

Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica

Volumen
Volume 25

Número
Number 2

Septiembre
September 2004

Artículo:

Una descripción de la maduración del
caminado de los niños mediante
parámetros del análisis multifractal

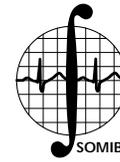
Derechos reservados, Copyright © 2004:
Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica, AC

Otras secciones de
este sitio:

- 👉 Índice de este número
- 👉 Más revistas
- 👉 Búsqueda

*Others sections in
this web site:*

- 👉 *Contents of this number*
- 👉 *More journals*
- 👉 *Search*



Una descripción de la maduración del caminado de los niños mediante parámetros del análisis multifractal

Alejandro Muñoz Diosdado,*
Fernando Angulo Brown,**
José Luis del Río Correa***

* Departamento de Matemáticas,
Unidad Profesional Interdisciplinaria
de Biotecnología del Instituto
Politécnico Nacional.

** Departamento de Física, Escuela
Superior de Física y Matemáticas del
Instituto Politécnico Nacional.

*** Departamento de Física, Universidad
Autónoma Metropolitana, Unidad
Iztapalapa.

Correspondencia:
Alejandro Muñoz Diosdado
Departamento de Matemáticas, Unidad
Profesional Interdisciplinaria de Biotecno-
logía del Instituto Politécnico Nacional
Av. Acueducto s/n,
Col. Barrio la Laguna Ticomán,
07340, México, D. F.
Teléfono: 57296000 ext. 56358.

RESUMEN

Las series de tiempo del intervalo de paso en el caminado humano normal se caracterizan por tener ligeras fluctuaciones multifractales. En este trabajo se discuten las propiedades multifractales de tales series de niños sanos comparadas con las de sujetos jóvenes sanos. El máximo, asimetría y ancho del espectro multifractal se han usado para medir la complejidad de las series de tiempo de caminado. Las series de niños pequeños tienen espectros multifractales cuya anchura disminuye según la edad del niño se incrementa, hasta que tales anchos se acercan a los de los jóvenes sanos. Los resultados indican que la maduración de la dinámica del caminado no está completamente desarrollada incluso a los 7 años de edad, es hasta los 11 a 14 años que la dinámica del caminado se aproxima a los valores observados en adultos jóvenes sanos. Un análisis de asimetría muestra que los espectros de los jóvenes son casi simétricos, los espectros de los niños pequeños son muy asimétricos, los niños menores de 7 años tienen un espectro desviado hacia la derecha y llega a ser casi simétrico según la edad se incrementa. Se discuten las posibles aplicaciones clínicas del análisis multifractal de las series de tiempo de caminado.

Palabras clave:

Caminado, dinámica del caminado humano, maduración, escalamiento, análisis fractal, multifractales.

ABSTRACT

The stride interval time series in normal human gait is characterized by slightly multifractal fluctuations. In this work we discuss multifractal properties of the stride-interval time series of healthy children gait compared with healthy young subjects. The maximum, asymmetry and width of the multifractal spectrum have been used to measure gait time series complexity. The series of small children have wider multifractal spectra; these spectra narrow as the boy's age increases until the widths are closer to the widths of the healthy young subjects. The results indicate that mature stride dynamics may not be completely developed even in healthy 7 yr-old children; it is in older children (11-14 yr-old) that stride dynamics approach the values observed in healthy young adults. The analysis of the spectra asymmetry shows that the spectra of young adults are almost symmetrical, the spectra of small children are very asymmetrical, children younger than 7 years old have a right skewed spectrum and it becomes almost symmetri-

cal as the age increases. We discuss the possible clinical applications of the multifractal analysis of the gait time series.

Key Words:

Walking, Human gait dynamics, Maturation, Scaling, Fractal analysis, Multifractals.

INTRODUCCIÓN

El caminado humano es un fenómeno complejo desde el punto de vista de su fisiología, ya que además de los factores neurológicos que permiten la regulación de la actividad muscular durante el paso, hay otros factores relacionados con la operación sensorial que tienen una importancia primordial en el entendimiento del caminado normal o anormal¹. Los aspectos biomecánicos del caminado han sido muy estudiados, por ejemplo se han estudiado los factores que permiten al centro de masa del cuerpo humano moverse con casi una velocidad constante a través de una curva compleja pero suave con el gasto más pequeño de energía, entre estos factores están la rotación de la pelvis en el plano horizontal, la inclinación de la pelvis en el plano frontal, la flexión de la rodilla en la pierna de soporte, y muchos otros²⁻⁵. El caminado de un joven adulto sano es muy eficiente. El movimiento es producido por la inercia resultante de la velocidad previamente adquirida por la acción de la gravedad. Para usar la gravedad más eficientemente en la realización de la mayoría del trabajo, el organismo usa una combinación regulada de pérdida y recuperación del equilibrio y en más pequeño grado la propulsión debida a los músculos de las extremidades cuando se contraen. Los ancianos disminuyen su capacidad para usar la inercia y la gravedad y por lo tanto tienen que recurrir al trabajo muscular efectivo.

