

# El retrato de fase como una herramienta de análisis del comportamiento motor\*

*Phase Portraits as a Tool for Analysis of Motor Behaviour*

## ROSA ANGULO-BARROSO

Center of Human Growth and Development and School of Kinesiology  
University of Michigan (Ann Arbor, USA)  
Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya - Centro de Barcelona

## ALBERT BUSQUETS FACIABÉN

Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya - Centro de Barcelona

## ELIANE MAUERBERG-DECASTRO

Department of Physical Education  
State University of São Paulo - UNESP (Rio Claro, Brasil)

## Correspondencia con autora

Rosa Angulo-Barroso  
[rangulo@gencat.cat](mailto:rangulo@gencat.cat)  
[rangulo@umich.edu](mailto:rangulo@umich.edu)

## Resumen

Existe un gran número de investigaciones centradas en la adquisición y perfeccionamiento de habilidades motrices. Estas investigaciones intentan explicar cuál es la fuente y los procesos de cambio de los comportamientos motores que permiten al individuo adquirir o perfeccionar una habilidad. La ventaja de la Teoría de los Sistemas Dinámicos (TSD) como marco de referencia es la inclusión de un análisis contextual en el proceso de aprendizaje. El objetivo de este artículo es dar a conocer una metodología llamada retrato de fase, la cual facilita el estudio del comportamiento motor basándose en los principios de la TSD. Datos biomecánicos tratados con una técnica de reducción adecuada constituyen una buena herramienta para describir y entender los cambios que suceden en el comportamiento motor. Los retratos de fase, mediante un gráfico (posición angular, velocidad angular), son capaces de capturar el complejo juego de fuerzas que influyen en el comportamiento motor. En este artículo, las formas de las trayectorias de los gráficos nos indicaron: (1) cómo el organismo se comporta durante la realización de las habilidades motoras analizadas mostrando sus patrones generales; (2) las singularidades poblacionales (con deficiencias y sin deficiencias) o individuales; (3) los comportamientos adquiridos en el proceso de aprendizaje (novato y experto); y (4) los cambios producidos por manipulación del entorno. No obstante, los retratos de fase aunque muy útiles para resumir el comportamiento motor, no son representaciones completas del mismo y deberíamos complementarlos con otras técnicas de análisis.

**Palabras clave:** aprendizaje motor, biomecánica, teoría de los sistemas dinámicos, locomoción, habilidades deportivas

## Abstract

### *Phase Portraits as a Tool for Analysis of Motor Behaviour*

*A significant amount of research has been done that focuses on the acquisition and improvement of motor skills. This research attempts to explain the source and the processes of change in motor behaviour that enable the individual to acquire or improve a skill. The advantage of the Theory of Dynamic Systems (TDS) as a frame of reference is the inclusion of contextual analysis in the learning process. The purpose of this paper is to present a methodology called phase portraits which facilitates the study of motor behaviour based on the principles of TSD. Biomechanical data treated with an appropriate reduction technique are a good tool for describing and understanding the changes that occur in motor behaviour. Phase portraits using a chart (angular position, angular velocity) are able to capture the complex interplay of forces that influence motor behaviour. In this paper, the shapes of the trajectories in the charts will show: (1) how the body behaves during the performance of analyzed motor skills by showing its general patterns; (2) population (with gaps and without gaps) or individual singularities; (3) behaviours acquired during the learning process (novice and expert); and (4) the changes caused by manipulation of the environment. Nonetheless, although phase portraits are very useful for summarizing motor behaviour, they are not complete representations of it and need to be supplemented by other analytical techniques.*

**Keywords:** motor learning, biomechanics, dynamic systems theory, locomotion, sports skills

\* Financiación: con el apoyo de la Secretaria General de l'Esport y el Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya.

## Introducción

A lo largo de la vida surgen, se desarrollan e incluso desaparecen comportamientos motrices. Estos comportamientos están vinculados a movimientos con objetivos concretos, es decir, se relacionan con tareas. Cuando la producción de una tarea permite resolver un problema motriz alcanzando las máximas expectativas de éxito y con un mínimo de tiempo y energía, estamos hablando de habilidad (Riera, 2005). Precisamente, una de las preguntas que centran actualmente las investigaciones y debates teóricos recae en cuál es la fuente de los nuevos comportamientos motores y como estos pasan a ser movimientos hábiles (Jensen, 2005).

