Pero, si se trata de cuerpos reales, es decir, *deformables*, entramos en el campo de las resistencias de materiales, aun cuando sigamos suponiendo que los apoyos son rígidos. En estas condiciones la deformabilidad de un cuerpo material, que se materializa mediante el reacomodamiento de sus elementos componentes en un nivel inferior de observación (cristales, moléculas, átomos), implica un proceso temporal que insume un cierto tiempo y lo mismo ocurre con la aplicación de las cargas (ver hipótesis 7). Por lo tanto, diremos que *un cuerpo material está en equilibrio* cuando, además de estar sometido a un sistema de cargas con resultante nula —en estos casos, como ya vimos, la resultante de las cargas o acciones externas es igual y contraria a la resultante de las reacciones—, en todo instante su estado de deformación se corresponde con el tipo de carga aplicado. Esto quiere decir que el estado de deformación no va a cambiar si las cargas actuantes no lo hacen.⁵²

26) *Estado de referencia de un cuerpo*. Podríamos tomar como *estado de referencia* para el análisis del comportamiento mecánico de un cuerpo su estado descargado o, lo que en este caso es lo mismo, su estado no deformado, aceptando que un cuerpo elástico está en *estado descargado*, o en *estado no deformado*, cuando los diferentes elementos de volumen que lo componen y los diferentes elementos superficiales que lo limitan no están sujetos a la acción de ninguna fuerza externa. Sin embargo, como no es fácil decidir en la realidad cuándo un cuerpo está descargado en el sentido en que acabamos de definirlo,⁵³ en consecuencia, tomaremos como *estado de referencia* de un cuerpo material el estado de equilibrio interno a partir del cual se aplican las cargas cuyo efecto en él se quiere averiguar.⁵⁴

6. ELEMENTOS Y BASES DE ANÁLISIS DE LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD

Cuando las estructuras se hacen complejas, como ocurre con la gran mayoría de las que nos encontramos en la realidad, para encarar su resolución se debe recurrir a métodos de análisis más poderosos: algunos de los más conocidos son los métodos energéticos. Estos métodos deben su nombre a que se basan en el *principio de conservación de la energía*, el cual, en el presente caso, se puede expresar de la siguiente forma: *El trabajo realizado por las fuerzas externas actuantes sobre una estructura (U_e) se transforma en la energía de deformación (U_i)⁵⁵ que se desarrolla cuando la estructura se deforma para lograr su equilibrio.⁵⁶* De él surgen las herramientas más poderosas para el análisis estructural. Dedicaremos el presente apartado al estudio de algunos de estos métodos. En lo que hace a los teoremas de uso más generalizado, solo los describiremos sin entrar en su demostración, pues ello escapa al marco del presente artículo. De todos modos, en cada caso se indica dónde encontrar su demostración.

A partir de la definición anterior quedó claro que en el presente texto solo nos ocuparemos de dos tipos de energía: el *trabajo* (U_e), que es el producto de una fuerza por la distancia que ella recorre, y la *energía elástica de deformación* (U_i), que es la energía almacenada en un cuerpo deformado, la que se vuelve a transformar en *trabajo* cuando al cuerpo se lo libera. Esta *energía elástica de deformación* está biunívocamente relacionada con los estados de deformación de los cuerpos deformables. Las expresiones matemáticas de ambos tipos de energía son las siguientes:

$$\begin{array}{ccc}
 x_2 & & \\
 U_e = \int_{x_1} F \cdot dx; & U_i = \int \phi \cdot dV & [3] \\
 x_1 & & v
 \end{array}$$

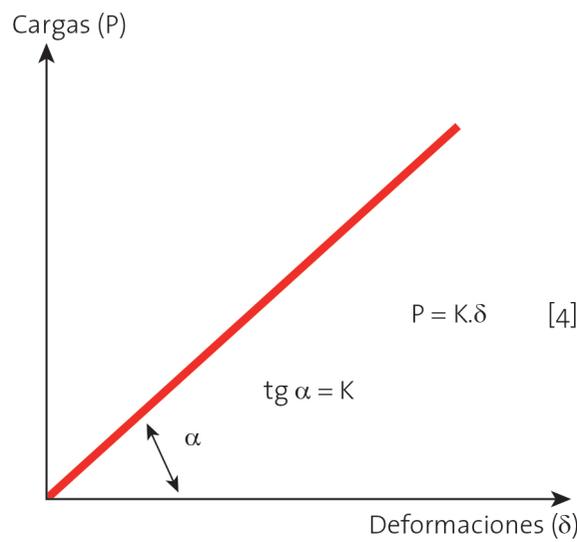
Donde (φ) es función de las seis componentes de deformación de un cuerpo en el espacio: $\varphi = \varphi(\varepsilon_x; \varepsilon_y; \varepsilon_z; \gamma_{yz}; \gamma_{zx}; \gamma_{xy})$; y la integración se efectúa en todo el volumen del cuerpo. El concepto de *trabajo de una fuerza* es evidente y no requiere mayores explicaciones: Es el producto de la fuerza aplicada por la deformación del cuerpo en su punto de aplicación y en su dirección. Lo mismo ocurre con el de *energía interna de deformación*; energía que se determina a partir del estado de referencia (Ver nota 4 al final).

6.1. Trabajo de las fuerzas externas y energía interna de deformación

En los materiales con comportamiento mecánico de tipo lineal-elástico, la relación entre las cargas aplicadas y las deformaciones que ellas producen es una recta si se la representa en un diagrama de cargas-deformaciones, cualquiera sea el tipo de carga considerado y cualquiera sea el número de procesos de cargas y descargas que haya habido previamente (Figura 8).

En estas condiciones, las deformaciones totales (δ) producidas por las cargas⁵⁷ provocan, por un lado, que estas realicen un determinado *trabajo* (U_e) y, por otro, que el cuerpo al deformarse almacene *energía de deformación* (U_i), la que volverá a transformarse en trabajo cuando la carga se retire.⁵⁸

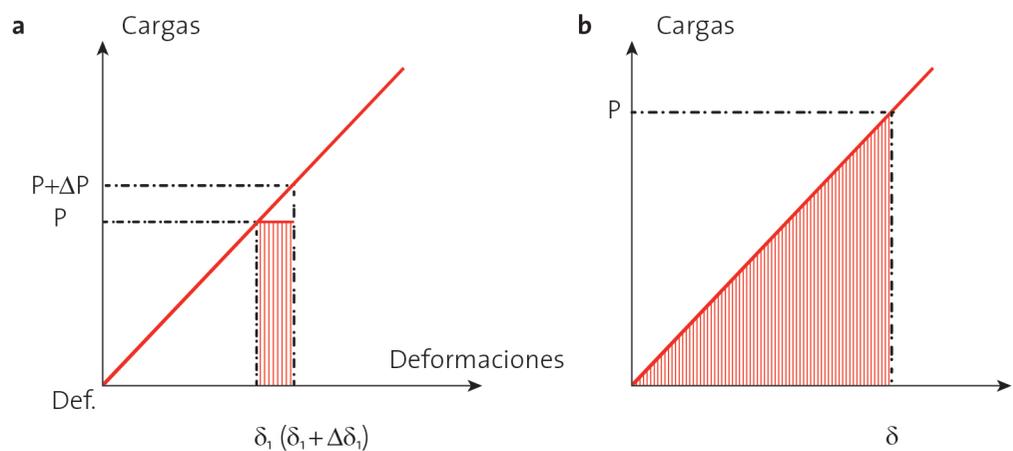
Figura 5



Sea entonces una carga (P) que se incremente en una magnitud (ΔP) suficientemente pequeña (Figura 6.a), la deformación del cuerpo cargado pasa entonces de valer (δ) a valer ($\delta + \Delta\delta$) y, despreciando los infinitésimos de orden superior, el trabajo realizado por (P) resulta ser:

$$\Delta U = P \cdot \Delta\delta \tag{5}$$

Figura 6



Haciendo tender a cero los valores incrementales y generalizando el resultado, se tiene que:

$$dU_e = P \cdot d\delta \tag{6}$$

El trabajo total que realiza la fuerza (P) desde el instante en que se la aplica hasta que llega a un valor (P) genérico, suponiendo que en todos los instantes del proceso existe equilibrio entre las cargas actuantes y las deformaciones que bajo ellas se producen, vale:

$$U_e = \int_0^{\delta} P \cdot d\delta = P \cdot \delta / 2 \quad [7]$$

o

Que corresponde al triángulo rayado de la Figura 6.b.

Tratándose de un cuerpo elástico y suponiendo que la carga aplicada (P) es una fuerza (N) que origina en la estructura solicitaciones axiales,⁵⁹ las deformaciones (ΔL) son variaciones de longitud —alargamientos o acortamientos— (Figura 7), y la relación entre ellas se puede escribir de dos maneras distintas, despejando en cada caso una u otra de las magnitudes en juego — ΔL y N— a partir de la relación que las vincula, la que se obtiene de la expresión [4] cuando se sustituyen las cargas por tensiones normales ($\sigma = N/A$) y las deformaciones (δ) por variaciones de longitud específica ($\Delta L/L$), quedando la conocida fórmula que las relaciona: $\sigma = E \cdot \epsilon$, luego:

$$(N/A) = E \cdot (\Delta L/L)$$

Si se toma como variable independiente (ΔL), se tiene

$$N = (\Delta L \cdot A \cdot E) / L \quad [8]$$

Y si es (N):

$$\Delta L = (N \cdot L) / (A \cdot E) \quad [9]$$

Expresiones cuyos componentes tienen el significado siguiente:

L: longitud inicial del cuerpo que se deforma tomada en la dirección de la carga.

A: área del cuerpo que se deforma considerada perpendicularmente a la dirección de la carga.

E: valor del módulo de deformación elástico, o módulo de elasticidad, cuando la carga aplicada es una fuerza axial.

N: carga aplicada (fuerza axial).

ΔL : variación de longitud producida ($\Delta L = L \cdot \epsilon$).

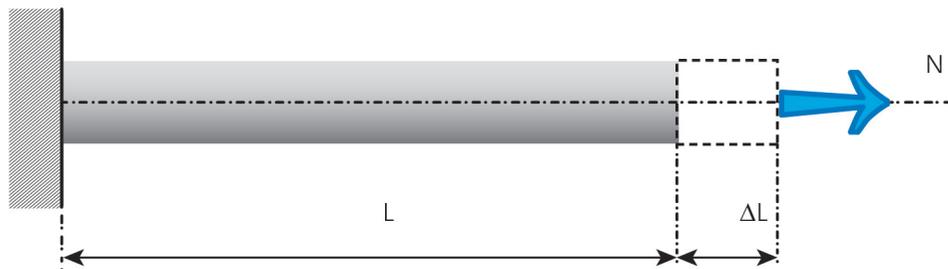


Figura 7

Las fórmulas [8] y [9] nos permiten calcular el *trabajo de las cargas externas* o la *energía elástica* acumulada en el interior del cuerpo debidos a las deformaciones que sufre al aplicarle las cargas, haciéndolo en función de las variaciones de longitud que sufre la pieza o del valor de la carga aplicada, respectivamente. Ello es posible en base al *principio de conservación de la energía*, que postula la igualdad entre trabajo de las fuerzas externas y energía de deformación elástica almacenada en el cuerpo debido a ellas.

$$\Delta L$$

$$U = U_e = U_i = (A.E/L) \int \Delta L. d\Delta L = \Delta L^2.A.E / 2.L \quad [10]$$

o

P

$$U = U_e = U_i = (L/A.E) \int P. dP = P^2.L / 2.A.E \quad [11]$$

o

6.2. Teorema del trabajo mínimo⁶⁰

Este teorema expresa que, en un cuerpo en condiciones de equilibrio, *las tensiones internas producidas por un sistema dado de fuerzas externas son aquellas que hacen mínimo el trabajo de deformación.*

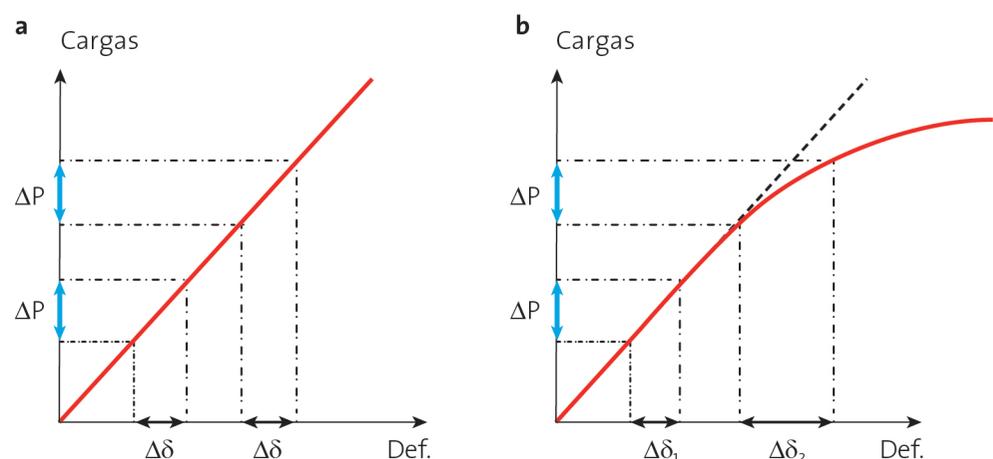
Para demostrarlo se procede de la siguiente forma: tomando como base el estado de deformación que se calcula por medio de la Teoría de la Elasticidad para un estado de carga dado que actúa sobre un cuerpo determinado, se supone que dichas tensiones se incrementan infinitesimalmente, pasando de un estado de deformación $(\psi)^{61}$ a otro $(\psi + \Delta\psi)$. En estas condiciones se demuestra que la variación (ΔU_i) del trabajo interno de deformación que sufre el cuerpo es siempre positiva, de donde resulta evidente que el trabajo interno de deformación calculado según la Teoría de la Elasticidad *es un mínimo.*

6.3. Principio de superposición de efectos y límites de su aplicación

Este principio lo desarrollaremos completo por dos motivos: por un lado, porque resulta imprescindible para el planteo de la Teoría de la Elasticidad tal como la conocemos y su empleo en sus desarrollos es permanente y, por el otro, porque es esencial (la demostración) para comprender los límites de aplicación de esta teoría.