Cuando los niños pequeños comienzan a caminar hay un control inmaduro de la postura y del caminado, esto resulta en unas fluctuaciones muy grandes del intervalo de paso además de caídas frecuentes. Alrededor de 3 años el caminado parece relativamente maduro porque la inestabilidad es reemplazada por un patrón de caminado más estable^{6,7}. Usualmente se piensa que a partir de esta edad sólo ciertos niños tienen problemas de caminado, aquellos que requieren atención ortopédica. Sin embargo, el desarrollo del control neuromus-

cular y de la función locomotora continúan hasta mucho después de 3 años⁷⁻⁹. De hecho, aun en los adultos jóvenes sanos, la duración del ciclo de caminado (el intervalo de paso) fluctúa de un paso a otro en una forma aparentemente aleatoria¹⁰. Sin embargo, si los adultos jóvenes tienen intacto su control neuronal, la magnitud de estas fluctuaciones es relativamente pequeña. Aunque parezcan aleatorias, se ha mostrado^{10,11} que estas fluctuaciones no son descorrelacionadas, es decir, que hay una memoria del sistema locomotor, de tal forma que el cambio de un paso al siguiente muestra una estructura temporal que se ha asociado con una organización de largo alcance de tipo fractal. En contraste, en aquellas personas con alguna enfermedad neuronal y en personas ancianas, la variabilidad del intervalo de paso se incrementa^{12,13}. En este trabajo se reproducen parte de los resultados de Hausdorff et al⁶ que en 1999 mostraron que la dinámica del ciclo de caminado no está completamente desarrollada incluso en niños de 7 años y que diferentes aspectos de esta dinámica maduran a diferentes edades. Ellos obtuvieron estos resultados usando técnicas estadísticas más o menos tradicionales, en este trabajo se usó análisis multifractal para obtener esos resultados, pero esta técnica de análisis ofrece más información para tratar de entender la variabilidad de la dinámica del ciclo de caminado. De hecho, una importante extensión del concepto de fractal es el reconocer que no únicamente se aplica a formas geométricas irregulares o formas anatómicas que no tienen una escala característica de longitud, sino también a procesos complejos que no tienen una sola escala de tiempo^{14,15}. El resultado de esta investigación muestra que las variaciones en el ciclo de caminado de niños de 3 y 4 años son más grandes que las de los niños de 6 y 7 años y es hasta edades de 11 a 14 años que los valores de variabilidad del ciclo de caminado se aproximan a los valores observados en adultos jóvenes sanos.

LAS BASES DE DATOS DE CAMINADO

Los datos analizados son series de tiempo de caminado de dos bases de datos obtenidas del Health's National Center for Research Resources en Estados Unidos¹⁶. Las dos bases consideradas para este trabajo son: La base de datos de maduración del caminado que tiene registros de la duración del ciclo de caminado de 50 niños sanos de entre 3 a 14 años (40 a 163 meses) y la base de datos que tiene registros largos de la duración del ciclo de caminado de 10 hombres jóvenes sanos con edad promedio de 21.7 años (de 18 a 29 años). La primera base de datos tiene 25 niñas y 25 niños que no tenían ningún tipo de desorden que afectara al caminado. Se clasificaron en tres grupos de edad: 3 a 4 años ($n = 11$), 6 a 7 años ($n = 20$) y de 11 a 14 años ($n = 12$). Unos cuantos niños de 5 años ($n = 3$), 8 años ($n = 1$), y 10 años ($n = 3$) se estudiaron también. Ellos caminaron a su propio paso, con paso normal por 8 minutos sobre una pista de carreras de 400 m, usaron sus propios zapatos, dos switches sensibles a fuerza se pusieron en el zapato derecho, uno abajo del talón y el otro debajo de la bola del pie, la salida de estos dos switches, que miden la fuerza aplicada al piso, fue muestreada a 300 Hz y grabada en una grabadora sujeta al tobillo de 5.5 x 2 x 9 cm y 0.1 kg. Después la señal grabada se analizó para determinar el tiempo del contacto inicial (golpe del talón) de cada paso en toda la caminata y por lo tanto el tiempo de duración del paso (el tiempo desde que un talón golpea el piso hasta el siguiente golpeo del piso del mismo pie). La sucesión de todos estos tiempos constituye las series de tiempo analizadas. Se usaron para comparación, como grupo de control, las series de tiempo de los 10 jóvenes adultos sanos; éstos caminaron por una hora bajo condiciones similares a las de los niños.

Una serie de tiempo es un conjunto de valores numéricos de cualquier variable que cambia con el tiempo, son generalmente conjuntos de valores dados como función del tiempo. Una serie de tiempo puede caracterizarse por la combinación de una componente estocástica, una o más propiedades periódicas y una componente de tendencia. La componente de tendencia se refiere a un incremento o decremento a largo plazo en las series. Las componentes periódicas son como las que se presentan con la temperatura atmosférica, que tiene periodicidades tanto diarias como anuales dependiendo de la estación del año. La

componente estocástica es la fluctuación no incluida en las dos componentes anteriores, es decir, si se remueven las tendencias y las componentes periódicas lo que queda es la componente estocástica. En el caso de las series de tiempo de caminado estas tienen la apariencia mostrada en la Figura 1. En esta figura se muestran tres series correspondientes a un niño de 40 meses, a otro de 153 meses y a un joven del grupo de control. Obviamente no hay componentes periódicas en esta clase de series de tiempo, por otro lado, se ha mostrado¹⁷, que las tendencias son despreciables en virtud de que son series de tiempo de corta duración.

METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

Para estimar la variabilidad del intervalo de paso Hausdorff et al⁶ calcularon la desviación estándar (DS) de cada serie de tiempo y el coeficiente de variación (CV), ($100 \times DS/\text{media}$), el cual es un índice de variabilidad normalizado a la duración promedio del ciclo de caminado de cada sujeto. Sin embargo, tanto la DS como el CV son mediciones globales durante todo el proceso de caminado, es decir, la amplitud de las fluctuaciones de las series de tiempo con respecto a la media. Después para estudiar la organización temporal,

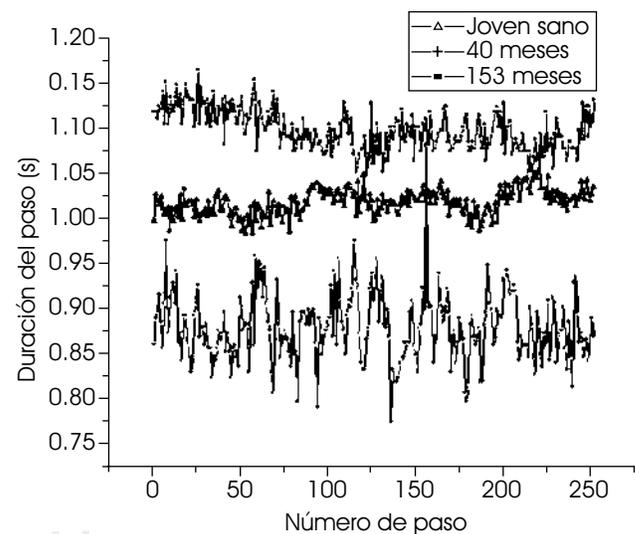


Figura 1. Series de tiempo de caminado de un niño de 40 meses (círculos), un niño de 153 meses (cuadrados) y un joven sano (triángulos). A simple vista se observa que la variabilidad de las series es diferente, la mayor variabilidad corresponde al niño más pequeño. La variabilidad del niño de 153 meses (~ 13 años) es muy parecida a la del joven.

aplicaron tres métodos para analizar diferentes aspectos de la estructura dinámica de las series de tiempo del intervalo de paso, usaron análisis espectral, propiedades de autocorrelación y el método DFA¹⁰⁻¹² (Detrended Fluctuation Analysis) que es un método para estudiar como las propiedades de correlación cambian sobre diferentes escalas o ventanas de observación. Concluyeron que las variaciones de la duración del ciclo de caminado son significativamente más grandes en los niños pequeños (3-4 años) comparados con los niños de 6 a 7 años y éstos a su vez más grandes que la de los niños de 11 a 14 años. Concluyeron también que la estructura temporal de las fluctuaciones del caminado no está completamente desarrollada incluso en los niños de 7 años y es hasta las edades de 11 a 14 años que tal estructura se aproxima a la de los adultos. En resumen, el control del caminado no está completamente maduro en los niños incluso a los 7 años de edad.

En este trabajo se han analizado las series de tiempo de caminado usando una técnica más o menos novedosa: el análisis multifractal. Los fractales son objetos autosimilares o invariantes de escala, esto quiere decir que sin importar la magnificación o ampliación con respecto a una variable dada, la estructura permanece estadísticamente invariante. Un fractal se dice que no tiene una escala característica sea ésta espacial o temporal. A menudo la naturaleza fractal de ciertos objetos o de ciertos fenómenos se puede visualizar sin problema, pero no es fácil visualizar la fractalidad de un objeto microscópico como una proteína o una membrana celular. Por otro lado, también los procesos que dependen del tiempo pueden exhibir comportamiento fractal y tal comportamiento tampoco puede visualizarse fácilmente.

Los fractales son intrínsecamente funciones no analíticas por lo cual las herramientas comunes del cálculo diferencial no son aplicables, para caracterizarlos se usa el concepto de dimensión fractal, aunque hay varias formas de definir este parámetro y, dependiendo del tipo de fractal que se esté considerando, estas definiciones no son siempre equivalentes. Sin embargo, esto no lleva a confusiones porque en la mayoría de las aplicaciones se considera una clase muy específica de fractales, los cuales pueden ser rigurosamente definidos. Por ejemplo, puede considerarse el método de conteo de cajas, en el cual se considera un conjunto de puntos y se encuentra el mí-

nimo número, N , de cajas de longitud d que se necesitan para cubrir todo el conjunto. Luego se cambia el tamaño de la caja para determinar como N depende de la longitud d . Para una estructura fractal esta dependencia se describe por una ley de potencia inversa donde el exponente es la dimensión fractal de conteo de cajas. La pendiente de una gráfica de $\log(N)$ contra $\log(d)$ proporciona esta dimensión fractal. Las descripciones fractales de los modelos físicos usan conjuntos de puntos pero a menudo es más conveniente trabajar con distribuciones o densidades de probabilidad. Cuando se trata con las distribuciones o las densidades de probabilidad se obtiene una dimensión fractal para cada momento de las distribuciones, es decir, se obtiene un espectro de dimensiones fractales. La dimensión de conteo de cajas es un caso especial y representa únicamente una de estas dimensiones fractales. Precisamente por este rango de dimensiones, estas construcciones se han llamado multifractales.

El comportamiento de los sistemas dinámicos no lineales puede ser entonces caracterizado por medidas fractales o multifractales que corresponden, por ejemplo, a la distribución invariante de un atractor¹⁸, la distribución de caídas de voltaje en una red aleatoria de resistores¹⁹, o la distribución espacial de regiones disipativas en un flujo turbulento²⁰.

