

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.

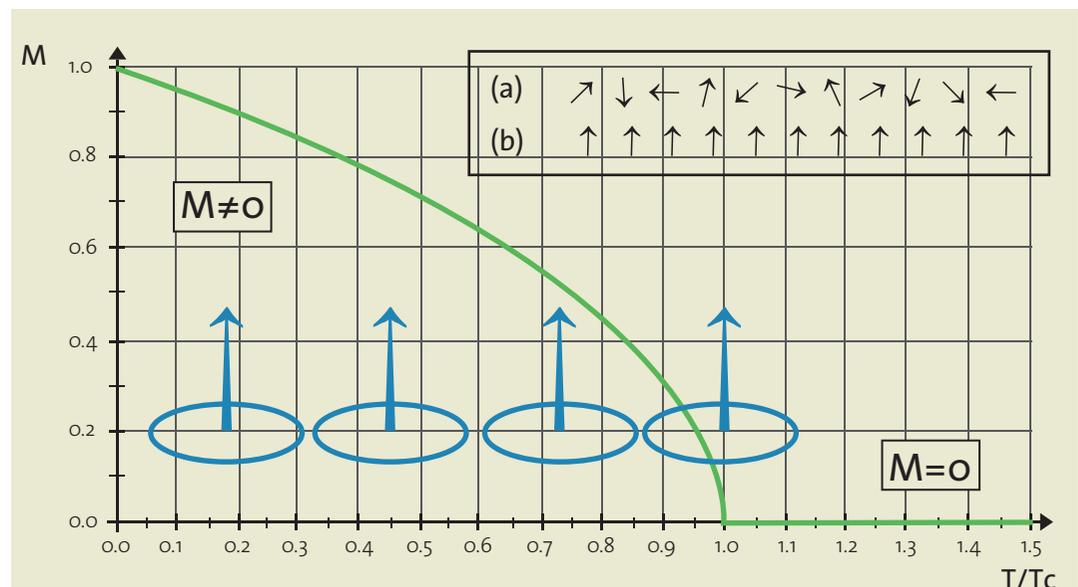
(2) **Parámetro de control.** Es, esencialmente, en el caso de los ferromagnetos, la temperatura T . En efecto, para el hierro a temperaturas mayores que una temperatura especial llamada crítica (o de Curie), denotada por el símbolo T_c , la “imantación” se pierde ($T > T_c$). Opuestamente, para temperaturas 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

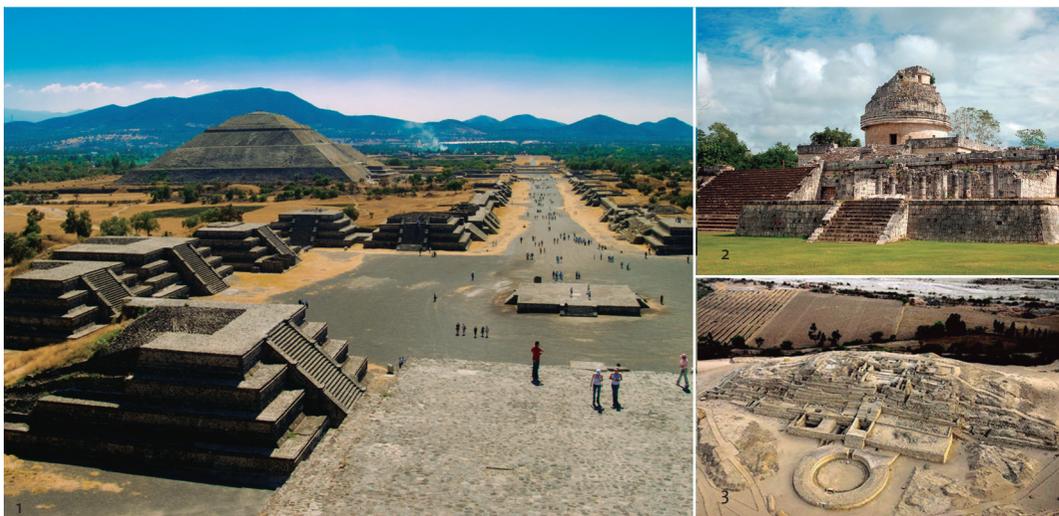


Figura 2. Algunas construcciones monumentales de la antigüedad.