Cuando sobre una estructura actúa un conjunto de cargas, el principio de superposición de efectos expresa que *la deformación de una estructura originada por la totalidad de las cargas actuando simultáneamente es igual a la suma de las deformaciones producidas por todas y cada una de las cargas actuando en forma individual.* En otras palabras, este principio expresa que el valor de la deformación producida por una cualquiera de las cargas no depende del estado de deformación preexistente —no depende de si ya han actuado, o no, algunas o la totalidad de las restantes cargas del conjunto—. El *principio de superposición*, que configura una herramienta teórica de gran potencia en los procesos de cálculo de estructuras resistentes, solo es válido en el caso de elementos estructurales en los que se cumpla la hipótesis de que existe una relación lineal elástica entre cargas y deformaciones, cualquiera sea el tipo de carga aplicada, lo que representa una fuerte limitación a sus posibilidades de uso.

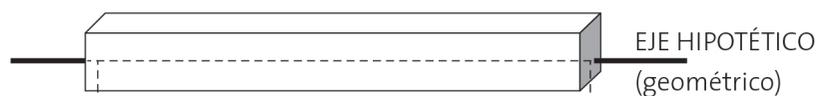
Figura 8



La demostración del principio de superposición es inmediata pues, como se puede observar en la Figura 8.a, si la relación cargas-deformaciones es lineal, un incremento de carga de valor (ΔP) produce siempre un incremento de deformación de valor ($\Delta \delta$), independientemente del estado de carga a partir del cual se aplique (ΔP), cosa que no sucede si la relación entre cargas y deformaciones no es lineal (Figura 8.b). En consecuencia, a partir de este razonamiento parecería poder demostrarse que el cumplimiento de la *hipótesis de linealidad* es condición necesaria y suficiente para que el principio de superposición sea válido. Esta afirmación debe ser debidamente justificada.

Debemos considerar entonces, con cierto detalle, cuál es el significado estructural de la *hipótesis de linealidad*, que constituye una propiedad mecánica de las estructuras que no todas poseen, aun siendo elásticas. Recordemos que las propiedades mecánicas de una estructura dependen de dos factores: **a)** del material con el que esté construida y **b)** de su configuración geométrica. Además, nos vamos a encontrar con que, en estructuras construidas con el mismo material, las propiedades mecánicas no siempre son las mismas. Por un lado, pueden variar en función del tipo de sollicitación actuante y, por otro, según las características geométricas de la estructura que se considere.

a. ESTRUCTURA REAL: UNA BARRA RECTA



b. MODELO MATEMÁTICO DE LA BARRA



c. EJE REAL DE LA BARRA (mecánico)



Figura 9

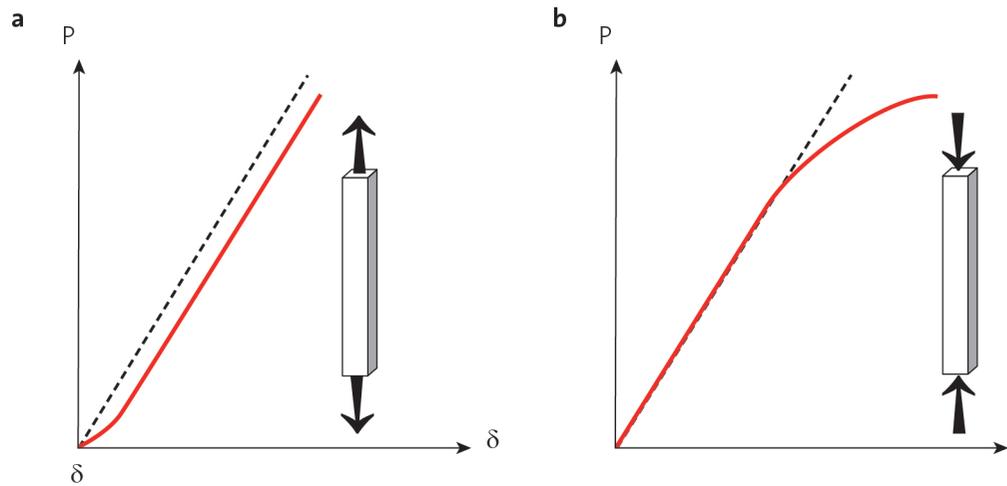
En el primer caso (no linealidad originada en el tipo de sollicitación actuante) el comportamiento *no lineal* se origina en el hecho de que la hipótesis de que el material es *homogéneo* constituye siempre una aproximación, pues en la realidad no existe ningún material absolutamente homogéneo en el *nivel ingenieril* de análisis. Siempre hay heterogeneidades que, por pequeñas que sean, pueden tener consecuencias estructurales significativas según el tipo de sollicitación de que se trate. En este caso, en las estructuras reales ocurre lo siguiente: en función de la hipótesis de homogeneidad, resulta que el eje de una barra prismática de sección constante y directriz recta es recto (Figura 9.a), por lo que su modelo matemático es una recta (Figura 9.b), pero en la práctica ingenieril, y debido a la heterogeneidad del material que constituye la barra considerada, el eje *mecánico* de la pieza va a ser una curva indefinida que se desarrolla en torno al eje recto hipotético (Figura 9.c).

Esto último trae como consecuencia que, si se aplica a la barra una sollicitación axial, ella, además de estar sometida a esfuerzos normales, lo estará también a un estado indefinido de flexión, debido a la presencia de estas deformaciones inevitables. Es decir que, en la realidad, va a trabajar a flexión compuesta. Si la sollicitación aplicada es de tracción, estos momentos flectores tienden a “enderezar” el eje real, el cual, cuanto mayor sea la sollicitación de tracción actuante, más se va a acercar a su modelo matemático (Figura 10.a). Por el contrario, si se aplica a la barra una sollicitación axial de compresión, el estado de sollicitación de flexión que esta origina debido a las imperfecciones del eje real conduce a un aumento progresivo de dichas imperfecciones y se termina finalmente en el campo de los fenómenos de pandeo⁶² (Figura 10.b). Este proceso —consecuencia del aumento progresivo de la carga axial— origina un incremento de las sollicitaciones de flexión, debido al aumento que él mismo origina en la magnitud de los efectos de las imperfecciones. Estas sollicitaciones crecientes de flexión que aparecen causan un incremento aún mayor de las excentricidades originadas por las imperfecciones, lo que conduce a que, a partir de un cierto valor de la carga de compresión, la no linealidad del proceso de carga que se desarrolla deja de poder ser ignorada y, en consecuencia,⁶³ a iguales incrementos de carga se tendrán cada vez mayores incrementos de deformación y el principio de superposición deja de poder ser aplicado.

Como queda claro, la heterogeneidad real que presentan todos los cuerpos materiales⁶⁴ hace que la hipótesis de linealidad elástica no se cumpla exactamente en los casos reales.

Aparece acá una característica interesante de las barras comprimidas: si son poco esbeltas (para entendernos digamos “si son suficientemente cortas”) se rompen por agotamiento de su capacidad portante y el análisis se reduce a considerar las secciones por separado. Pero si son esbeltas llegan a su colapso por pandeo, es decir, por rotura de su equilibrio interno, antes que dicho agotamiento resistente se produzca. En esta segunda situación ya no es suficiente con verificar la resistencia de las secciones; hay que considerar la pieza en su conjunto, incluyendo en ello la forma en que se vincula con el resto de la estructura de la que forma parte.

Figura 10

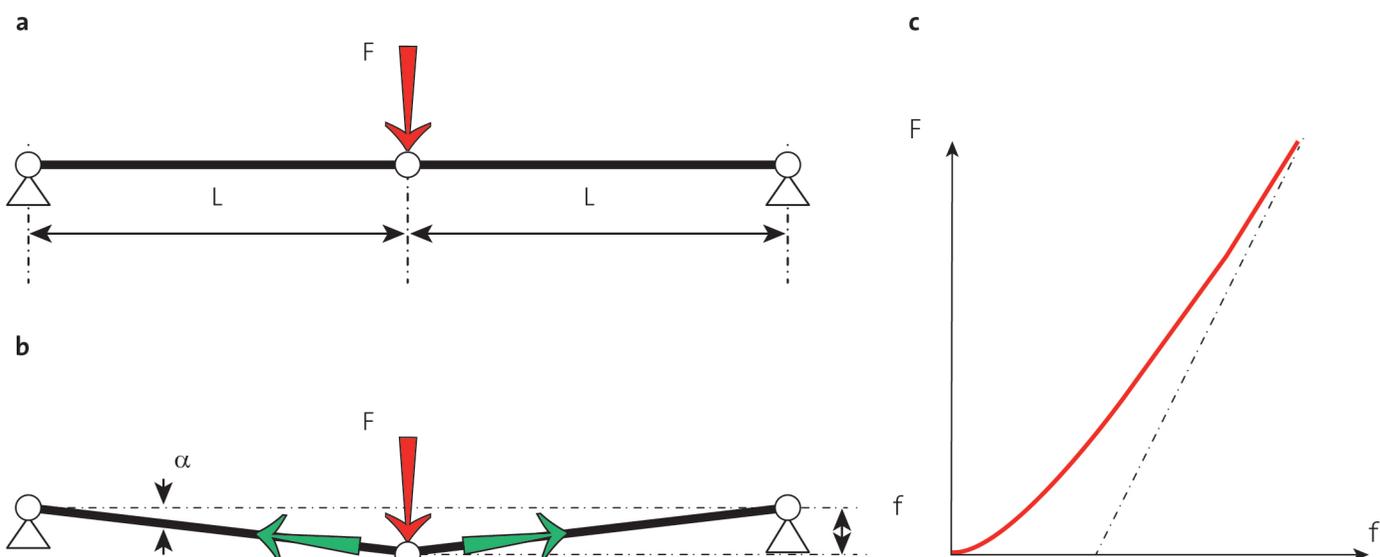


En la segunda de las situaciones señaladas (incidencia de la geometría de la estructura en el origen de la no linealidad), nos vamos a encontrar con que hay geometrías estructurales que son causantes de la no linealidad. En el siguiente ejemplo (Figura 11.a), en el que se presenta una estructura constituida por dos barras horizontales iguales unidas mediante una articulación y con apoyos fijos en sus extremos restantes, se trata de elementos traccionados en los que, como vimos, se puede ignorar la heterogeneidad del material. En este caso, la equilibrante de la carga actuante está generada por la componente vertical de la sollicitación de tracción en las barras que constituyen la estructura (Figura 11.b):

$$F = 2 \cdot N \cdot \text{tg } \alpha \tag{12}$$

En la posición inicial, con ambas barras horizontales, la estructura es totalmente incapaz de equilibrar la carga aplicada, por lo que la curva cargas-deformaciones es horizontal en su origen (tangente al eje de abscisas) y, al comenzar a actuar la carga —una fuerza vertical aplicada en la articulación central—, se produce una primera deformación que es suficientemente grande como para generar el equilibrio buscado (Figura 11.c). Luego, a medida que la carga aumenta, a iguales incrementos de ella se tendrán aumentos de la deformación cada vez menores y, para cargas grandes, la curva que relaciona a estas con las deformaciones tiende a linealizarse y el proceso comienza a ser cada vez más parecido a uno en el que se cumpla la hipótesis de linealidad.

Figura 11



Como conclusión podemos decir que, para que el principio de superposición se cumpla, las deformaciones que producen las cargas actuantes no deben modificar, en forma apreciable, la sollicitación por ellas originada. Para decidir esto no hay normas escritas, solo criterios generales, como los expuestos y, fundamentalmente, la buena formación y la experiencia del proyectista.

Como vemos, hay estructuras que son causantes de la no linealidad, como las columnas y los arcos, y otras que tienden a preservarla.

6.4. Principio de los trabajos virtuales⁶⁵

Este principio, desarrollado por el matemático francés Jean Bernoulli en 1717, proporciona un método general para calcular alargamientos, acortamientos y cambios de pendiente en cualquier punto de una estructura. Teniendo en cuenta que, precisamente, estos son los datos que se deben conocer para poder prever el comportamiento bajo carga de una estructura, resulta evidente su importancia capital en la Teoría de la Elasticidad.

El principio de los trabajos virtuales se puede enunciar del siguiente modo: *En una deformación virtual de un cuerpo elástico que se encuentra en equilibrio, el trabajo virtual de las cargas aplicadas exteriormente es igual al trabajo virtual de las fuerzas interiores originadas por aquellas, o energía de deformación.* Una *deformación virtual* es una deformación posible,⁶⁶ pero imaginaria, producida por una *carga virtual*; o sea, una carga posible pero imaginaria.

a) Se tiene un cuerpo con apoyos suficientes como para que resulte indesplazable;

b) El cuerpo está sometido a un conjunto de (n) cargas externas $[P_i]$, con $(i=1, 2, 3, \dots, n)$ independientes unas de otras, y cuya resultante no es nula;

c) El equilibrio del cuerpo se logra mediante las reacciones originadas en los (m) apoyos $[R_j]$, (con $j=1, 2, 3, \dots, m$) cuya resultante es igual y de sentido contrario a la de las cargas aplicadas;

d) Se considera solo "el trabajo de las cargas exteriores" pues al ser, por hipótesis, los apoyos *indesplazables e indeformables*, las reacciones no están en condiciones de realizar ningún trabajo.