Durante las últimas décadas del siglo xx han predominado dos teorías sobre el aprendizaje motor: las teorías de maduración neural y las teorías cognitivas. Según las teorías de maduración neural la habilidad llega desde las estructuras jerárquicas del Sistema Nervioso Central (SNC), llamadas generadores centrales de patrones, que producen la secuencia y ritmo de la activación muscular (Clark & Phillips, 1993). Así, el comportamiento es prescrito o predeterminado por la maduración del SNC, lo que implicaría que los otros subsistemas del individuo (dimensiones antropométricas, por ejemplo) y sus relaciones no tienen influencia en el desarrollo de los comportamientos motores. La perspectiva cognitiva entiende que el aprendizaje viene principalmente determinado por representaciones internas previas al movimiento y por los programas motores generalizados a disposición del individuo (Schmidt, 1982). De esta forma el comportamiento es producido por la formación de un esquema motor enfatizado a través de la experimentación.

Ambas teorías, la madurativa y la cognitiva, ignoran la riqueza en el desarrollo de los comportamientos que surgen desde los diversos subsistemas y sus procesos (Thelen & Ulrich, 1991). Estos puntos de vista pueden ser concebibles cuando la tarea a realizar constituye una variante de una previamente aprendida, pero son menos fáciles de aplicar cuando el comportamiento de un sujeto se encuentra delante de una tarea completamente nueva (Delignieres et al., 1998). Además, muchas técnicas para el análisis del comportamiento motor fueron aplicadas solamente para describir el comportamiento en lugar de explicar el proceso de elaboración, organización y adaptación del comportamiento motor. Así, la efectividad del control y el progreso del aprendizaje sólo se evaluaban respecto del total de la actuación (Temprado, Della-Grasta, Farrell, & Laurent, 1997).

Por otro lado, es aceptado que el individuo está formado de múltiples sistemas que interactúan y que dichos sistemas son abiertos, es decir, modifican sus comportamientos bajo la influencia de otros sistemas o de la situación. Una explicación teórica alternativa a la madurativa y la cognitiva que se ha estado desarrollando sobre las últimas décadas es la Teoría de los Sistemas Dinámicos (TSD). La TSD ve el movimiento como un comportamiento emergente que surge desde la dinámica colectiva de todos los subsistemas del organismo que están implicados en la tarea. Entre otros podemos citar: el estatus neural, las características biomecánicas, la experiencia, el nivel de alerta y la precisión visual (Kugler, Kelso, & Turvey, 1982; Thelen & Ulrich, 1991). Los principales factores que condicionan la forma específica del comportamiento motor, los llamados *constraints* en la literatura inglesa, se categorizan en pertenecientes al entorno, a la tarea o al organismo (Clark & Phillips, 1993; Newell, 1986). Los condicionantes del entorno provienen del entorno físico (gravedad, temperatura ambiental, etc.), así como del entorno cultural, los cuales tienen tendencia a promover cierto tipo de movimiento y a desterrar otros. Los condicionantes de la tarea incluyen las características físicas de la tarea en sí misma (implementos, máquinas, etc.) y las instrucciones que se da a los ejecutantes sobre el objetivo o de la coordinación particular que deben realizar. Por último, los condicionantes del organismo incluyen las características físicas del ejecutante (el peso, la altura y la forma del cuerpo, por ejemplo) y sus atributos fisiológicos y psicológicos. El impacto relativo de estas tres categorías de condicionantes en el comportamiento motor se modifica de acuerdo a las circunstancias específicas. Además, la TSD establece que los sistemas y sus relaciones se modifican en el tiempo, son *sistemas dinámicos*. Dichas propiedades dinámicas dan al sistema la capacidad de continua auto-organización gracias a la constante fluctuación que existe entre las interacciones de los subsistemas. La fluctuación de las interacciones, provocada por los cambios de los mismos subsistemas y/o de sus condicionantes, hace que los cambios puedan emerger resultando en un nuevo movimiento o modificando un movimiento ya aprendido.