Cuando se analizan señales fisiológicas en forma de series de tiempo, se puede obtener comportamiento monofractal o multifractal. Los monofractales se caracterizan por las mismas propiedades de escalamiento a través de la señal entera, se pueden caracterizar por un solo exponente global α_0 (el exponente de Lipschitz-Hölder)²¹, el cual indica que los monofractales son estacionarios desde el punto de vista de sus propiedades locales de escalamiento. Los multifractales tienen una complejidad mayor, pueden descomponerse en muchos subconjuntos caracterizados por diferentes exponentes de Hölder α , los cuales cuantifican el comportamiento local singular y por lo tanto se relacionan con las propiedades locales de escalamiento de las series de tiempo²². Por ejemplo, muchos investigadores han establecido la relevancia del formalismo multifractal para la descripción de las series de tiempo de interlatido cardiaco²³⁻²⁶. También han descubierto la multifractalidad en otras series fisiológicas y su rompimiento con la patología. En cuanto a las series de tiempo de caminado, hay también varias aproximaciones multifractales a su

análisis^{27,28}. Más recientemente, West y Scafetta²⁹ han determinado que las series de tiempo de caminado, más que ser monofractales, son ligeramente multifractales.

EL FORMALISMO MULTIFRACTAL

Las propiedades estadísticas de diferentes subconjuntos caracterizados por los diferentes exponentes α pueden cuantificarse por la función $f(\alpha)$, la dimensión fractal de cada subconjunto. La gráfica $f(\alpha)$ vs α se llama el espectro multifractal o espectro de singularidades. Existen varios formalismos para calcular el espectro multifractal³⁰, pero en este trabajo se ha preferido el método propuesto por Chhabra y Jensen el cual se ha reportado es un método preciso y simple para calcular el espectro multifractal^{31,32}. La serie de tiempo puede considerarse como una medida singular $P(x)$ si se normaliza la serie. Se calcula la curva $f(\alpha)$ vs α primero recubriendo la medida con cajas de longitud $L=2^n$ y calculando las probabilidades $P_i(L)$ en cada una de las cajas. Entonces se construye la familia uni-paramétrica de medidas normalizadas con

$$i(q, L) = \frac{[P_i(L)]^q}{[P_j(L)]^q}$$

Finalmente, para cada valor de q se evalúan los numeradores de los lados derechos de las ecuaciones:

$$f(q) = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{i(q, L) \ln[i(q, L)]}{\ln L}$$

$$(q) = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{i(q, L) \ln[P_i(L)]}{\ln L}$$

para tamaños de caja decrecientes (n creciente). Se extraen $f(q)$ y $\alpha(q)$ de las pendientes de las gráficas de los numeradores versus $\ln L$. El parámetro q es el orden del momento de la medida y proporciona una especie de microscopio para explorar diferentes regiones de la medida singular. Para $q > 1$, $\mu(q)$ amplifica las regiones más sin-

gulares de P , mientras que para $q < 1$ acentúa las regiones menos singulares, y para $q=1$ la medida $\mu(1)$ reproduce la medida original.

La curva $f(\alpha)$ es una función con una sola joroba para un multifractal, y se reduce a un punto para un monofractal. Como ejemplo se muestra en la Figura 2, el espectro de la serie de tiempo del primer sujeto de la base de datos de los jóvenes adultos sanos, calculada para valores de q desde -30 hasta 30 .

RESULTADOS

Usualmente se usan tres parámetros para describir el espectro multifractal y por ende la complejidad de la señal³³. Primero el valor α_0 , el cual es el valor de α donde el espectro tiene su máximo. Segundo, el ancho del espectro, que estima el rango de α donde $f(\alpha) > 0$, que se obtiene extrapolando la curva ajustada hasta cero; entonces el ancho del espectro multifractal (también llamado grado de multifractalidad) se define como $\Delta\alpha = \alpha_{max} - \alpha_{min}$ donde $f(\alpha_{max}) = f(\alpha_{min}) = 0$. Tercero, se ha propuesto ajustar al espectro multifractal, usando el método de mínimos cuadrados, a una función cuadrática alrededor de la posición de su máximo en α_0 es decir, $f(\alpha) = A + B(\alpha - \alpha_0) + C(\alpha - \alpha_0)^2$ ³³. El parámetro B que es el coeficiente del término lineal, mide la simetría de la curva, su valor es cero para curvas simétricas, positivo o negativo para curvas desviadas hacia la derecha o hacia la izquierda respectivamente. Sin embargo, los resultados de este trabajo muestran que el ajuste a una función cuadrática no funciona bien, si el espectro es casi simétrico la aproximación es buena, pero tal como se muestra en la Figura 3, mientras más asimétrica sea la curva la aproximación es más pobre, por lo tanto se propone ajustar más bien a una función de cuarto grado de la misma clase, es decir: $f(\alpha) = A + B(\alpha - \alpha_0) + C(\alpha - \alpha_0)^2 + D(\alpha - \alpha_0)^3 + E(\alpha - \alpha_0)^4$. El coeficiente B del término lineal puede seguirse usando como un indicador de la asimetría de la curva.