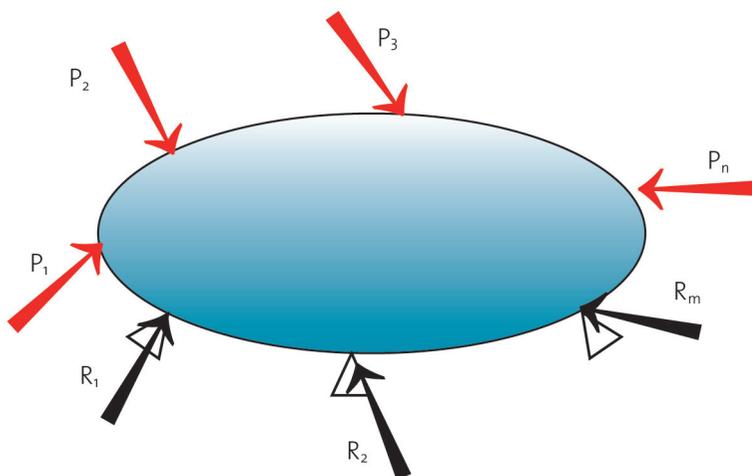


Figura 12

e) Por el *principio de conservación de la energía*, el trabajo de una carga externa cualquiera es igual a la energía de deformación que se almacena en el cuerpo originada en las deformaciones que dicha carga produce en él;

f) Siendo válido el *principio de superposición de efecto*, no interesa el orden en que comiencen a actuar las cargas, pudiendo hacerlo simultáneamente o no.

g) En consecuencia, el trabajo que realizan las cargas aplicadas a un cuerpo que sufre una *deformación virtual* viene dado por la siguiente expresión:

$$U_e = (P_1 \cdot \delta_1 + P_2 \cdot \delta_2 + \dots + P_n \cdot \delta_n) \quad [13]$$

Dado que en los cuerpos lineales elásticos los desplazamientos (δ) son funciones lineales de

las cargas (P)⁶⁷ y viceversa, la expresión [13] se puede expresar como una función cuadrática de los desplazamientos o como una función cuadrática de las fuerzas exteriores, expresiones [14] y [15] respectivamente.

$$U = K.(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2) \tag{14}$$

$$U = (1/k).(P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2) \tag{15}$$

6.5. Teorema de Castigliano

El teorema de Castigliano⁶⁸ expresa que *si la energía de deformación de un sólido con comportamiento mecánico lineal elástico sometido a la acción de un sistema de cargas (P_1, P_2, \dots, P_n) totalmente independientes unas de otras, se expresa como una función de los desplazamientos ($\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$) que sufren las cargas según su dirección, la derivada parcial de la energía de deformación respecto a un desplazamiento singular cualquiera da como resultado la fuerza correspondiente a este último.* Su expresión matemática es la que sigue:

$$P_i = \partial U / \partial \delta_i \tag{16}$$

Si tenemos en cuenta que un *trabajo virtual* (ΔU) puede obtenerse tanto dando un incremento virtual ($\Delta \delta_i$) a (δ_i) como dando un incremento virtual (ΔP_i) a (P_i), nos encontramos con que, en este último caso, el teorema de Castigliano toma la forma siguiente: *Si se expresa la energía de deformación de un cuerpo con comportamiento mecánico lineal elástico, como función de las cargas exteriores (P), se encuentra que la derivada parcial de la energía de deformación respecto a una de estas fuerzas exteriores da como resultado el desplazamiento de esta fuerza en su dirección.*⁶⁹ Es decir:

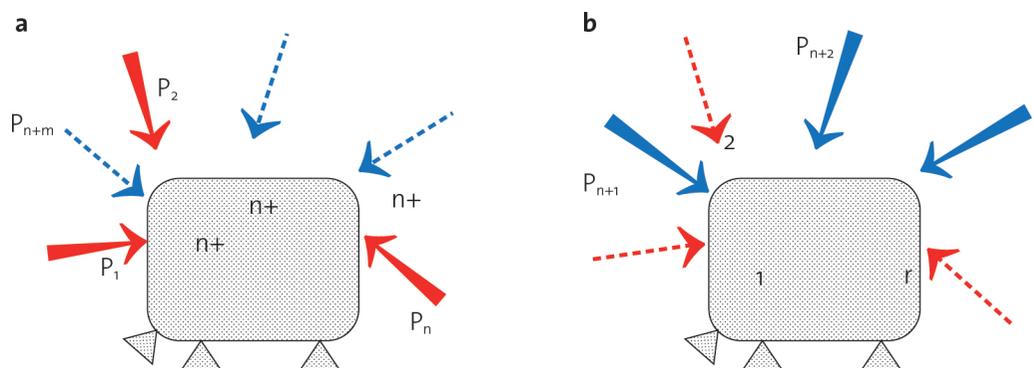
$$\partial U / \partial P_i = \delta_i \tag{17}$$

6.6. Teorema de Maxwell

El *teorema de Maxwell* o *teorema de reciprocidad*⁷⁰ afirma que (Figura 13): *Si sobre un cuerpo material con comportamiento mecánico lineal elástico, actúan dos conjuntos de fuerzas distintos (P) con ($i=1, 2, \dots, n$) (Figura 13.a) y (P_j) con ($j=n+1, n+2, \dots, n+m$) (Figura 13.b), el trabajo que realizan las fuerzas pertenecientes al primer conjunto debido a las deformaciones que producen en el cuerpo las pertenecientes al segundo es igual al trabajo que realizan las fuerzas del segundo conjunto debido a las deformaciones que producen en el cuerpo las pertenecientes al primero.* Es decir:

$$\begin{aligned} (P_1 \cdot \delta''_1) + (P_2 \cdot \delta''_2) + \dots + (P_n \cdot \delta''_n) &= \\ &= (P_{n+1} \cdot \delta'_{n+1}) + (P_{n+2} \cdot \delta'_{n+2}) + \dots + (P_{n+m} \cdot \delta'_{n+m}) \end{aligned} \tag{18}$$

Figura 13



Según las necesidades o conveniencias operativas del problema a resolver, todo conjunto de dos o más cargas puede fraccionarse en dos conjuntos, para los cuales es válido el teorema de reciprocidad.

7. CONCLUSIONES

La Teoría de la Elasticidad no es solo una hermosa teoría matemática, si la juzgamos por la elegancia de sus demostraciones. Es, además, una herramienta de trabajo hoy por hoy insustituible para todo proyectista que busque entender cómo responde, al cargarla, la estructura que está proyectando.

Ello se debe a la relativa simplicidad de los modelos matemáticos que plantea: pese a no ser en muchos casos cuantitativamente precisos para muchos cuerpos materiales, son suficientemente precisos *cualitativamente* como para que el proyectista pueda apoyarse en ellos para *pensar* su estructura. Una vez definida esta, de ser necesario, existen innumerables instrumentos de cálculo para ajustar sus resultados todo lo que sea necesario, pero siempre en base a un tipo estructural previamente *pensado*.

Volviendo al comienzo, en el proyecto de una estructura, cuya etapa inicial dijimos que debe poderse cumplir solo con papel y lápiz, la herramienta que se usa en la enorme mayoría de los casos es la Teoría de la Elasticidad, debido a lo adecuada que resulta para *pensar* con su ayuda.⁷¹

8. BIBLIOGRAFÍA AMPLIATORIA

Existen innumerables textos y tratados actuales que se ocupan de la Teoría de la Elasticidad, muchos de ellos excelentemente diagramados y con gran cantidad de ejemplos de aplicación bien desarrollados. Pero, para el lector que realmente quiera profundizar sobre estos temas, nuestro consejo es que recurra a los iniciadores de su desarrollo, por ejemplo:

[1] Stephan Timoshenko: *Resistencia de materiales*, cuya primera edición en inglés es de mayo de 1930 (la primera traducción al castellano fue editada por Espasa-Calpe en 1954). Es el más completo y accesible de los textos que se pueden consultar en castellano.

[2] Gustavo Colonnetti: *Scienza delle Costruzioni*, editado por Giulio Einaudi en Turín en 1941. Recomendable por el rigor de sus demostraciones para el estudio de ciertos temas en particular. No conocemos que exista edición en castellano.

[3] Kurt Beyer: *Estática del hormigón armado*, editado inicialmente en alemán en 1927. Hay traducción al castellano editada por Nigar en Buenos Aires en 1957. Un texto muy completo, pero demasiado denso y de lectura ardua, por lo que no es aconsejable como texto guía pero sí para encontrar las respuestas que no se encuentren en otros lados.

NOTAS

1. Una aproximación a la resistencia de materiales.
2. Para convencerse trate de imaginar el lector un mundo sin sólidos.
3. A las que ya hemos definido como cuerpos materiales capaces de transmitir cargas entre diversos puntos del espacio.
4. El concepto de “estructura descargada”, tal como lo emplearemos en este texto (ver apartado 5), requiere algún tipo de aclaración: se lo puede definir, según Colonnetti (1941), como “un cuerpo en el cual los distintos elementos de volumen que lo componen y los diferentes elementos de superficie que lo limitan no están sujetos a la acción de ninguna fuerza exterior”. Sin embargo, es más general decir que, cuando se estudia el efecto sobre una estructura dada de un estado de carga también dado, se puede suponer que la estructura “está descargada” cuando este estado aún no ha comenzado a actuar. Esto no debe interpretarse como que sobre la estructura no actúa, previamente, ninguna carga, pero, de acuerdo con el Principio de superposición, que veremos más adelante, se puede estudiar el

efecto sobre una estructura de un sistema de cargas, independientemente de las cargas que ya estén actuando sobre ella, por ejemplo, su peso propio, siempre y cuando la estructura no se aparte de su comportamiento lineal elástico. Además, experimentalmente no podemos saber con certeza cuándo una estructura está descargada. Todo lo que es dable conocer son las variaciones que sufre cuando se le aplica un estado de cargas dado a partir de un estado previo de *equilibrio interno*, es decir, de un estado de deformación que no varía con el tiempo. Sustituiremos, en consecuencia, el concepto de “estructura descargada” por el de “estructura de referencia”.

5. Un “punto” es un concepto matemático sin realidad física.
6. Weinberg, S. (2011). *El sueño de una teoría final*. Barcelona: Crítica.
7. Es necesario agregar el calificativo “resistentes”, pues, a partir de la corriente de pensamiento conocida como estructuralismo, que se desarrolló fundamentalmente durante el siglo XX, existen “estructuras” de los más diversos tipos, sobre todo en el campo de las humanidades.

8. Por algo existe un refrán que dice: “Una cadena siempre se rompe por su eslabón más débil”.
9. Cuántos hilos van a romperse antes que se rompa el cable depende básicamente de dos factores: el número de hilos que lo componen y la dispersión en los resultados de la resistencia a rotura por tracción de cada uno de ellos.
10. La energía de la fuerza que se aplica, el trabajo que ella realiza, siempre se transforma en otro tipo de energía, cinética, en el primer caso, y de deformación, en el segundo.
11. La explicación que sigue ha sido tomada principalmente de la obra de Badiou, A. (2009). *El concepto de modelo*. Buenos Aires: La Bestia Equilátera.
12. La noción de “modelo” (M) de una teoría física (T) se caracteriza como una estructura de la forma: $M = (\text{Mat.}, \text{Exp.}, t)$ consistente en una parte matemática (Mat.), una parte experimental (Exp.) y una función de traslación (t) que asocia una interpretación matemática a elementos de la parte experimental (Maria Luisa Dalla Chiara: “Meaning and theoretical inter-relations in exact sciences”).
13. Chaitin, G. (2015). *El número omega*. Barcelona: Tusquets.
14. No del todo apropiado pero que el uso continuo ha convalidado. En este artículo, para evitar malas interpretaciones, en general, emplearemos el nombre mucho más adecuado de Teoría de la Elasticidad.
15. Si bien este tipo de comportamiento no se da nunca en la naturaleza, hay muchos cuerpos reales, como es el caso de los resortes, que se le aproximan mucho.
16. Algo similar ocurrió con la geometría de Euclides, inicialmente desarrollada sobre la base de cinco hipótesis básicas, pues, cuando el notable matemático alemán David Hilbert la analizó con precisión a principios del siglo XX, encontró que en realidad se empleaban en su desarrollo veinte hipótesis y/o definiciones. Según el también destacado matemático francés Henri Poincaré, estos términos, hipótesis y definiciones son equivalentes y así los consideraremos.
17. Dado que la Teoría de la Elasticidad es una teoría matemática, resulta necesario expresar los conceptos físicos que se utilicen con suficiente detalle. A este respecto existe una anécdota imaginaria que vale la pena recordar: Viajan en tren por Escocia un filósofo, un físico y un matemático y, cuando ven por la ventanilla una oveja negra, el filósofo anota en su libreta “en Escocia las ovejas son negras”, el físico anota en la suya “en Escocia hay una oveja negra” y el matemático escribe “en Escocia hay al menos una oveja que tiene al menos un costado negro”.
18. Esta es la definición de teoría hipotético-deductiva que propone Nicolas Bourbaki y que hemos adaptado a nuestro caso particular: la descripción del comportamiento resistente de los cuerpos materiales. En consecuencia, las únicas propiedades que interesan son las mecánicas.
19. A fin de que cada uno de los principios básicos que se adoptan incluya, en sí, un único concepto o propiedad de los cuerpos que se analizan, la cuarta de las propiedades enunciadas al comienzo de este apartado, que comprende tres conceptos diferentes, se ha dividido en tres hipótesis distintas.
20. Es decir, la energía de deformación almacenada en el cuerpo cargado.
21. Toda estructura que realiza “trabajo resistente” se carga y se deforma. La diferencia que se plantea tiene que ver con el hecho determinante del trabajo estructural: si se le aplica una carga, la estructura reacciona buscando su equilibrio, deformándose; si por el contrario se le aplica una deformación, ella reacciona cargándose.
22. Las propiedades estructurales que les dieron origen.
23. Esto implica que, en el marco de la teoría, ninguna de las hipótesis pueda ser deducida de otra u otras.
24. Enunciadas en el apartado 5.1.1.
25. La cual, en geometría analítica, representa una línea recta.
26. Como se trata de un proceso idealizado, esto ocurre sin ningún tipo de pérdida (es lo que se desprende matemáticamente de las hipótesis hechas).
27. También se lo conoce como “Módulo de Young”.
28. Las cuales se encuentran normalizadas.
29. El valor que se obtiene en estos ensayos se define, estadísticamente, como igual a 2.100.000 kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) o 210 gigapascales (GPa).
30. Esta sustitución solo es útil si para cada valor determinado de la carga (P) el de la tensión (σ) resulta constante, cosa que queda garantizada por la hipótesis de homogeneidad del material. Las tensiones no se pueden determinar experimentalmente, por lo que se suele decir que no existen en la realidad.
31. La “deformación específica” es la relación entre el alargamiento que sufre la probeta y su longitud inicial (L), por lo que: $\epsilon = (L_{\text{final}} - L_{\text{inicial}}) / L_{\text{inicial}}$. Igual que en el caso de las tensiones, las deformaciones específicas teóricas son constantes todo a lo largo de un elemento dado como consecuencia lógica de la hipótesis de homogeneidad del material. En la realidad, para cualquier material que se considere, esto es solo una aproximación.
32. Enunciadas en el apartado 5.1.2.
33. Recordemos que un cuerpo material está en *equilibrio estático* cuando el conjunto de todas las cargas que sobre él actúan, tanto activas como reactivas, tiene resultante nula.
34. Donde (κ) es la proporción de la carga total que se ha aplicado hasta el instante considerado.
35. Imagínese un péndulo que es sacado de su posición de equilibrio y luego se deja libre. Este trata de volver a dicha posición de equilibrio, pero, cuando llega a ella, tiene una velocidad angular que hace que lo sobrepase, con lo que vuelve a estar fuera de equilibrio, pero ahora hacia el lado opuesto al del desplazamiento inicial. A partir de acá se repite la secuencia originándose en el péndulo un movimiento de tipo vibratorio.