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)

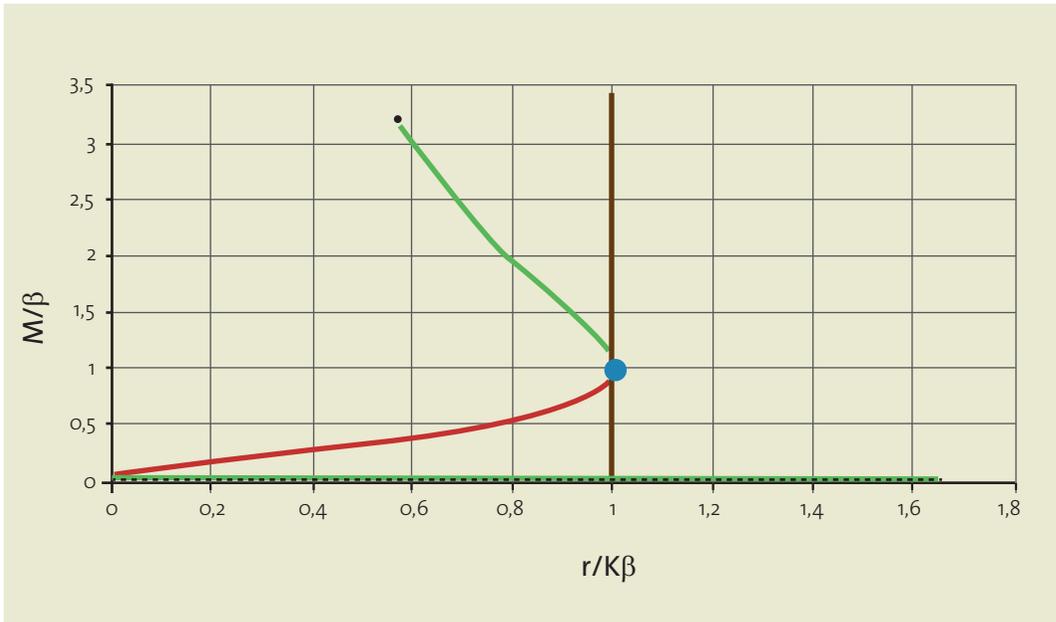


Figura 3a. La ecuación (2), que describe el auge y colapso de una antigua civilización, tiene tres soluciones de equilibrio. La gráfica muestra el número de construcciones monumentales M/β en función del parámetro de destrucción normalizado $r/K\beta$. Las curvas de color verde corresponden a los atractores, 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