Estos tres parámetros sirven para describir la complejidad de la señal, pero resultó que para las series de caminado una vez que se calcula el espectro multifractal usando el algoritmo de Chhabra y Jensen se obtienen valores de α_0 muy cercanos a 1 en todos los casos, por lo que ese parámetro no se usó como criterio para distinguir las diferentes series de tiempo de caminado. Es importante remarcar que el ancho del espectro mide la longitud del rango de expo-

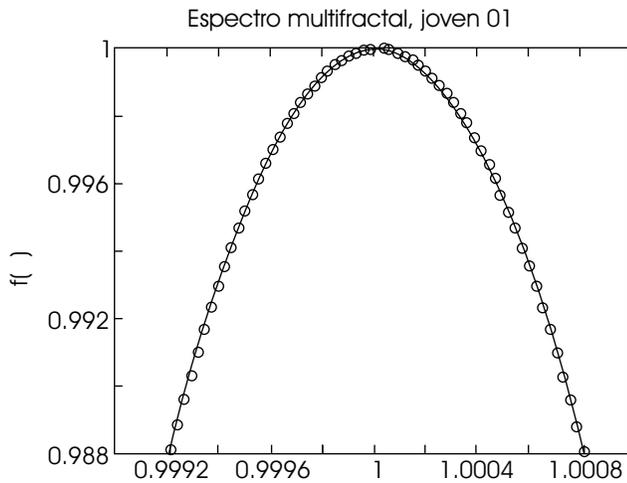


Figura 2. Espectro multifractal correspondiente a la primera serie del grupo de control (de jóvenes sanos). El ancho del espectro es pequeño y su forma es simétrica.

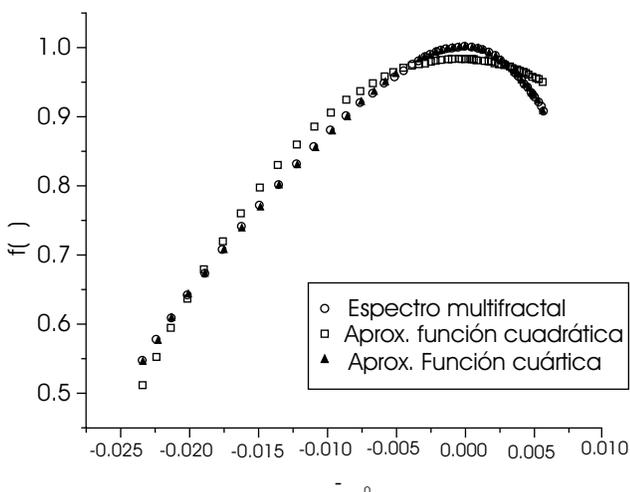


Figura 3. Espectro multifractal de la serie de tiempo de uno de los niños, 138 meses, (círculos). El espectro es asimétrico, pero no es de los más asimétricos; sin embargo, la aproximación por medio de una función cuadrática (cuadrados) a simple vista no parece adecuada (la desviación estándar de la aproximación es 0.0179), en cambio la aproximación por medio de una función de grado cuatro es excelente (la desviación estándar de esta aproximación es de 0.0015).

nentes fractales en la señal, por eso se le llama grado de multifractalidad, mientras más ancho sea el rango, más rica en estructura será la señal. En cuanto al parámetro de asimetría, éste da cuenta del dominio de los exponentes fractales grandes o pequeños, en tal sentido, un espectro desviado hacia la derecha denota un

relativo mayor peso estadístico de los exponentes fractales mayores, el cual corresponde a estructuras finas, y un espectro desviado hacia la derecha indica un dominio de los exponentes fractales menores, lo cual corresponde a series que se ven más suaves.

Se analizaron primero las diez series de tiempo del caminado de los jóvenes adultos sanos, este grupo se usó como referencia, es decir como grupo de control. Se calcularon los espectros multifractales de las diez series para q desde -30 hasta 30 , esto proporciona 61 puntos para las curvas de $f(\alpha)$ versus α , se obtuvo una curva que ajustara los puntos usando splines cúbicas y por extrapolación se obtuvieron α_{min} y α_{max} . Todos los espectros de los jóvenes sanos son muy estrechos, de hecho el promedio del ancho del espectro multifractal $\Delta\alpha$ para estas diez series fue 0.01632 ± 0.00112 , este valor tan pequeño hace dudar si realmente existe un comportamiento multifractal o realmente es monofractal. Porque es importante mencionar que cuando se calcula el espectro multifractal a una serie monofractal de longitud finita se obtiene un ancho diferente de cero de la distribución de exponentes de Hölder, esto es un resultado inevitable en todos los algoritmos que calculan el espectro multifractal. Por lo tanto, la existencia de este ancho diferente de cero puede ser una fuente de confusión entre una serie monofractal de longitud finita y una serie realmente multifractal. Hay varias formas de resolver este problema, una de ellas dice que una serie multifractal puede distinguirse de una serie monofractal de la misma longitud únicamente si el ancho de su distribución de exponentes de Hölder es significativamente mayor que el que corresponde a la serie monofractal. No se presenta aquí este análisis, porque para las series de caminado el problema ha sido resuelto por West y Scafetta²⁹; ellos han demostrado que las series del intervalo de paso es ligeramente multifractal. Por lo tanto, las diez series de los jóvenes sanos tienen valores de α_0 muy cercanos a 1, el ancho es pequeño de tal manera que son ligeramente multifractales y el parámetro B es muy pequeño, lo cual indica que tales espectros son casi simétricos, un poco desviados hacia la izquierda porque B es positivo para diez de las nueve series (véase el recuadro en la Figura 6), de hecho el promedio de B es 0.12426 ± 0.03102 . Después se obtuvo el espectro de las series de caminado de los 50 niños. Esta in-