36. Es por este motivo que los efectos de impacto, así como todo otro comportamiento estructural en el que el tiempo no pueda ignorarse, se consideran como casos particulares.
37. Lo que haría sumamente engorroso y sin mayores beneficios el incluirlos en el cálculo de la estructura. Este es uno de los motivos que fundamentan la presente hipótesis.
38. Por motivos semejantes a los de la hipótesis anterior.
39. Llegado el caso se puede hacer la misma hipótesis respecto de la unión entre dos o más placas.
40. Lo que significa que las alteraciones en el trabajo estructural que estas deformaciones originan son despreciables.
41. Esto significa que, para el mismo sistema de cargas, las solicitaciones calculadas en base a la estructura deformada son sensiblemente diferentes a las calculadas con esta sin deformar.
42. En un *cuerpo prismático* se denomina “sección recta” o “sección normal” a la figura que se obtiene cortando la pieza con un plano perpendicular a su eje.
43. En los casos prácticos esto complica las cosas puesto que hay que definir, por ejemplo, qué se va a entender por “suficientemente próximas”. Por motivos de este tipo es preferible utilizar, siempre que se pueda, la hipótesis más simple de “mantenimiento de las secciones planas” tal como fue inicialmente expuesta.
44. Colonnetti, G. (1941). *Scienza delle costruzioni*. Turin: Einaudi.
45. En la generalidad de los casos prácticos se puede hacer esta suposición también para el acero y materiales similares, dado que el error que así se comete no es significativo.
46. Expuestas en el apartado 3.2.3.
47. Por ejemplo, de sus condiciones de apoyo.
48. Sección recta: sección de una placa obtenida cortándola con un plano perpendicular a su plano medio.
49. Según el tipo de sollicitación y de material de que se trate, el *eje de una pieza* puede definirse de diferentes maneras. Por ejemplo, en los materiales heterogéneos y, con más razón, en los compuestos, habrá un *eje geométrico* (definido de la forma en que terminamos de hacerlo) y un *eje mecánico* que en elementos acortados uniformemente es la curva que une los puntos de aplicación de las resultantes de compresión de cada sección.
50. Al suponerse invariables las propiedades del cuerpo, todas las acciones que sobre él actúan se consideran externas, ajenas a él, es decir, a sus propiedades mecánicas. Incluso vamos a considerar externas las causas reológicas o térmicas, las cuales producen cambios en la geometría del cuerpo causados por efectos que no dependen de sus propiedades intrínsecas.
51. El cálculo de la seguridad de una estructura es un problema estocástico que debe encararse mediante la teoría de probabilidades. En una sociedad organizada el riesgo que implique la probabilidad de falle de una estructura debe ser coherente con los riesgos que esa misma sociedad está dispuesta a aceptar como consecuencia de otras actividades sociales: accidentes aéreos o automovilísticos, inundaciones, incendios, etc.
52. Esto se puede expresar diciendo que el proceso de aplicación de las cargas insume un tiempo mayor o igual que el que necesita el proceso de deformación del cuerpo cargado. Si esto no fuese así, van a aparecer efectos de “impacto” (ver hipótesis 7).
53. En la realidad resulta imposible tener certeza de ello. Por este motivo, la definición dada resulta inaplicable y en general se la puede sustituir por la que sigue.
54. Esto lo podemos hacer en el campo de la Teoría de la Elasticidad pues solo se la utiliza en condiciones elásticas “ilimitadas” (en realidad no se hace ningún tipo de hipótesis sobre qué es lo que pasa cuando este tipo de comportamiento se supera). En la realidad hay que actuar con suma prudencia, en estos casos, para evitar que la suma del estado de referencia más el correspondiente a las cargas aplicadas nos lleve a superar el límite del comportamiento elástico.
55. O trabajo interno realizado por la estructura.
56. Para lograr el equilibrio entre las fuerzas actuantes sobre el cuerpo y las deformaciones que este sufre.
57. (δ) es una deformación de tipo genérico y representa la que sufre el cuerpo cuando se considera toda su longitud, la cual, si la carga aplicada es una fuerza axial, es una variación de longitud (ΔL) , si se aplica una fuerza cortante, es una distorsión (γ) y, si se aplica un momento, es una rotación (θ) .
58. Una buena forma de visualizar este hecho la constituyen los resortes.
59. Se pueden plantear desarrollos similares para todos los tipos de sollicitación y sus combinaciones.
60. Demostrado por primera vez por Federico Menabrea, del Politécnico de Torino, en 1858. Su demostración se puede encontrar en G. Colonnetti.
61. Donde $\psi = \psi (\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy})$.
62. El pandeo es la falla de un elemento comprimido (por ejemplo, una columna) por rotura de su equilibrio interno y no por rotura de una de sus secciones. Es un fenómeno que abarca a la pieza en su conjunto.
63. El valor de este límite depende de una serie de factores, como la esbeltez de la barra, que por ahora no analizaremos.
64. Cosa que resulta imposible de evitar en la práctica pues es una característica intrínseca de los materiales reales. Con aleaciones especiales estos defectos se pueden reducir en cierta medida, pero es imposible eliminarlos.
65. Se lo puede considerar equivalente, en el dominio de la resistencia de materiales, al *principio de los desplazamientos virtuales* que se emplea en el estudio del equilibrio estático de los cuerpos y que se puede expresar de la siguiente forma: *Si un cuerpo se halla en equilibrio bajo un determinado conjunto*

de cargas externas —esto implica que su resultante es nula—, la suma algebraica de los trabajos de todas las fuerzas que actúan sobre él debe ser nula para cualquier desplazamiento virtual del mismo. Un desplazamiento virtual es un desplazamiento imaginario y arbitrario pero posible.

66. Es físicamente posible pues debe respetar las condiciones de vínculo de la estructura.

67. Según expresión [4].

68. Cuya demostración puede encontrarse en S. Timoshenko. Ver bibliografía ampliatoria.

69. Algunos autores denominan a esta segunda forma de expresar el teorema de Castigliano como “segundo teorema de Castigliano”.

70. Su demostración puede consultarse en S. Timoshenko.

71. No parece sencillo querer “pensar” una estructura basándonos en un programa de computadora.

Luis J. Lima es profesor emérito de la UNNOBA y se desempeña como director del Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Sostenible (IIDS) y del Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LEMEJ). Asimismo, es presidente de la Academia de la Ingeniería de la Provincia de Buenos Aires. Entre el 2003 y el 2007 fue rector organizador de la UNNOBA y fue presidente de la Universidad Nacional de La Plata entre 1992 y 2001. Es Honorary Life Member (miembro honorario vitalicio) de la Federación Internacional del Hormigón (FIB) y Fellow de la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (RILEM).

CÓMO, CUÁNTO, CUÁLES Y POR QUÉ: UN ANÁLISIS DE LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS DE LA PALEOMASTOZOLOGÍA ARGENTINA

EDGARDO ORTIZ JAUREGUIZAR
PAULA POSADAS

La investigación científica en la República Argentina posee una gran tradición. Como ha señalado Mario Albornoz (un destacado especialista argentino en política y gestión de la ciencia, la tecnología y la educación superior), los primeros grupos de investigación científica reconocibles como tales en el país surgieron en los comienzos del siglo XX y tuvieron su localización institucional en las universidades públicas, sobresaliendo especialmente aquellos de las universidades de Buenos Aires, La Plata y Córdoba. En líneas generales, según este autor la etapa de madurez y visibilidad internacional de la ciencia argentina se alcanza durante las décadas de 1950 y 1960 y continúa, no sin altibajos, hasta la actualidad. Prueba de ello es el otorgamiento del Premio Nobel a Bernardo Houssay en 1947, a Luis Leloir en 1970 y a César Milstein en 1984 (Albornoz, 2004).

En 1999, la entonces Secretaría de Ciencia y Tecnología dio a conocer un informe en el que se evaluaba el nivel de desarrollo de los grupos de investigación de la Argentina en cuanto a la actividad científica y la formación de los recursos humanos. Ese informe, producto del trabajo de unos seiscientos investigadores reunidos en cuatro comisiones (ciencias exactas y naturales; ciencias agrarias, ingenierías y materiales; ciencias biológicas y de la salud; y ciencias sociales y humanidades) abarcó cincuenta disciplinas y más de cuatrocientas áreas temáticas. Los resultados obtenidos fueron valorados según categorías ordenadas desde desarrollo alto hasta insuficiente. De las cuatrocientas áreas temáticas, solo cinco recibieron la máxima calificación: la paleontología, la investigación en materiales para uso nuclear, la catálisis en ingeniería química, los materiales con conducción iónica y los semiconductores (*La Nación*, 1999).

Más recientemente, la Academia Nacional de Ciencias, la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y la Secretaría de Articulación Científico Tecnológica del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva dieron a conocer un estudio sobre la situación actual de las ciencias exactas, físicas y naturales en la Argentina (en particular, de diez disciplinas: astronomía, biología de sistemas, ciencias de la computación, física, geología, matemática, oceanografía, paleontología, química, y química biológica y biología molecular) en el que se refleja la valoración de los científicos sobre la realidad de sus disciplinas y su visión sobre la evolución deseable de las mismas (Vallés, 2015a). En las conclusiones generales del documento se indica que, en comparación con el resto de los países analizados, la paleontología es la única disciplina argentina en la que la producción científica por millón de personas económicamente activas es casi del mismo orden que aquella de los demás países del mundo (Vallés, 2015b).

En el mismo documento se concluye que la revista *Ameghiniana* (editada por la Asociación Paleontológica Argentina) es la mejor posicionada en el ámbito internacional de las diez revistas nacionales analizadas para el quinquenio 2010-2014 (Vallés, 2015b).

Las razones por las que la paleontología ha alcanzado tan destacada ubicación en el conjunto de las ciencias argentinas han sido explicadas clásicamente por causas vinculadas con las particulares caracterís-

ticas del territorio argentino (uno de los más ricos en fósiles del mundo), la importante tradición cultural del país y la presencia de una figura de la talla de Florentino Ameghino (Reig, 1981). Sin embargo, ya en épocas más recientes, signadas por el impacto que el instrumental y la tecnología (en resumidas cuentas, el dinero) han tenido sobre todas las ciencias, la paleontología argentina ha sabido mantener (e incluso extender) su posición de liderazgo en el concierto mundial porque, en gran medida, un buen artículo paleontológico sigue dependiendo básicamente de los hallazgos y de las capacidades intelectuales de los científicos.

Como en toda disciplina con una larga e importante tradición científica, varios investigadores han estudiado la historia de la paleontología argentina. El lector interesado podrá hallar diversos estudios y enfoques en la literatura paleontológica especializada, pero una buena síntesis de ellos (respaldada con abundante bibliografía) puede hallarse en los artículos publicados en los números de la revista *Publicación Especial de la Asociación Paleontológica Argentina* dedicados a conmemorar los veinticinco y los cincuenta años de dicha sociedad científica^{1,2} y los cincuenta años de la revista *Ameghiniana*.³

En el marco contextual precedente, se aborda en este artículo el estudio de la paleomastozoología, es decir, la rama de la paleontología que se ocupa de estudiar los mamíferos. A diferencia del enfoque seguido en los trabajos previos, en esta oportunidad el foco no está puesto en los cultores de la disciplina ni tampoco en lo publicado por ellos en alguna revista científica de la especialidad; aquí los datos provienen de las comunicaciones sobre mamíferos realizadas a lo largo de la historia de las Jornadas Argentinas de Paleontología de Vertebrados (JAPV). Las primeras jornadas surgieron en 1984 —en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP)— como respuesta a la necesidad de los paleontólogos de vertebrados de crear un foro de discusión específico donde intercambiar experiencias, discutir ideas, planificar actividades conjuntas o simplemente saber qué se estaba haciendo en la disciplina en el país.

Las JAPV tienen una periodicidad anual (solo se suspendieron en tres oportunidades) y se realizan en el mes de mayo en diferentes ciudades del país. De este modo, entre 1984 y 2015 se realizaron veintinueve jornadas (Tabla 1); todas ellas han sido analizadas en este estudio. Así, a lo largo de poco más de tres décadas, este foro refleja la actividad de los profesionales que cultivan las diferentes subdisciplinas de la paleontología de los vertebrados, reuniendo en un solo lugar a becarios de grado y posgrado, investigadores jóvenes y consagrados, así como a técnicos y profesionales de apoyo.

Algo que no puede perderse de vista es que no todas las comunicaciones presentadas en una reunión científica necesariamente van a verse plasmadas en la publicación de un artículo en una revista científica. Aunque efectivamente muchas de ellas terminen en un artículo, puede suceder que transcurra un período de tiempo más o menos extenso, ya sea por la maduración natural que requiere un artículo científico, por los tiempos que cada revista necesita para publicar un artículo, o porque un artículo puede haber pasado por una cadena más o menos larga de rechazos en diferentes revistas antes de ser aceptado por aquella en donde finalmente será publicado. Incluso es común que muchas comunicaciones nunca lleguen a ser publicadas: muchas veces el interés del autor es simplemente discutir frente a sus colegas una idea o un proyecto en marcha; otras veces las observaciones del público asistente cambian el trabajo o hacen que se desista de avanzar en él, y aun otras porque, luego de presentada, una comunicación deviene parte de un artículo más amplio. A pesar de estas falencias, estudiar aquello que los investigadores comunican en las reuniones científicas ofrece algunas ventajas: de esa manera, se está más cerca de su quehacer cotidiano, al tiempo que se concentra en un solo lugar lo que los científicos luego publicarán en diferentes revistas.

Además de la diferente fuente de información, otra importante diferencia de este estudio con los que lo preceden es el enfoque cuantitativo. En efecto, aquí se analizan fundamentalmente tendencias y proporciones a partir del recuento de las presentaciones, los autores, los temas abordados y los períodos del tiempo geológico considerados. Más específicamente, en este estudio se responden los siguientes interrogantes: 1) ¿Cómo y cuánto varió a lo largo del tiempo el número de comunicaciones?; 2) ¿Cómo y cuánto varió a lo largo del tiempo el número de autores?; 3) ¿Cómo y cuánto varió a lo largo del tiempo el número de autores por comunicación?; 4) ¿Cuál es la procedencia geográfica de los autores?; 5) ¿Cuál es y cómo varió a lo largo del tiempo la relación entre autores hombres y mujeres?; 6) ¿Cuáles son los principales temas de estudio?; 7) ¿Cómo y cuánto variaron dichos temas a lo largo del tiempo?; 8) ¿Cuáles han sido los intervalos temporales más estudiados?; y 9) ¿Cómo se distribuyen los estudios entre los grandes grupos taxonómicos?