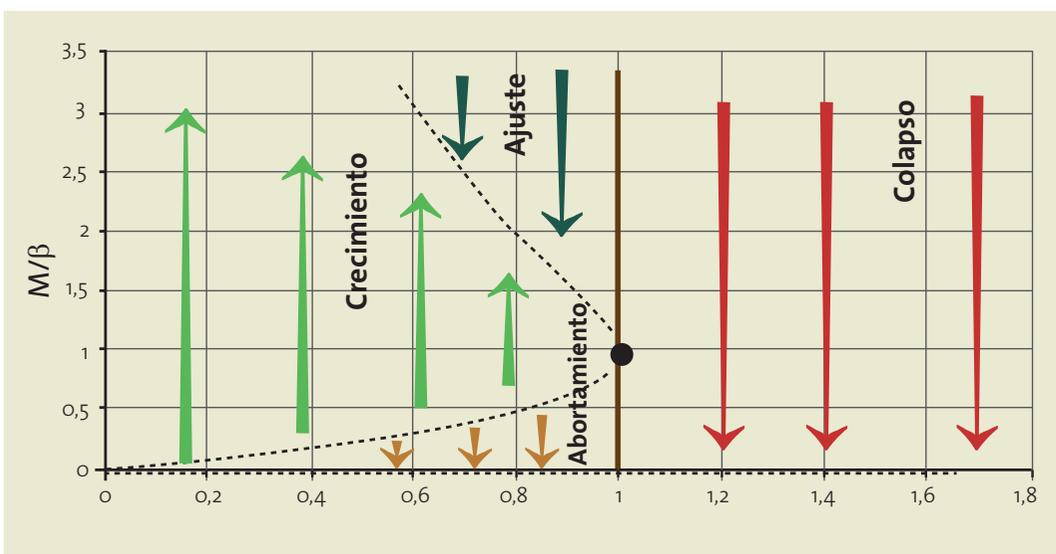


Figura 3b. La solución de equilibrio de la ecuación (2), descrita en la Figura 3a, define cuatro regiones relacionadas con la evolución de una antigua civilización con trazas tecnológicas (construcciones monumentales). Las regiones están descritas en detalle en este artículo y es el principal resultado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

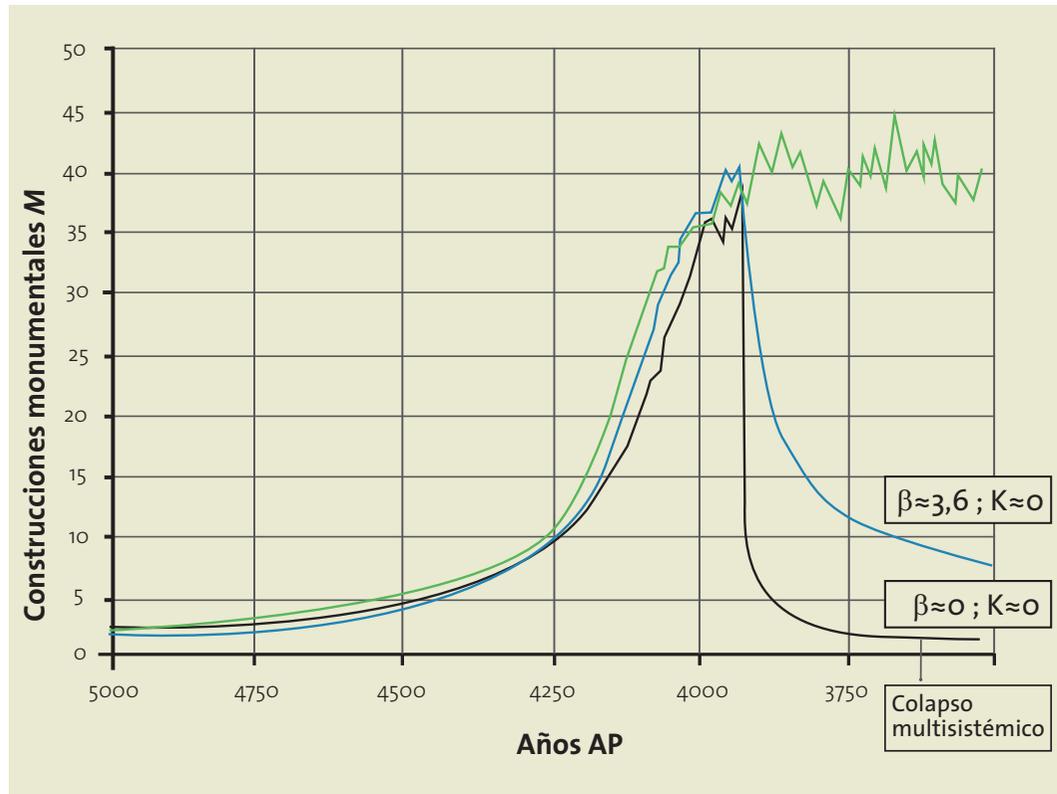


Figura 5. La evolución numérica (ecuación (2)) del número de construcciones monumentales para la civilización de Caral. Las tres curvas corresponden a distintos valores de los parámetros y a su eventual colapso. Se presume que el colapso estuvo relacionado con grandes fluctuaciones del fenómeno de El 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).