formación se muestra en la Figura 4 en la cual se ha graficado $\Delta\alpha$ contra la edad en meses. Si en esta figura se trata de localizar el valor de 0.01632 ± 0.00112 , que es el promedio del ancho del espectro de los jóvenes, entonces se verá que es alrededor de los 11 años que los valores de $\Delta\alpha$ se aproximan a los de los adultos jóvenes. Al hacer un análisis de correlación se obtiene una correlación negativa con un valor del coeficiente de correlación de -0.76238 ± 0.03249 , este valor es significativo con un nivel de significancia de 0.05, por lo tanto se establece que el ancho del espectro multifractal de las series de caminado de los niños disminuye según la edad se incrementa. Si se hace una clasificación de los datos de los niños en grupos de edad, es decir: (I) 3 y 4 años, (II) 5 años, (III) 6 y 7 años, (IV) 8 años, (V) 10 años y (VI) 11 a 14 años, se obtiene un coeficiente de correlación de -0.9445 ± 0.01433 (Figura 5). De tal forma que puede afirmarse que el $\Delta\alpha$ de la marcha inmadura es mayor que el $\Delta\alpha$ de la marcha madura. Casi a los 11 años los valores de $\Delta\alpha$ están ya en el rango de los jóvenes adultos sanos.

El análisis de asimetría de los espectros de los datos de las series de caminado de los niños se resumen en la Figura 6. Las series de los niños pequeños tienen espectros muy asimétricos, los niños con edades entre 3 y 7 años tienen espectros desviados hacia la derecha y según la edad se

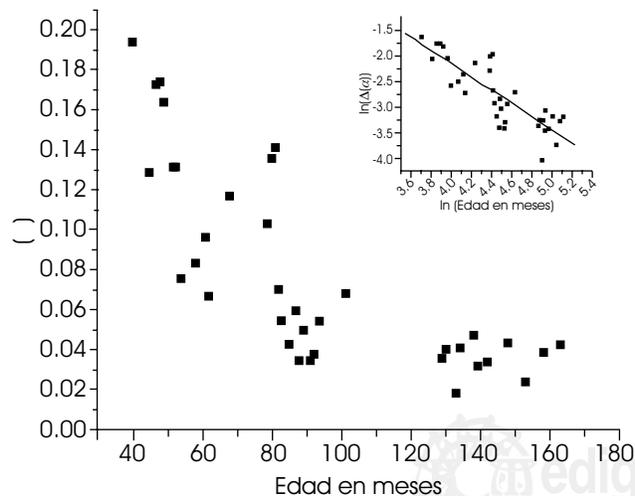


Figura 4. El ancho del espectro multifractal de las series de tiempo de caminado de los niños vs edad. Existe una correlación negativa, lo que significa que el ancho disminuye según la edad se incrementa. En el recuadro se observa una gráfica log-log de los mismos datos.

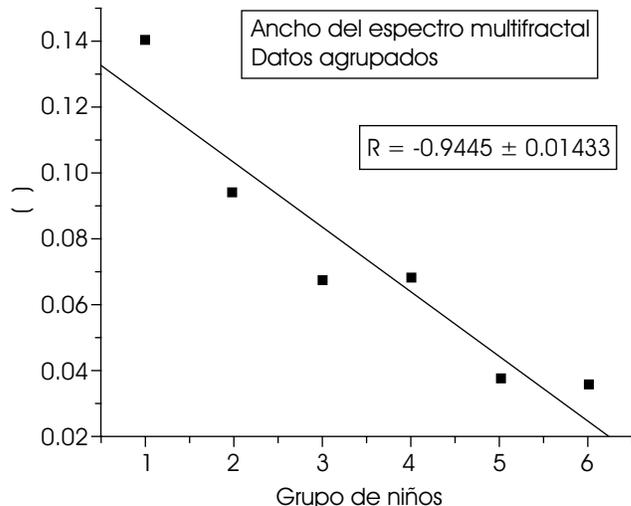


Figura 5. Ancho del espectro multifractal de las series de caminado de niños, datos agrupados. Si los datos de los niños se agrupan por edades se obtiene una correlación negativa con un coeficiente de correlación más cercano a -1.0.

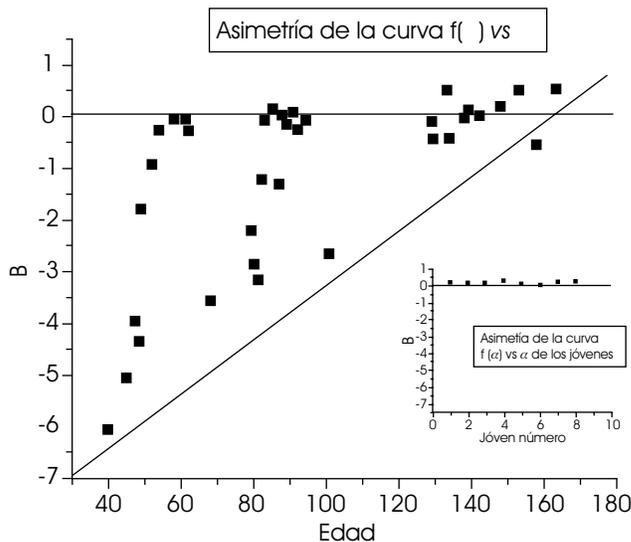


Figura 6. Asimetría de los espectros multifractales de las series de caminado. Las series de los niños más pequeños tienen espectros multifractales muy asimétricos, según aumenta la edad estos espectros se van acercando más a la simetría. En el recuadro se observa que los espectros de las series de los jóvenes sanos son prácticamente simétricos.