Desde luego, estas no son las únicas cuestiones que pueden abordarse en un estudio como el presente, pero, en un espacio por necesidad acotado y teniendo en cuenta que el lector no necesariamente será un paleomastozoólogo, puede darse una visión balanceada de cuestiones de actualidad, no solamente en la propia disciplina (como, por ejemplo, la procedencia geográfica de los autores y las temáticas abordadas), sino también en estudios que tratan cuestiones más generales de la ciencia (como, por ejemplo, la cuestión de género o las coautorías).

COMUNICACIONES Y AUTORES

A lo largo del intervalo 1984-2015 (Figura 1) se produjeron 1748 comunicaciones en las JAPV, de las cuales 706 correspondieron a mamíferos. Esta distribución, bastante homogénea, permite apreciar que los mamíferos son los vertebrados a los cuales se dedica la mayoría de las comunicaciones (los reptiles les siguen en importancia, con un promedio que supera ligeramente el 37%).

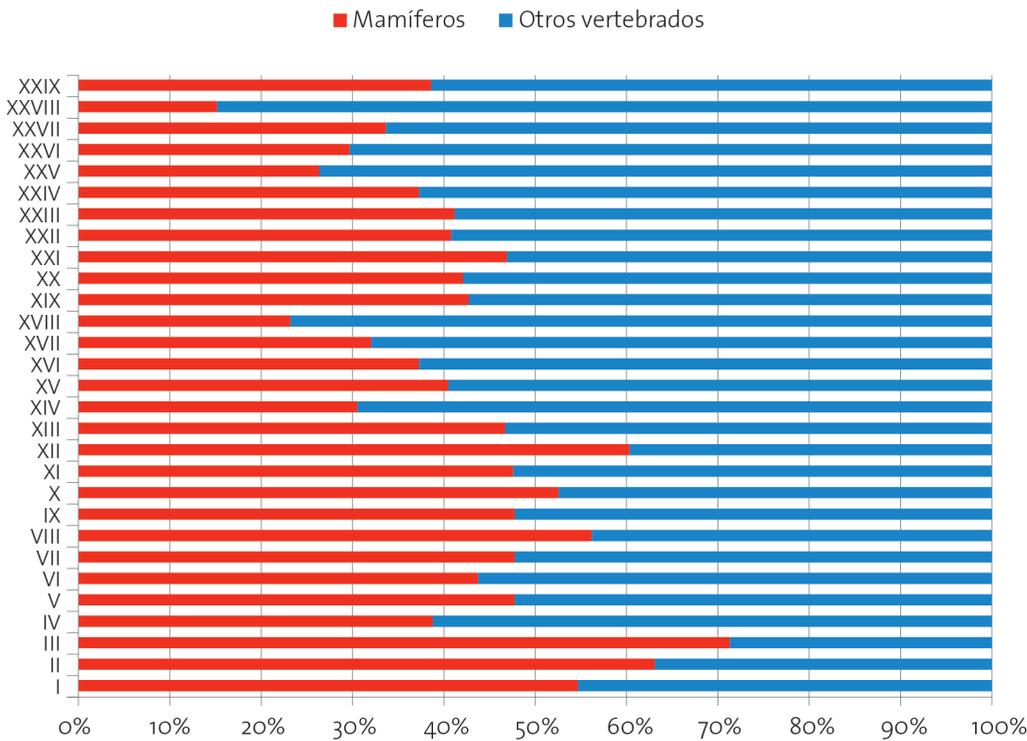


Figura 1. Cantidad de comunicaciones sobre mamíferos en relación con los restantes vertebrados (en porcentaje) a lo largo de las 29 JAPV.

En cuanto a los valores absolutos (Figura 2), la distribución de las comunicaciones dedicadas a los mamíferos muestra una mayor heterogeneidad respecto a los valores porcentuales, con frecuentes disminuciones y aumentos. Los valores máximos se alcanzan en las JAPV V (23), XI (31), XX (43) y XXIV (51), en tanto que los mínimos se registran en las JAPV IV (7), XVIII (10) y XXVIII (8). En general, se aprecia una muy leve tendencia a incrementar el número de comunicaciones a lo largo del tiempo; en este sentido, los valores alcanzados en las primeras cinco jornadas se duplican durante el lapso que media entre las JAPV X y XIX, triplicándose entre las JAPV XX y XXIV, para luego regresar a los valores previos hacia el final del período estudiado (Figura 2).

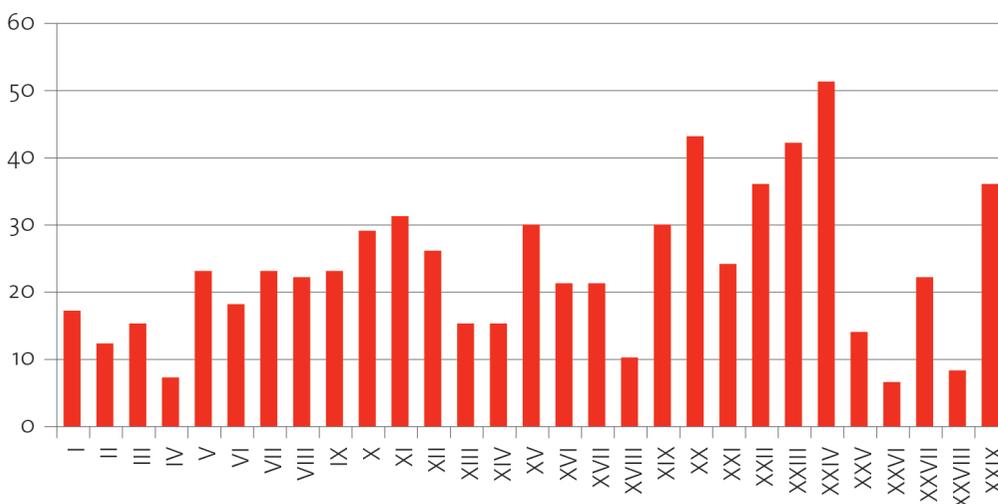


Figura 2. Cantidad de comunicaciones sobre mamíferos (en valor absoluto) a lo largo de las 29 JAPV (Número total: 706).

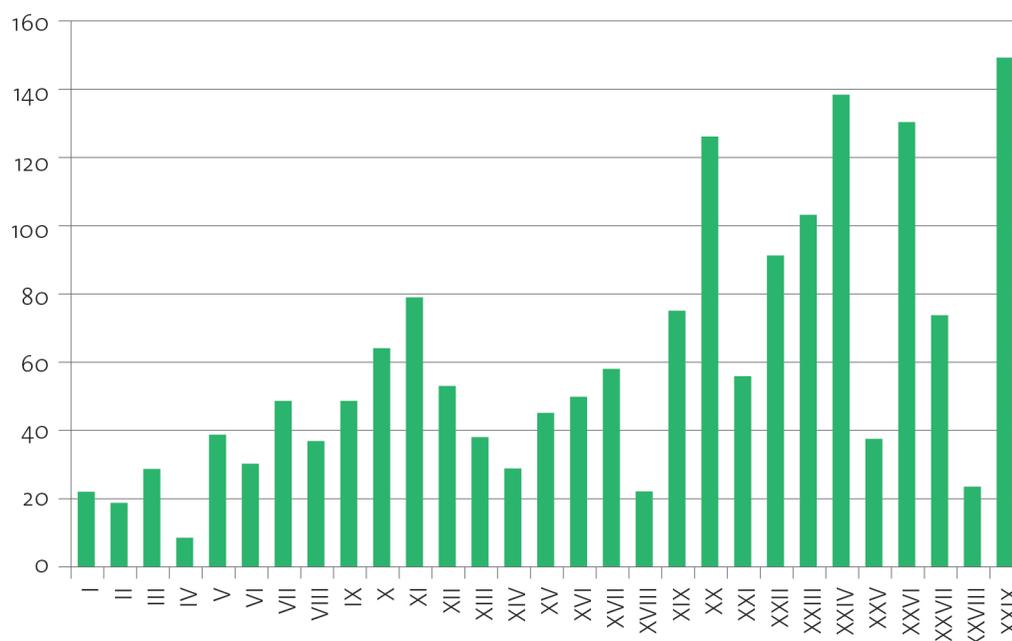
La Plata es la ciudad donde se ha realizado el mayor número de JAPV (Tabla 1) y en la cual se registran dos de los cuatro picos en la cantidad de comunicaciones (JAPV V y XX, en 1988 y 2004, respectivamente).

Aquí es innegable la importancia de la FCNyM, donde trabaja el mayor número de paleomastozoólogos del país (véase más adelante) y en la que se halla una de las mayores colecciones de mamíferos fósiles de la Argentina, aunque no es menos importante la cercanía a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (donde se encuentran el Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia (MACN) y la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires), lo cual posibilita un mejor aprovechamiento del tiempo por parte de los asistentes. La confluencia de colecciones importantes, centros académicos de gran trascendencia y una buena infraestructura también explica el pico registrado en las XI JAPV, que tuvieron lugar en San Miguel de Tucumán en 1995, ciudad donde se hallan ubicados la Universidad Nacional de Tucumán y el Instituto y la Fundación Miguel Lillo. Un caso llamativo es el de las XXIV JAPV, desarrolladas en San Rafael, (Mendoza) en 2009, donde se alcanza el mayor número de comunicaciones en todo el período analizado, a pesar de contar dicha ciudad solo con el grupo de investigadores y las colecciones del Museo Municipal de Historia Natural de San Rafael, una institución pequeña en comparación con las de La Plata, Buenos Aires o Tucumán.

Por su parte, las JAPV con menor número de comunicaciones se realizan en ciudades del interior, alejadas de los grandes centros urbanos del centro y norte de la Argentina, donde no trabajan grandes grupos de paleomastozoólogos ni existen grandes colecciones de mamíferos. Por otra parte, y con una importancia no menor, las tres reuniones con menos cantidad de comunicaciones coinciden con momentos de crisis económicas: alta inflación en 1987 (IV JAPV en Comodoro Rivadavia), fin de la convertibilidad, megadevaluación y *default* en 2002 (XVII JAPV en Bahía Blanca) y devaluación y *default* con los *holdouts* en 2014 (XXVIII JAPV en Zapala-El Chocón). En este último caso, la escasa concurrencia (no solo de los paleomastozoólogos, sino también de los restantes paleontólogos de vertebrados) pudo deberse además a la complicación logística adicional que conlleva la necesidad de efectuar un desplazamiento de algo más de 160 km por ruta a mitad de las jornadas y realizar reservas hoteleras en dos localidades alejadas, puesto que esas JAPV tuvieron una sede doble: dos días en Zapala y un día en El Chocón.

Si se analiza la cantidad de autores (Figura 3) se aprecian picos en las JAPV V (39 autores), X (64 autores), XI (79 autores), XX (126 autores), XXIV (138 autores) y XXIX (149 autores), mientras que las cantidades más bajas se registran en las JAPV IV (9 autores), XIV (29 autores), XVIII (22 autores), XXI (56 autores), XXV (37 autores) y XXVIII (24 autores).

Figura 3. Cantidad de autores (en valor absoluto) a lo largo de las 29 JAPV (Número total: 1724).



Cuando se confronta la cantidad de comunicaciones con la cantidad de autores (Figura 4), se aprecia que estos últimos aumentan en número de manera mucho más marcada. Así, mientras la cantidad de comunicaciones se triplica aproximadamente desde las primeras a las últimas jornadas, la cantidad de autores llega prácticamente a multiplicarse por valores superiores a cinco y ligeramente inferiores a siete a partir de las XX JAPV. Finalmente, si se considera el conjunto de las jornadas, la mayoría de las comunicaciones posee uno y dos autores, seguidas por aquellas con tres y luego por las que poseen cuatro autores (Figura 5). Como datos curiosos, solo en la XXII JAPV se registra una comunicación con trece autores y en la XXIX JAPV una con nueve autores y dos con once, no registrándose nunca una comunicación con diez o doce autores.

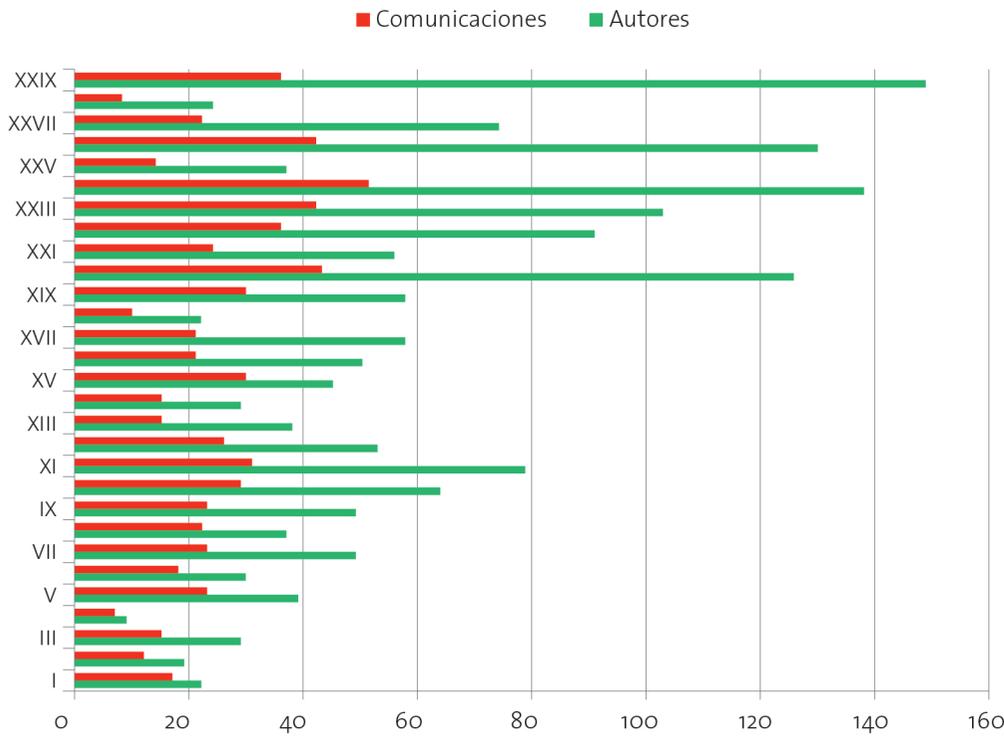


Figura 4. Cantidad de comunicaciones y de autores (en valor absoluto) a lo largo de las 29 JAPV.

