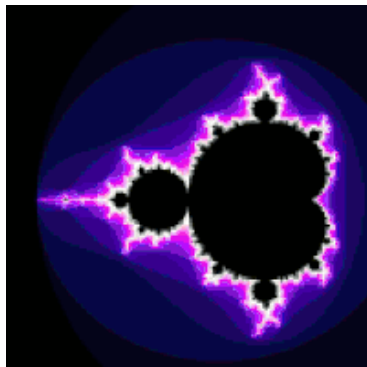


Benoît Mandelbrot



Fractal animado: la misma estructura reaparece a distintas escalas

Para Benoît Mandelbrot, un fractal no es una simple figura matemática, sino una forma de comprender la organización de la naturaleza. Allí donde la geometría clásica sólo veía irregularidad, el fractal descubre un orden que se mantiene a distintas escalas.

Una montaña, una nube, una costa o las ramas de un árbol no responden a líneas rectas ni a formas perfectas. Sin embargo, presentan una estructura que reaparece, con variaciones, cuando observamos sus partes. Esa autosimilitud revela que el orden también puede manifestarse en lo irregular.

La geometría fractal amplía así nuestra comprensión de lo real. Enseña que la complejidad no es ausencia de ley, sino una forma más profunda de organización. En un fractal, la parte conserva la huella del todo y cada nivel reproduce, sin repetir exactamente, la lógica del conjunto.

¿En dónde encontramos fractales? Aplicaciones y usos. La I.A.

Desde la perspectiva de Benoît Mandelbrot, los fractales aparecen allí donde la naturaleza no se deja reducir a figuras perfectas. Costas marítimas, montañas, nubes, rayos, ramas de los árboles, pulmones, vasos sanguíneos y redes fluviales muestran formas irregulares que, sin embargo, conservan cierta organización a distintas escalas.

No se trata de simple desorden. Lo fractal nombra precisamente esa combinación de irregularidad y orden. Por eso, la geometría fractal resultó útil para describir fenómenos que la geometría clásica no podía abarcar con suficiente precisión. Allí donde la línea recta o la curva ideal no alcanzan, el fractal permite pensar la complejidad real.

Sus aplicaciones son numerosas: modelado de formas naturales, análisis de turbulencias, estudio de estructuras biológicas, telecomunicaciones, compresión de imágenes, generación de paisajes artificiales y representación de fenómenos complejos

en física y matemática. En todos estos casos, el fractal ayuda a comprender cómo una regla simple puede producir una gran riqueza de formas.

En relación con la inteligencia artificial, los fractales no son la IA misma, sino una herramienta de lectura y modelización. Pueden servir para describir patrones jerárquicos, estructuras repetitivas, distribuciones complejas y ciertas formas de organización de datos. También aparecen en análisis de imágenes, visión por computadora y estudio de redes, donde la complejidad suele organizarse en niveles semejantes entre sí.

Así, desde Mandelbrot, el fractal no es una curiosidad matemática, sino una vía para pensar la realidad cuando ésta se muestra irregular, dinámica y profundamente compleja. La naturaleza, la técnica y algunos modelos de inteligencia artificial revelan que el orden no siempre es lineal: a veces se expresa en la repetición variable de sus formas.

En efecto, los fractales no son solo simples abstracciones matemáticas, sino modelos que describen cómo funciona el mundo real, especialmente en aquellos fenómenos donde la irregularidad es estable. Así, la *mathesis universalis* se reconfigura como una ciencia de los patrones, capaz de integrar lo irregular dentro de un marco racional.

Esta comprensión fractal del orden tiene aplicaciones concretas en campos tecnológicos avanzados, como la aviación. El análisis fractal se utiliza para modelar la turbulencia del aire, un fenómeno inherentemente irregular pero estructurado, permitiendo mejorar la predicción del comportamiento atmosférico.

Asimismo, diseños inspirados en geometrías fractales optimizan superficies aerodinámicas, alas y perfiles, reduciendo el ruido, el consumo de combustible y aumentando la eficiencia estructural.

De este modo, los fractales prolongan el ideal de la *mathesis universalis* en la era contemporánea: un lenguaje formal capaz de describir tanto el movimiento regular como la complejidad turbulenta, mostrando que incluso en los sistemas más dinámicos y variables persiste un orden matemático profundo.