incrementa los espectros se vuelven más simétricos y la mayoría de los niños mayores de 11 años muestran espectros casi simétricos, un poco desviados hacia la izquierda como en caso de los adultos jóvenes sanos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio cuantitativo de la variabilidad del intervalo de paso en el caminado con análisis multifractal revela que las variaciones en la duración del ciclo de caminado son significativamente más grandes en niños sanos de 3 y 4 años comparadas con niños de 6 y 7 años y éstas a su vez más grandes que los niños de 11 a 14 años. La estructura temporal de las fluctuaciones en el intervalo de paso no está completamente desarrollada en niños de hasta 7 años de edad y es en los niños más grandes (de 11 a 14 años) que los valores de la dinámica del paso se aproximan a los valores observados en los adultos. Estos resultados se han basado en el comportamiento de las variaciones del ancho de los espectros multifractales de caminado, el cual según la edad se incrementa, se reduce hasta aproximarse a los valores de ancho de los espectros de las series de caminado de los jóvenes; y también en las variaciones del coeficiente lineal de una función de cuarto grado usada para describir el comportamiento asimétrico de los espectros multifractales. Por lo tanto, es hasta edades de 11 a 14 años que se puede hablar de una marcha madura; en cierta forma, esta conclusión ya había sido obtenida por Hausdorff et al.⁶, pero se ofrece aquí un análisis formal basado en el formalismo multifractal que tiene algunas ventajas con respecto a técnicas de análisis tradicional, una de las ventajas más importantes es que esta técnica proporciona más información, por ejemplo, se pueden obtener valores especiales de la dimensión fractal para diferentes valores del parámetro q , $f(0)$ es la dimensión de capacidad, $f(1)$ es la dimensión de información, $f(2)$ es la dimensión de correlación, etc. Se pueden también analizar las dimensiones generalizadas pero no se presenta este análisis en este trabajo.

Para cualquier médico entrenado es fácil reconocer si alguien tiene problemas en el caminado, probablemente también le sea fácil reconocer tales problemas a partir del análisis visual de las series de tiempo de caminado, incluso es posible que deduzca qué tipo de problema tenga una persona con un patrón anómalo de caminado. Lo que probablemente ya no sea tan fácil, es decidir acerca de la severidad del problema. El análisis de las series de tiempo podría servir de ayuda en el diagnóstico clínico de problemas en el caminado. Como se ha mostrado en este trabajo, en el caso de los

niños hay una serie de parámetros del análisis multifractal que pueden ayudar a dilucidar cuándo el caminado de un niño es maduro y a que edades puede decirse que la marcha es madura. La gráfica del recuadro de la Figura 4 es un ajuste logarítmico del ancho del espectro contra la edad, puede en principio pensarse que las series de caminado de aquellos niños cuyos valores se alejen de esta gráfica puedan tener un problema. Claro que la decisión no puede nada más basarse en el cálculo de $\Delta\alpha$ o de B , habrá que calcular varios factores que en conjunto puedan llevar al diagnóstico¹⁷. Tampoco se espera que este análisis sustituya la experiencia y el conocimiento de los médicos, pero podrían ayudarle en muchos casos.

El ancho del espectro multifractal o grado de multifractalidad se ha asociado a la complejidad de las series de tiempo en el siguiente sentido: si el grado de multifractalidad es mayor se requiere un conjunto más grande de exponentes de Hölder para describir a la serie y por lo tanto un número más grande de dimensiones fractales. Entonces puede afirmarse que las series de los niños son más complejas que las de los adultos jóvenes sanos, hay una pérdida de complejidad según la edad se incrementa, se sabe también que esta complejidad vuelve a aumentar cuando los adultos envejecen o tienen alguna enfermedad que afecte el caminado, como por ejemplo el mal de Parkinson.