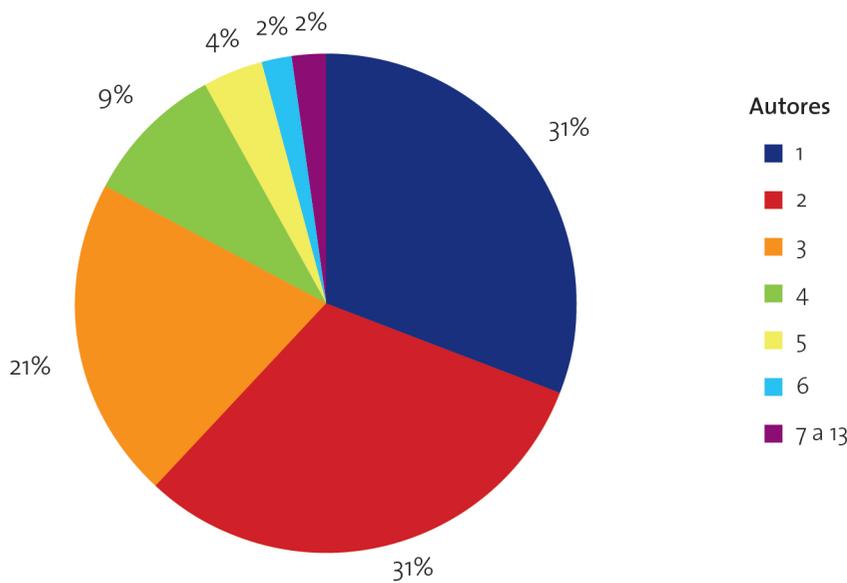


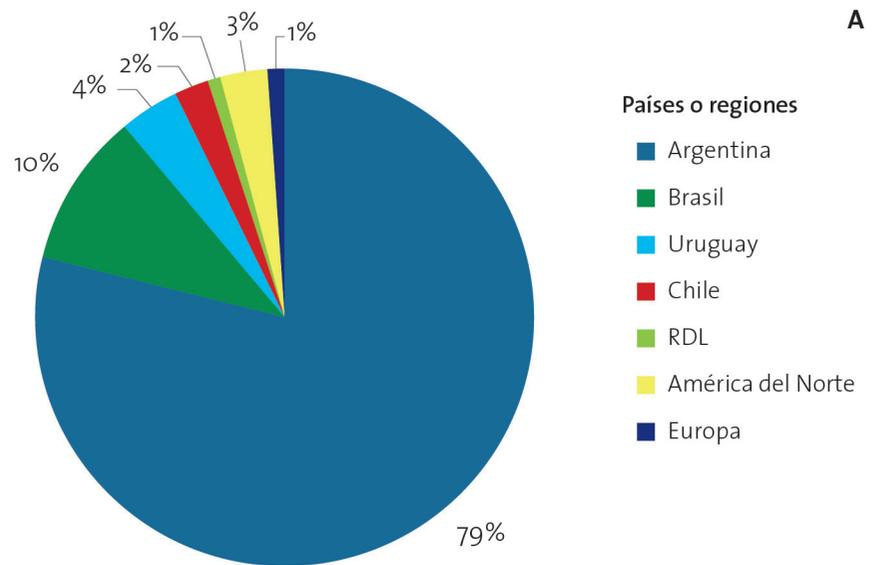
Figura 5. Cantidad de autores por comunicación (en %) en el conjunto de las 29 JAPV (100% = 706).

El aumento en las coautorías no solo ocurre en la paleomastozoología argentina, sino que es una tendencia general en las ciencias. El incremento de la colaboración científica se explica por diversas razones, como la especialización temática y la necesidad de afrontar problemas cada vez más complejos, el acceso a equipos de alta tecnología, la mayor eficiencia en el uso de los recursos financieros, la disponibilidad y facilidad para la movilidad de los investigadores y el deseo (o la necesidad) individual de lograr reconocimiento para continuar y ascender en la carrera académica. Esto último conduce a los científicos a reforzar sus vínculos con colegas de reconocida trayectoria para mejorar su propia reputación, dentro de un sistema de redes que se alimentan constantemente con la entrada de investigadores jóvenes (Persson, Glänzel y Danell, 2004; Sancho, Morillo, De Filippo, Gómez y Fernández, 2006; Russell, Ainsworth, Del Río, Narváez-Berthelemot y Cortés, 2007; De Filippo, Morillo y Fernández, 2008). De todas estas razones, probablemente intervengan en los resultados observados, principalmente, la especialización temática, la disponibilidad y facilidad para la movilidad de los investigadores y el deseo (o la necesidad) individual de continuar y ascender en la carrera académica. En este sentido, la creciente incorporación de jóvenes científicos en la última década, como resultado de la adopción de políticas públicas destinadas a incrementar la masa crítica de investigadores, se conjuga con la presión que el sistema científico ejerce sobre estos para mantenerse y crecer en el sistema. Esta presión está direccionada, por un lado, a publicar mayor cantidad de trabajos en revistas de “alto impacto” y, por el otro, a formar los recursos humanos de

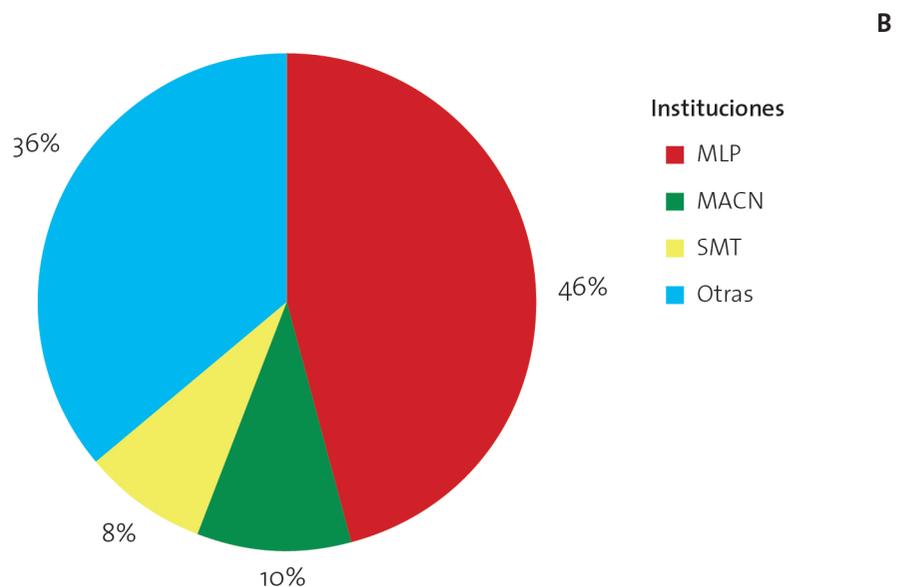
manera casi continua, lo cual no solo posibilita incrementar el número de temas a tratar y la cantidad de publicaciones (facilitando así la respuesta a la primera presión), sino que se torna imprescindible para alcanzar los escalafones más altos en la carrera científica.

En cuanto a la procedencia de los autores principales (único o primer autor), la gran mayoría proviene de Argentina, siguiéndole en número los de Brasil (Figura 6A). Este predominio de los autores argentinos no es sorprendente, toda vez que se trata de jornadas nacionales. Sin embargo, la importancia que la paleomastozoología tiene en el mundo y, especialmente, en Latinoamérica explica la presencia de autores brasileños (por otra parte, numerosos también en función de la población de ese país), uruguayos y chilenos (ambos menos numerosos pero pertenecientes a comunidades de menor tamaño, lo que también se relaciona con una menor población a nivel país).

Figura 6. Procedencia geográfica del autor principal (en %). A: por país o región (100% = 706); B: por instituciones argentinas (100% = 560).
Referencias: América del Norte: EE. UU y Canadá; MLP: Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP); MACN: Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadavia”; RDL: Resto de Latinoamérica; SMT: San Miguel de Tucumán [Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo (Universidad Nacional de Tucumán) y CCT Tucumán (CONICET)].



Por su parte, la procedencia de los autores argentinos (Figura 6B) muestra un muy marcado predominio de aquellos provenientes de la FCNyM de la UNLP, seguidos a gran distancia por aquellos del MACN y de Tucumán, que supera a todos los otros grupos de paleomastozoólogos distribuidos a lo largo y ancho del país. El “peso” de los autores de La Plata está vinculado fundamentalmente con la influencia inicial de los hermanos Carlos y Florentino Ameghino (trasladada luego al MACN) y, ya dentro del lapso abarcado por este estudio, la no menos fundamental influencia de Rosendo Pascual. Los hermanos Ameghino sentaron las bases de las colecciones paleomastozoológicas del país y de los estudios taxonómicos, evolutivos y biocronológicos sobre los mamíferos fósiles, en tanto que Pascual continuó esas tareas, pero agregó dos pilares únicos a nivel nacional: la creación —junto con otros colegas de la FCNyM— de la primera y más



prestigiosa carrera de paleontología de Latinoamérica y la generación, sostén y desarrollo del que muy posiblemente sea el grupo más numeroso de paleomastozoólogos que pueda hallarse en una única institución científica en el mundo. En este sentido, Pascual formó directamente a dos generaciones de paleomastozoólogos: la primera se conforma durante los 60 y parte de los 70, y la segunda se incorpora a partir de los 80. Estas dos generaciones de discípulos de Pascual, cuyos miembros, en su mayoría, continúan trabajando hasta nuestros días y dirigiendo nuevos paleomastozoólogos en la FCNyM, son las que básicamente dan cuenta del papel preponderante que La Plata posee en esta disciplina (véase más adelante).

Para finalizar el tema de las comunicaciones y las autorías, la relación entre autores de género masculino y femenino se acerca a 3:1, ya que se registra un total de 1228 autores masculinos (72%) y 472 autores femeninos (28%). Estas proporciones son similares a las halladas en un reciente estudio bibliométrico de género en la paleontología de vertebrados argentina que toma como base la revista *Ameghiniana*, donde las firmas de género masculino constituyeron el 71,4% y las del femenino el 28,6% (Miguel, Hidalgo, Stubbs, Posadas y Ortiz-Jaureguizar, 2013). En ambos casos, la disciplina muestra un marcado grado de masculinización, aún lejos de la relación 60% a 40% que, para diversos autores, podría considerarse como el umbral de paridad o equidad de género (Baringoltz y Posadas, 2008). Si se analiza el mismo conjunto de datos pero jornada por jornada (Figura 7), se observan diversos patrones. En primer lugar, las tres curvas muestran oscilaciones, pero las de autores de género femenino oscilan de manera menos marcada. En segundo lugar, si bien la tendencia en las tres curvas es al incremento en el número de autores, la curva de los autores de género femenino crece más sostenidamente. En este sentido, la curva de autores de género femenino muestra tres “mesetas” de aproximadamente diez años cada una, con una media de seis autores en las JAPV I-IX, trece autores entre las JAPV X-XVIII y veinticinco autores entre las JAPV XIX-XXIX. Finalmente, los momentos en los que el número de autores de género masculino y femenino es más similar (JAPV II, IV, XIV, XVIII, XXI, XXV y XXVIII) coinciden con reuniones donde disminuye el número de autores. Este último patrón es notable, y sugiere (al menos en primera instancia) que los autores de género femenino tienen comportamientos de publicación más estables y que su participación en los trabajos comunicados es menos dependiente de factores ajenos a la propia dinámica de la disciplina.

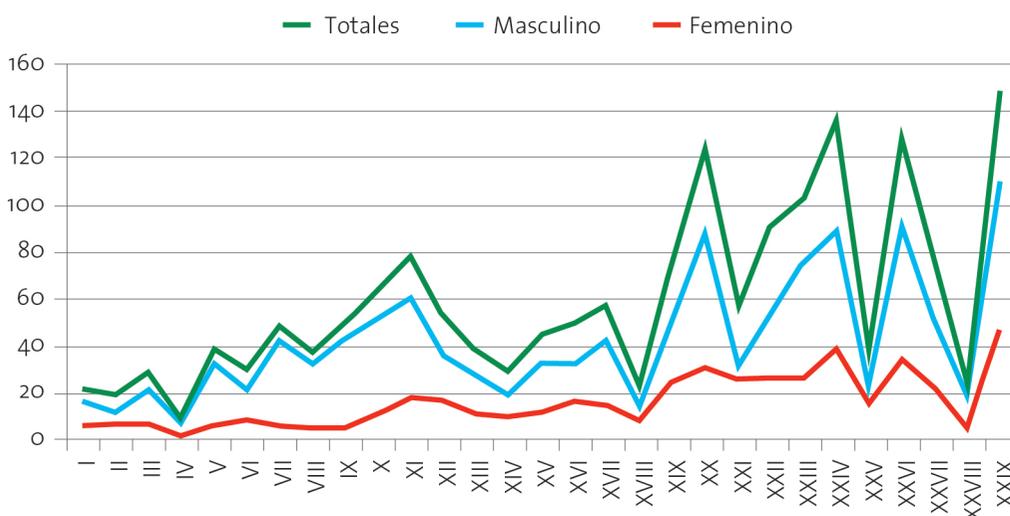
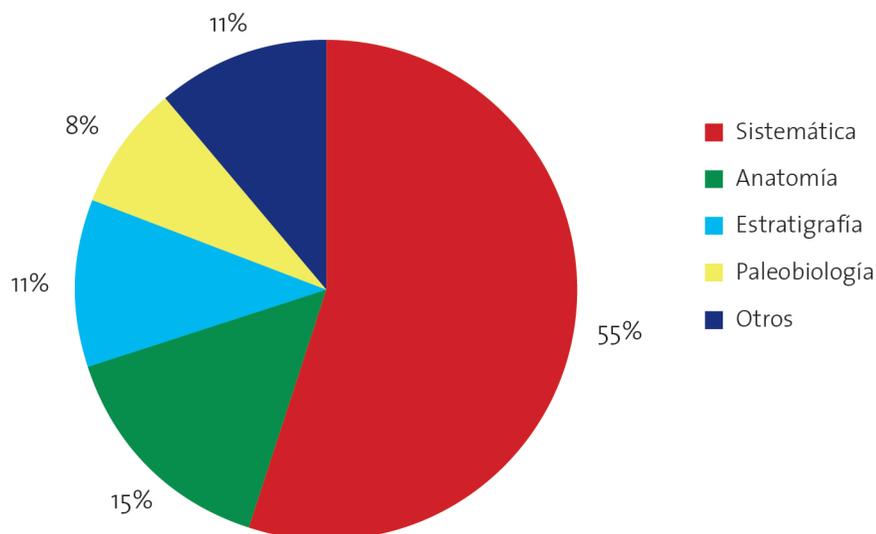


Figura 7. Cantidad de autores (totales y por género) en las 29 JAPV (Totales: 1724*, Masculino: 1228; Femenino: 472). *El número total de autores supera a la suma de autores de género masculino y femenino porque no fue posible determinar fehacientemente el género de 24 autores. Debe tomarse en cuenta que en las Actas de las JAPV solo se publican las iniciales del nombre y solo en esos 24 casos la búsqueda a través de internet resultó infructuosa.