Un caso especialmente significativo de aplicación de la geometría fractal es el radar meteorológico. Las formaciones atmosféricas —nubes, frentes, tormentas y sistemas de precipitación— presentan estructuras irregulares que se repiten a múltiples escalas. Desde la perspectiva de Benoît Mandelbrot, estos fenómenos no son caóticos en sentido estricto, sino fractales: complejos, autosimilares y estadísticamente regulares.

El análisis fractal permite interpretar con mayor precisión las imágenes de radar, identificando patrones de turbulencia, intensidad de lluvia y evolución de tormentas. De este modo, la *mathesis universalis* se actualiza en un contexto tecnológico: un lenguaje matemático capaz de describir la estructura del desorden atmosférico y anticipar su comportamiento.

En aviación, esta comprensión resulta crucial. La lectura fractal de los datos de radar mejora la detección de turbulencias severas y fenómenos convectivos peligrosos, contribuyendo a una navegación más segura. Incluso en un medio tan dinámico e inestable como la atmósfera, persiste un orden formal que puede ser modelado, calculado y previsto.

Los ANS (Servicios de Navegación Aérea), o servicios de navegación aérea, constituyen uno de los ámbitos donde la lógica fractal y el análisis de sistemas complejos adquieren

una relevancia operativa directa. La gestión del tránsito aéreo no se reduce a trayectorias aisladas, sino que involucra una red dinámica de aeronaves, rutas, sectores, condiciones meteorológicas y sistemas de control interconectados.

Desde una perspectiva fractal, el espacio aéreo puede entenderse como una estructura jerárquica y autosimilar: sectores que se subdividen en subsectores, flujos de tráfico que se repiten a distintas escalas y patrones de congestión que reaparecen bajo condiciones similares. Esta repetición estructural permite modelar la complejidad sin eliminarla, prolongando el ideal de la *mathesis universalis* en un contexto tecnológico real.

Integrados con el radar meteorológico y el SNA (Sistema de Análisis de Redes), los ANS pueden interpretar el sistema aéreo como una red compleja en tiempo real. Cada aeronave funciona como un nodo móvil; las rutas, separaciones y dependencias operativas actúan como enlaces. El análisis de estas redes permite identificar nodos críticos, cuellos de botella y zonas de riesgo, mejorando la seguridad y la eficiencia del sistema.

Así, los servicios de navegación aérea (ANS) se convierten en un ejemplo contemporáneo de cómo la geometría fractal, el análisis de redes y la informática aplicada materializan el antiguo proyecto de una ciencia universal del orden: una *mathesis universalis* capaz de operar incluso en sistemas altamente dinámicos, variables y complejos como el tráfico aéreo global.

La incorporación de IA predictiva en la gestión del tránsito aéreo representa un paso actual (1er cuarto de siglo XXI) de evolución de los ANS. Mediante el análisis de grandes volúmenes de datos —trayectorias históricas, condiciones meteorológicas, calculo de Gauss, sobre el estado del espacio aéreo y comportamiento operativo— la inteligencia artificial permite anticipar, esto es, predecir escenarios futuros antes de que se manifiesten.

En este contexto, los patrones fractales aportan una comprensión estructural del sistema: flujos de tráfico que se repiten a distintas escalas, congestiones recurrentes y regularidades en la dinámica del espacio aéreo. La IA aprende de las repeticiones y luego las transforma en modelos predictivos capaces de estimar demanda, detectar riesgos y optimizar rutas en tiempo real.

Integrada con el SNA (Análisis de Redes), la IA predictiva interpreta el tráfico aéreo como una red compleja en evolución. Los algoritmos identifican nodos críticos, dependencias ocultas y puntos de fragilidad del sistema, permitiendo a los servicios de navegación aérea actuar de forma preventiva en lugar de reactiva.

De este modo, la gestión del tránsito aéreo se convierte en una aplicación contemporánea de la *mathesis universalis*: un marco formal donde geometría fractal, redes complejas e inteligencia artificial convergen para gobernar la complejidad. Incluso en un sistema altamente dinámico y sensible como el espacio aéreo global, el orden puede ser modelado, anticipado y gestionado mediante patrones.

Gustavo R Rodríguez

*Gustavo Ricardo Rodríguez
Licenciado en Filosofía
Facultad de Historia y Letras – USAL
Investigador IIPC/USAL
Derechos reservados – Ley 11.723*