Como se observa los resultados son parciales, pero ilustran varios detalles importantes. Si se tuviera forma de registrar las series de tiempo de caminado de las personas, entonces el cálculo de parámetros adecuados (incluso algunos del análisis multifractal) podría indicar si se tiene o no algún problema en el caminado y tal como se ha tratado de mostrar en este trabajo, esto puede ser útil en el estudio del caminado de los niños. Probablemente, además de ayudar al mejor entendimiento del caminado humano, podría ayudar a mejorar el ajuste de prótesis para el sistema de locomoción, o tal vez en la evaluación de los tratamientos de rehabilitación en caso de alguna enfermedad o accidente que haya afectado a tal sistema.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a EDD, EDI, CGPI y COFFA del Instituto Politécnico Nacional por el soporte parcial de este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sánchez J, Prat J, Hoyos V, Viosca E, Soler E, Cortés A, Comín A, La Fuente R, Vera P. Biomecánica de la marcha humana normal y patológica. Instituto de Biomecánica de Valencia. España, IBV, 1993.
2. Glifford G, Hughes JA. A gait analysis system in clinical practice. *J Biom Eng* 1983; 5: 297-301.
3. Crowe A, Shiereck P, Ruud W, Keesen W. Characterization of human gait by mean of the body center of mass oscillations derived from ground reaction forces. *IEEE transactions on bio-medical engineering*. 1995; 42(3): 293-303.
4. Gard SA, Childress DS. The influence of the Stance-Phase Knee Flexion in the Vertical Displacement of the Trunk During Normal Walking. *Arch Phys Med and Rehabil* 1999; 80(1): 26-32.
5. Kerrigan DC, Della Croce U, Marciello M, Riley PO. A refined view of the determinants of gait: significance of heel rise. *Arch Phys Med Rehabil* 2000; 81: 1077-80.
6. Hausdorff JM, Zeman L, Peng C-K, Goldberger AL. Maturation of gait dynamics: stride to stride variability and its temporal organization in children. *J Appl Physiol* 1999; 86(3): 1040-47.
7. Shumway-Cook A, Woolacott MH. *Motor Control Theory and Practical Applications*. MD: Williams and Wilkins, Baltimore, 1995.
8. Beck RJ, Andriacchi TP, Kuo KN, Fermier RW, Galante JO. Changes in the gait patterns of growing. *J Bone Joint Surg Am* 1981; 63: 1452-57.
9. Sutherland DH, Olshen RA, Cooper L, Woo SL. The development of mature gait. *J Bone Joint Surg Am* 1980; 62: 336-53.
10. Hausdorff JM, Peng C-K, Ladin Z, Wei JY, Goldberger AL. Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in the stride interval of human gait. *J Appl Physiol* 1995; 78: 349-58.
11. Hausdorff JM, Purdon PL, Peng C-K, Ladin Z, Wei JY, Goldberger AL. Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuations. *J Appl Physiol* 1996; 80: 1448-57.
12. Hausdorff JM, Mitchell SL, Firtion R, Peng C-K, Cudkovic ME, Wei JY, Goldberger AL. Altered fractal dynamics of gait: reduce stride interval correlations with aging and Huntington's disease. *J Appl Physiol* 1997; 82: 262-69.
13. Muñoz DA, Del Rio CJL, Angulo BF. Fractal and multifractal analysis of human gait AIP Conference Proceedings 2003; 682(1): 243-50.
14. Mandelbrot BB. *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman, New York, 1982.
15. Bolis CL, Licinio J, eds. *The Autonomic Nervous System*. World Health Organization, Geneva, 1999.
16. Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Mark RG, Mietus JE, Moody GB, Peng C-K, Stanley HE. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation* 2000; 101(23): e215-e220. <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/101/23/e215>.
17. Muñoz DA, Angulo-Brown F, Del Rio CJL, Calleja QE. Fractal analysis of human gait: old and young, healthy and ill subjects. *Rev Mex Fis* 2004. Accepted for publication.
18. Halsey TC, Jensen MH, Kadanoff LP, Procaccia I, Shraiman BI. Fractal measures and their singularities: the characterization of strange sets. *Phys Rev A* 1986; 33: 1141.
19. De Arcangelis L, Redner S, Coniglio A. *Phys Rev B* 1986; 34: 4656.
20. Menevau C, Sreenivasan KR. *Phys Rev Lett* 1987; 59: 1424.
21. Feder J. *Fractals*. Plenum Press, New York, 1988.
22. Bunde A, Knopp J, Schellnhuber HJ, eds. *The Science of Disasters*. Springer-Verlag, Germany, 2002.
23. Ivanov PCh, Nunes Amaral A, Goldberger AL, Stanley HE. Stochastic feedback and the regulation of biological rhythms. *Europhys Lett* 1998; 43(4): 363-68.
24. Stanley HE, Amaral LAN, Goldberger AL, Havlin S, Ivanov PCh, Peng C-K. Statistical physics and physiology: Monofractal and multifractal approaches. *Physica A* 1999; 270: 309-324.
25. Del Rio CJL, Muñoz DA. Multifractality in physiological time series. *AIP Conference Proceedings* 2002; 630(1): 191-201.
26. Muñoz DA, Almanza VVH, Del Rio CJL. Multifractal analysis of aging and complexity in heartbeat time series. *AIP Conference Proceedings* 2002; 724(1): 186-191.
27. Ashkenazy Y, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Stanley HE. A stochastic model of human gait dynamics, *Physica A* 2002; 316: 662-70.
28. Muñoz DA, Del Rio CJL, Angulo BF. Multifractal analysis of aging, illness and complexity in human gait time series. *Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, Sidney Australia, 2003, ISBN 187704040142, paper No. 3179.
29. West BJ, Scafetta N. Nonlinear dynamical model of human gait. *Phys Rev E* 2003; 67, 051917 (1-10).
30. Chhabra AB, Menevau C, Jensen RV, Sreenivasan KR. Extraction of underlying multiplicative processes from multifractals via the thermodynamic formalism. *Phys Rev A* 1989; 40(8): 4593-4611.
31. Chhabra A, Jensen RV. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. *Phys Rev Lett* 1989; 62(12): 1327-30.
32. Chhabra AB, Menevau C, Jensen RV, Sreenivasan KR. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum and its application to fully developed turbulence. *Phys Rev A* 1989; 40: 5284-94.
33. Telesca L, Lapenna V, Macchiato M. Mono and multifractal investigation of scaling properties in temporal patterns of seismic sequences. *Chaos, Solitons and Fractals* 2004; 19: 1-15.