TEMAS, TIEMPO Y GRUPOS TAXONÓMICOS

Los principales temas de estudio se visualizan en la Figura 8. Se aprecia el marcado predominio de los trabajos sistemáticos, seguidos a gran distancia por los anatómicos, los estratigráficos y los paleobiológicos. Los trabajos sistemáticos incluyen, entre otros, la descripción de nuevos taxones, la revisión de grupos, las relaciones filogenéticas de los mismos y los inventarios. Entre estos subtemas predomina la descripción de nuevos taxones (67%), lo cual muestra, por un lado, que la taxonomía descriptiva tiene plena vigencia, ya que, si bien el registro de mamíferos fósiles de Argentina es el tercer registro de mamíferos más completo del mundo (solo superado por el de América del Norte y el de Europa), se siguen descubriendo y describiendo nuevos taxones, así como delimitándose otros previamente conocidos. Por el otro lado, muestra que las JAPV son el principal ámbito que eligen los paleomastozoólogos argentinos para dar a conocer estos hallazgos y someterlos a la discusión con los colegas antes de publicarlos formalmente en revistas científicas especializadas.

Figura 8. Temas principales (en porcentaje) abordados en las comunicaciones presentadas en las 29 JAPV (100% = 706).



Los trabajos anatómicos son los segundos en número en el conjunto de las JAPV. Dentro de este tema principal, sobresalen los trabajos descriptivos, seguidos muy de cerca por los de paleoneurología y aquellos de anatomía funcional. La anatomía descriptiva es uno de los pilares básicos de la paleontología sistemática, por lo que no es de extrañar que sea la rama de la anatomía que concentra la mayor cantidad de comunicaciones. Sin embargo, es notable el desarrollo que han tenido en nuestro país los estudios paleoneurológicos, que tienen en Juan Carlos Quiroga (un médico que realizó su tesis doctoral sobre el origen del cerebro de los mamíferos en la Facultad de Ciencias Médicas de la UNLP y que falleció tempranamente en 1988) a su gran promotor, una vez establecido en la División Paleontología Vertebrados de la FCNyM como investigador del CONICET. Quiroga formó allí a María Teresa Dozo, quien desde hace varios años se halla establecida en el Centro Nacional Patagónico de Puerto Madryn, desde donde ha proseguido con sus discípulos esta particular línea de investigación. Por su parte, los estudios morfofuncionales adquieren su principal impulso también en La Plata con los trabajos de Sergio Fabián Vizcaíno, quien dirigiera luego la primera tesis doctoral sobre esta temática, defendida por María Susana Bargo en 2001 en la FCNyM de la UNLP (Tonni, 2005).

Los trabajos estratigráficos también son parte indisoluble de la paleontología, ya que los fósiles (y los mamíferos, en particular) son excelentes indicadores de la edad relativa de los sedimentos portadores. En esta temática predominan las comunicaciones sobre bioestratigrafía, biocronología y análisis de faunas locales. Es nuevamente la División Paleontología Vertebrados de la FCMyM de la UNLP la que más ha contribuido al desarrollo de estas temáticas. Los trabajos pioneros de Florentino Ameghino fueron posteriormente continuados y perfeccionados por Rosendo Pascual y luego por uno de sus primeros discípulos, Eduardo Pedro Tonni, quienes a su vez han formado a una gran cantidad de paleomastozoólogos que continúan trabajando en estas temáticas a lo largo y a lo ancho del país (Goin, Ortiz-Jaureguizar y Carlini, 2013).

Finalmente, la importancia de los trabajos paleobiológicos, entre los que sobresalen los paleoecológicos y paleoambientales, son también muy importantes en la paleomastozoología, ya que posibilitan la interpretación de las condiciones climático-ambientales de los sedimentos portadores de mamíferos, así como de la función de estos en las comunidades y los ecosistemas del pasado. También es en La Plata donde se desarrollan mayoritariamente estas líneas y, nuevamente, es Rosendo Pascual el iniciador de estos estudios y quien más se ha preocupado por formar recursos humanos que tengan entre sus prioridades estas temáticas, ya sea como línea principal de investigación o como complemento de los estudios taxonómicos (Tonni, 2005; Goin, Ortiz-Jaureguizar y Carlini, 2013).

Para representar la variación de los temas a través del tiempo, se tomaron como ejemplo cuatro JAPV (Figura 9). La primera observación es que la sistemática predomina durante todo el período, aunque tiende a disminuir su preeminencia a través del tiempo. La segunda observación es que la diversidad temática aumenta con el tiempo. Ya en las II JAPV (1985) se registran los cuatro temas principales. Esta tendencia al aumento de las temáticas se consolida tempranamente en las VI JAPV (1989), aunque con algunas circunstanciales disminuciones. La máxima cantidad de temas (nueve) se registra en las XXIII JAPV (2007). Esta diversidad temática está probablemente vinculada con la incorporación de una gran cantidad de jóvenes paleomastozoólogos (provenientes mayoritariamente de la zoología) a partir de comienzos de la década del 1980, la mayoría de los cuales desarrolla sus tesis doctorales y tiene lugar de trabajo en la FCNyM de la

UNLP, bajo la dirección de Rosendo Pascual y algunos de sus primeros discípulos (Eduardo P. Tonni, Gustavo Juan Scillato-Yané y María Guiomar Vucetich). Estos jóvenes investigadores incorporan perspectivas novedosas (por ejemplo, paleobiología, filogenia, análisis multivariado, anatomía funcional) a las “tradicionales” temáticas sistemáticas, anatómicas y estratigráficas.

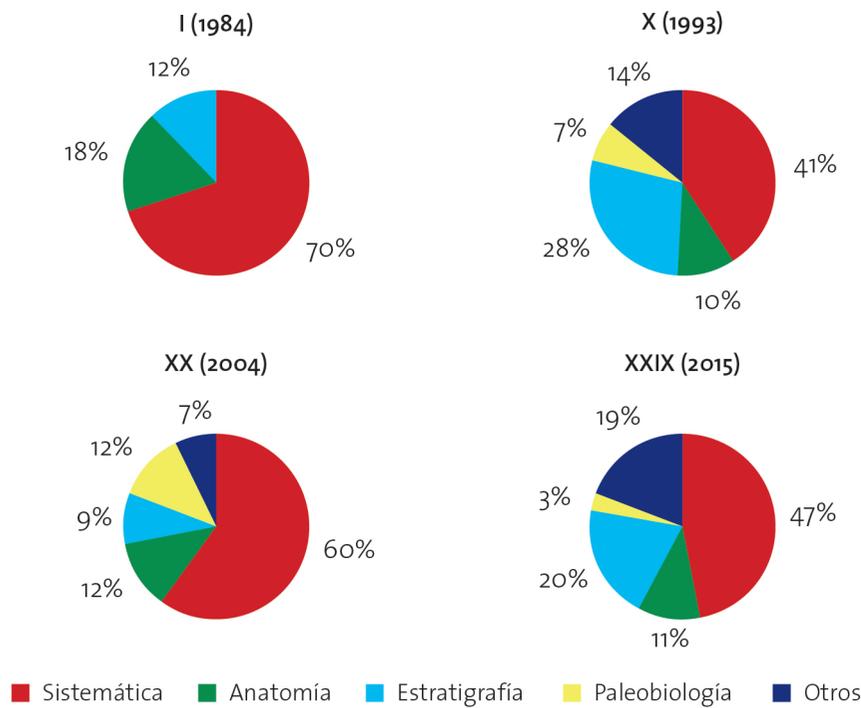


Figura 9. Variación de los temas principales (en porcentaje) abordados en las comunicaciones a través del tiempo (Total de comunicaciones: I JAPV = 17; X JAPV = 29; XX JAPV = 43; XXIX JAPV = 36).

En cuanto a los períodos de tiempo más estudiados, la gran mayoría pertenece al Cenozoico, la “edad de los mamíferos”, que se inicia hace 66 millones de años (Ma) —luego de la caída del bólido que a finales del Cretácico extinguió a los dinosaurios, así como a otros grupos animales y vegetales en el planeta, dando fin de tal modo al Mesozoico— y se extiende hasta nuestros días. Todos los intervalos con mayor porcentaje de comunicaciones corresponden a alguna de las subdivisiones del Cenozoico (Figura 10), con predominancia de aquellas referidas al Cuaternario (Pleistoceno más Holoceno), seguidas por las del Mioceno y, a mayor distancia, las correspondientes al Neógeno (Mioceno más Plioceno), Oligoceno y Eoceno. Estos resultados concuerdan no solamente con la abundante exposición de los sedimentos cuaternarios y miocenos en el país (lo cual incrementa idealmente la cantidad de fósiles que se espera hallar), sino también con el hecho de que los mismos son modernos (el Cuaternario se extiende entre los 2,6 Ma y la actualidad, en tanto que el Mioceno se extiende entre los 23 y los 5,3 Ma), lo cual idealmente favorece la preservación de los fósiles.

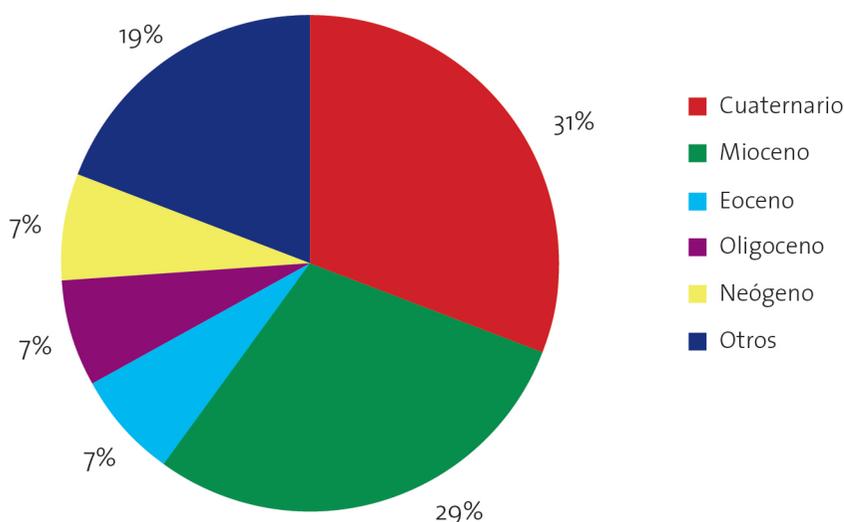
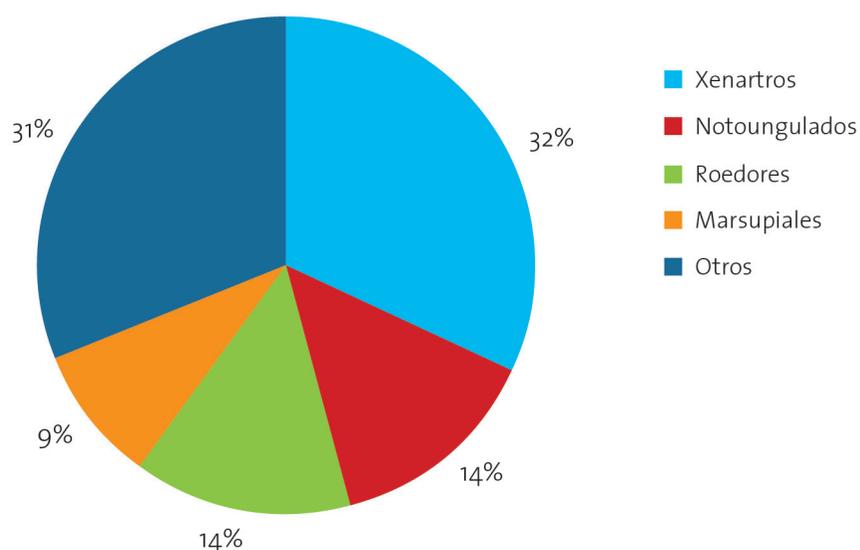


Figura 10. Principales intervalos temporales (en porcentaje) de acuerdo con las comunicaciones presentadas en las 29 jornadas analizadas (Total de comunicaciones que involucran un período temporal determinado: 667).

Finalmente, y tomando en consideración la importancia de la sistemática en la paleomastozoología, es necesario analizar la distribución de las comunicaciones entre los grandes grupos taxonómicos (Figura 11). Se observa que el grupo al cual se dedica el mayor número de comunicaciones es el de los xenartros (representados actualmente por las mulitas, perezosos, osos hormigueros y formas afines, pero con numerosas formas extinguidas). Los siguen los roedores (principalmente caviomorfos, representados actualmente por los cuiques, carpinchos, coipos, coendúes, tuco-tucos, vizcachas y formas afines, pero con numerosas formas extinguidas) y los notoungulados (completamente extinguidos, representados por los toxodontes, mesoterios, hegetoterios y formas afines) y luego por los marsupiales (representados actualmente en Sudamérica por las zarigüeyas y formas afines, el monito del monte y los ratones runchos, pero con numerosas formas extinguidas). El resto de los grupos está muy poco representado en las comunicaciones, con porcentajes que van desde el 7% al 1%. En esta particular distribución de los grupos intervienen factores intrínsecos (como la gran extensión temporal que muestran varios de ellos, registrados prácticamente durante la totalidad del Cenozoico) y otros extrínsecos. En este último punto tiene una importancia fundamental, una vez más, la División Paleontología Vertebrados de la FCNyM de la UNLP, donde trabaja la mayoría de los especialistas en estos taxones. Y esos especialistas son, directa o indirectamente, discípulos de Rosendo Pascual, quien a lo largo de su extensa actividad científica no solamente estudió todos estos grupos (xenartros, roedores, notoungulados y marsupiales), sino que, fundamentalmente, supo pasar el testigo a las nuevas generaciones de paleomastozoólogos. Así, una vez que aparecían jóvenes investigadores interesados en estudiar alguno de esos grupos, Pascual no solo los formaba, sino que paulatinamente abandonaba el estudio de esos grupos para abordar el estudio de otros grupos taxonómicos menos conocidos hasta que un nuevo investigador hiciese su aparición. De tal modo, Pascual formó a la primera generación de especialistas en estos grupos: Gustavo J. Scillato-Yané en xenartros, María G. Vucetich en roedores caviomorfos, Mariano Bond en notoungulados y Francisco Javier Goin en marsupiales. Y han sido precisamente estos investigadores quienes, solos o en colaboración con Pascual, han continuado la tarea de formar a las siguientes generaciones de paleomastozoólogos (Tonni, 2005; Goin, Ortiz-Jaureguizar y Carlini, 2013), hecho que queda evidenciado en las JAPV por la importancia que cobran los estudios paleomastozoológicos.

Figura 11. Principales grupos de mamíferos (en porcentaje) de acuerdo con las comunicaciones presentadas en las 29 JAPV (100% = 544).



CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA

A lo largo de las páginas precedentes hemos tratado de resumir los últimos treinta años de la paleomastozoología argentina a la luz de las comunicaciones presentadas en las Jornadas Argentinas de Paleontología Vertebrados. Al mismo tiempo, hemos intentado dar cuenta de los principales hitos con una explicación de los mismos. Muy brevemente, puede afirmarse que:

(a) La cantidad de comunicaciones y de autores crece a lo largo del tiempo.

(b) La gran mayoría de las comunicaciones es realizada por uno, dos o tres autores.

(c) La inmensa mayoría de los autores principales son argentinos; de estos la mayor parte tiene lugar de trabajo en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata.

(d) La disciplina está masculinizada (relación autores de género masculino/femenino > 60/40), aunque los autores de género femenino muestran una tendencia a aumentar su número de manera más constante que la que se observa en sus contrapartes de género masculino.

(e) La mayoría de las comunicaciones trata sobre sistemática, siguiéndoles las que abordan temas anatómicos, estratigráficos y paleobiológicos. La diversidad temática se consolida tempranamente, a partir de las VI Jornadas (1989).

(f) El mayor número de comunicaciones tiene como marco temporal al Cenozoico y, dentro de este, la mayoría corresponde al Cuaternario y al Mioceno.

(g) Los grupos taxonómicos con mayor número de comunicaciones son los xenartros, seguidos por los notoungulados, los roedores y los marsupiales. Estos grupos han sido estudiados modernamente por Pascual, y luego continuados por sus discípulos, directos e indirectos.

Como se desprende de este estudio, la paleomastozoología argentina goza de una innegable vitalidad, a pesar de contar con más de cien años de historia. La existencia de una importante masa crítica de investigadores formados, más la constante incorporación de nuevos cultores, asegura un futuro no menos brillante. La creación de centros de investigación en el interior del país (bajo dependencia de universidades nacionales, del CONICET o de ambos), así como la presencia de grupos de investigación consolidados o en vías de consolidarse en todos ellos, más temprano que tarde comenzará a disminuir la importancia relativa de La Plata como el principal centro de investigación paleomastozoológica del país. En este sentido, es importante que la Facultad de Ciencias Naturales y Museo acompañe este proceso, para tornarse poco a poco (tal como lo soñaba Pascual) en un centro de formación de grado y posgrado de jóvenes paleomastozoólogos, que luego irán a nutrir los centros de investigación del resto de la Argentina y de Latinoamérica.

Asimismo, es necesario aumentar la vinculación entre la paleo- y la neomastozoología; incrementar los estudios sobre mamíferos del Mesozoico y del Paleoceno (donde se han destacado los trabajos pioneros de José Fernando Bonaparte y Rosendo Pascual con algunos de sus discípulos, como Guillermo Rougier, Francisco J. Goin y Edgardo Ortiz-Jaureguizar) y de la Antártida (también iniciados por Pascual y continuados con gran éxito por otro de sus discípulos, Marcelo Reguero, y sus colegas); crear grandes bases de datos que permitan dar un salto cualitativo en el estudio del proceso de integración y desarrollo de la mastofauna argentina; profundizar los estudios de la biología evolutiva del desarrollo (una línea promisoría desarrollada también en la FCNyM por otro discípulo de Pascual, Alfredo Armando Carlini y sus jóvenes discípulos); y mejorar e institucionalizar la cooperación entre el sistema científico (por ejemplo, CONICET, universidades) y los organismos estatales (nacionales, provinciales y municipales) responsables de velar por el patrimonio paleontológico, a fin de agilizar los trámites destinados a realizar prospecciones y excavaciones, así como aquellos tendientes a facilitar los préstamos entre las instituciones para el estudio de los materiales. Todo esto permitiría incrementar el valor científico y didáctico de las colecciones y las exhibiciones, para que los ciudadanos cobren clara conciencia de la enorme importancia que tienen los museos y sus colecciones en la comprensión y valoración de la biodiversidad de nuestro planeta y de los procesos que dirigen su evolución. tadas en las 29 JAPV (100% = 544).

Jornada	Año	Ciudad	Jornada	Año	Ciudad
I	1984	La Plata	XVI	2000	San Luis
II	1985	San Miguel de Tucumán	XVII	2001	Esquel
III	1986	Buenos Aires	XVIII	2002	Bahía Blanca
IV	1987	Comodoro Rivadavia	XIX	2003	Buenos Aires
V	1988	La Plata	XX	2004	La Plata
VI	1989	San Juan	XXI	2005	Plaza Huinca
VII	1990	Buenos Aires	XXII	2006	San Juan
VIII	1991	La Rioja	XXIII	2007	Trelew
IX	1992	Trelew	XXIV	2009	San Rafael
X	1993	La Plata	XXV	2010	San Luis
XI	1995	San Miguel de Tucumán	XXVI	2012	Buenos Aires
XII	1996	Santa Rosa	XXVII	2013	La Rioja
XIII	1997	La Rioja	XXVIII	2014	Zapala - El Chocón
XIV	1998	Neuquén	XXIX	2015	Diamante
XV	1999	La Plata - Luján			

Tabla 1. Lista de las Jornadas Argentinas de Paleontología de Vertebrados analizadas en este estudio, año de realización y ciudad sede de las mismas

NOTAS

1. Asociación Paleontológica Argentina (1981). *Publicación Especial 25.º Aniversario*, 1(1): 1-27. Disponible en <http://www.peapaleontologica.org.ar/index.php/peapa/issue/view/5> [Consultado el 10 de marzo de 2016].
2. Asociación Paleontológica Argentina (2005). *Publicación Especial 50.º Aniversario*, 10(1): 1-85. Disponible en <http://www.peapaleontologica.org.ar/index.php/peapa/issue/view/14> [Consultado el 10 de marzo de 2016].

3. Asociación Paleontológica Argentina (2006). *Publicación Especial. Ameghiniana. 50.º Aniversario*, 11(1): 1-278. Disponible en <http://www.peapaleontologica.org.ar/index.php/peapa/issue/view/15> [Consultado el 10 de marzo de 2016].

REFERENCIAS

- Albornoz, M. (2004). "Política científica y tecnológica en Argentina". En: E. Samper, A. M. Corrales, F. Pinón, J. C. Toscano, L. J. Jaramillo y F. Chaparro (coords.), *Globalización, Ciencia y Tecnología* (pp. 81-92). Madrid: OEI-Corporación Escenarios.
- Baringoltz, E. y Posadas, P. (2008). *Ciencia y tecnología en la Argentina. Diagnóstico de la situación de género (julio de 2006-diciembre de 2007)*. Buenos Aires: Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, Dirección Nacional de Información Científica. Recuperado de www.mincyt.gov.ar/_post/descargar.php?idAdjuntoArchivo=22533
- De Filippo, D., Morillo, F. y Fernández, M. T. (2008). "Indicadores de colaboración científica del CSIC con Latinoamérica en bases de datos internacionales". *Revista Española de Documentación Científica*, 31(1): 66-84. Recuperado de <http://redc.revistas.csic.es/index.php/redc/article/view/413/425>
- Goin, F. J., Ortiz-Jaureguizar, E. y Carlini, A. A. (2013). "Rosendo Pascual (1925-2012)". *Mastozoología Neotropical*, 20(1): 197-211. Recuperado de http://www.sarem.org.ar/wp-content/uploads/2013/07/SAREM_MastNeotrop_20-1_19_Obituario.pdf
- "Invertir en ciencia". *La Nación* (07 de diciembre de 1999). Recuperado de <http://www.lanacion.com.ar/164031-invertir-en-ciencia>
- Miguel, S., Hidalgo, M., Stubbs, E., Posadas, P. y Ortiz-Jaureguizar, E. (2013). "La paleontología de vertebrados desde la perspectiva de género. El caso de la revista Ameghiniana (1957-2011)". *Investigación Bibliotecológica: archivonomía, bibliotecología e información*, 27(61): 133-155. Recuperado de www.revistas.unam.mx/index.php/ibi/article/viewFile/42817/38892
- Persson, O., Glänzel, W. y Danell, R. (2004). "Inflationary bibliometric values: The role of scientific collaboration and the need for relative indicators in evaluative studies". *Scientometrics*, 60(3): 421-432.
- Reig, O. A. (1981). "La paleontología argentina: pasado y presente". *Interciencia*, 6: 274-277.
- Russell, J. M., Ainsworth, S., Del Río, J. A., Narváez-Berthelemot, N. y Cortés, H. D. (2007). "Colaboración científica entre países de la región latinoamericana". *Revista Española de Documentación Científica*, 30(2): 180-198. Recuperado de <http://biblioteca.ibt.unam.mx/shirley/redc200702.pdf>
- Sancho, R., Morillo, F., De Filippo, D., Gómez, I. y Fernández, M. T. (2006). "Indicadores de colaboración científica inter-centros en los países de América Latina". *Interciencia*, 31(4): 284-292. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=So378-18442006000400008&lng=es&tlng=es
- Tonni, E. P. (2005). "El último medio siglo en el estudio de los vertebrados fósiles". *Asociación Paleontológica Argentina, Publicación Especial 50.º Aniversario*, 10(1): 73-85.
- Vallés, E. (coord.). (2015a). *Estado y perspectivas de las ciencias exactas, físicas y naturales en la Argentina*. Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y Academia Nacional de Ciencias.
- Vallés, E. (2015b). "Ciencias Exactas, Físicas y Naturales". En: E. Vallés (coord.) *Estado y perspectivas de las ciencias exactas, físicas y naturales en la Argentina* (pp. 11-36). Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y Academia Nacional de Ciencias.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Ángel R. Plastino la invitación a publicar este artículo en la revista Núcleos. Este estudio se ha realizado en el marco de los proyectos N662 y N779 de la Universidad Nacional de La Plata.

Edgardo Ortiz-Jaureguizar es doctor en Ciencias Naturales, profesor titular de Mastozoología y director del Laboratorio de Sistemática y Biología Evolutiva (LASBE) en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata, e investigador independiente del CONICET.

Paula Posadas es doctora en Ciencias Naturales, profesora adjunta de Biogeografía e integrante del LASBE en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata, e investigadora independiente del CONICET.

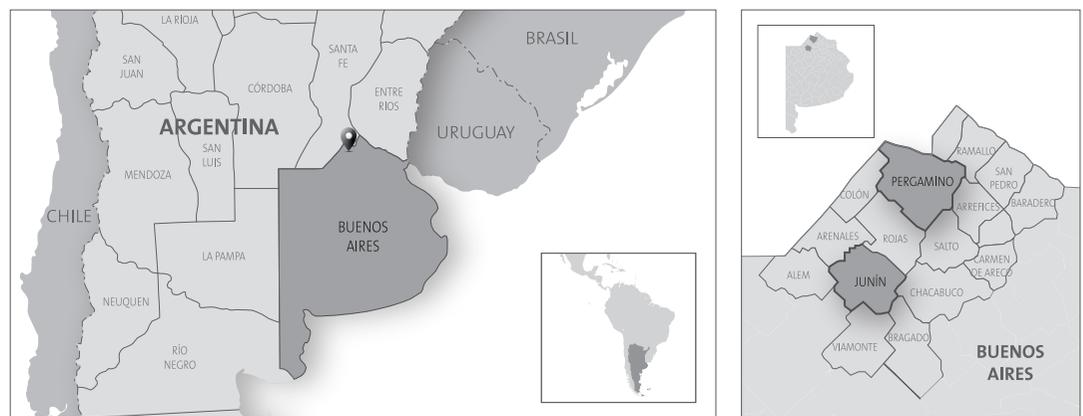
UNNOBA LA UNIVERSIDAD

La Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA), es una universidad nacional, pública y gratuita que desempeña un rol de liderazgo en la región.

Con sedes en Junín y Pergamino, en el corazón agrícola-ganadero de la República Argentina, aproximadamente a 250 kilómetros de la Ciudad de Buenos Aires.

Actualmente cuenta con cerca de 10.000 estudiantes provenientes de todo el país. Desde su creación en el año 2002, y aprovechando el contexto geográfico en el que se inserta, ha logrado posicionarse como un referente estratégico.

En su visión promueve el espacio interdisciplinario de interacción de la investigación, la docencia, la extensión y la transferencia, en un marco de calidad y pertinencia y en un clima de libertad, democracia, justicia y solidaridad.



OFERTA ACADÉMICA

ESCUELA DE TECNOLOGÍA

DISEÑO

- Licenciatura en Diseño de Indumentaria y Textil | 5 años
- Tecnicatura en Diseño de Indumentaria y Textil | 3 años
- Licenciatura en Diseño Gráfico | 5 años
- Tecnicatura en Diseño Gráfico | 3 años
- Licenciatura en Diseño Industrial | 5 años
- Tecnicatura en Diseño Industrial | 3 años

INFORMÁTICA

- Ingeniería en Informática | 5 años
- Licenciatura en Sistemas | 5 años
- Analista de Sistemas | 3 años

INGENIERÍA

- Ingeniería Industrial | 5 años
- Ingeniería Mecánica | 5 años
- Tecnicatura en Mantenimiento Industrial | 3 años
- Tecnicatura en Mantenimiento Ferroviario | 3 años

INST. ACADÉMICO DE DESARROLLO HUMANO

SALUD

- Licenciatura en Enfermería | 4 ½ años
- Enfermería Universitaria | 3 años

ESC. DE Cs. ECONÓMICAS Y JURÍDICAS

ECONÓMICAS

- Licenciatura en Administración | 4 años
- Contador Público | 4 años
- Tecnicatura en Gestión Pública | 2 ½ años
- Tecnicatura en Gestión de Pymes | 2 ½ años

JURÍDICAS

- Abogacía | 5 años
- Martillero y Corredor Público | 3 años

ESC. DE Cs. AGRARIAS, NATURALES Y AMBIENTALES

AGRONOMÍA

- Ingeniería Agronómica | 5 años

ALIMENTOS

- Ingeniería en Alimentos | 5 años
- Tecnicatura en Producción de Alimentos | 3 años

GENÉTICA

- Licenciatura en Genética | 5 años