El aprendizaje, por lo tanto, puede ser considerado como una modificación de la dinámica de los subsistemas del comportamiento motor. La ventaja de utilizar la TSD para enmarcar el aprendizaje motor reside en el hecho que podemos proponer una explicación orientada al proceso, que busca explicar los cambios, e incluye un análisis de las circunstancias en que se desarrolla (Clark &

Phillips, 1993; Thelen & Smith, 1994). Tradicionalmente, el cambio de un comportamiento a otro se ha presentado como un fenómeno progresivo, pero los estudios ya han demostrado que estas transiciones pueden ser abruptas y claramente no-lineales. En la base de estos procesos de cambio reside la *competición* entre lo que el ejecutante quiere o es instruido a hacer (tarea) y la tendencia natural del sistema a preferir ciertos comportamientos motores ya establecidos. Por otro lado, autores seguidores de la TSD (Delignieres, Teulier, & Nourrit, 2009; Thelen & Smith, 1994) proponen que el surgimiento de un comportamiento motor experto se adquiere con la cooperación entre comportamientos nuevos y los ya adquiridos, sin la necesidad de desaprender un comportamiento o competir entre ellos. Así, el individuo hace una primera adaptación del comportamiento motor para satisfacer los requisitos de la tarea, y posteriormente aparece una segunda fase donde el comportamiento motor anterior se va alternando con la coordinación adquirida previamente.

Los cambios en los comportamientos motores suceden cuando subsistemas críticos (llamados parámetros de control) progresan lo suficiente como para generar un punto de transición que provoca un cambio cualitativo (bifurcación) y permite el surgimiento de un nuevo patrón (nueva organización). Los comportamientos motores en un determinado instante de la vida del sistema son definidos como estados atractores, los cuales exhiben una mayor o menor estabilidad. La inestabilidad del sistema permite al sistema explorar nuevas organizaciones y consecuentemente, nuevas soluciones motoras (Kelso, Scholz, & Schöner, 1986). Todos los sistemas dinámicos, aunque estables, siempre sufren algún tipo de fluctuación.

Como hemos dicho, el aprendizaje de una tarea es un proceso no-lineal que implica diversos subsistemas y el contexto donde se realizan. A causa de la complejidad en las relaciones que existen entre los subsistemas humanos para realizar los movimientos, nos encontramos con varias limitaciones cuando queremos analizar el comportamiento motor. Es por lo tanto necesaria una aproximación científica que deshaga la complejidad o multidimensionalidad de los comportamientos motores para entender los cambios que se presentan con el aprendizaje (Jensen, 2005). Los principios y herramientas de la TSD pueden ayudar a entender los orígenes y formas de los comportamientos motores, y las razones del cambio de sus patrones (Clark & Phillips, 1991; Mauerberg, Schuller, & Fantucci, 1994; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2000; Weinstein & Garfinkel, 1989). Así, el principal objetivo de

este artículo es proporcionar a los lectores una metodología para el estudio del comportamiento motor basada en los principios de la TSD llamada retrato de fase. Esta metodología permitirá al investigador analizar los cambios del comportamiento motor de un segmento y/o articulación durante el proceso de adquisición o perfeccionamiento de una habilidad. Para ejemplificar la aplicabilidad de la metodología presentada e identificar sus ventajas y limitaciones, también se presentan varias habilidades motrices analizadas en nuestros laboratorios con dicha metodología.

## Herramientas utilizadas por la TSD para el análisis del comportamiento motor

Uno de los cambios más importantes en las ciencias del desarrollo y aprendizaje es la minuciosa captación, validez y precisión de los datos que reflejan la actividad. La elección de la técnica o herramienta para analizar un fenómeno depende de la potencia de las variables que se obtendrán para dar respuestas a las cuestiones planteadas. La biomecánica nos presenta uno de los mejores campos científicos para el estudio de los comportamientos motores, no sólo para describir los cambios que suceden, sino también para entender porque los cambios pasan (Winter & Eng, 1995; Jensen, 2005). Tradicionalmente la biomecánica ha sido aplicada para describir el comportamiento motor sin explicar el proceso de emergencia y adquisición de las habilidades motrices. Así, parámetros de cinemática y cinética de la locomoción (Eng & Winter, 1995; Foti, Davids, & Bagley, 2000; Prince, Corriveau, Hébert, & Winter, 1997) o de diferentes habilidades deportivas (Arampatzis & Brugemann, 1999; Hiley & Yadon, 2003; en el balanceo en barra fija, por ejemplo) son frecuentemente investigados con el propósito de cuantificar el comportamiento. Para realmente analizar el proceso de cambio de los comportamientos motores, es necesario que estos conceptos biomecánicos sean combinados con técnicas de reducción de datos, con las que conseguiremos representar, resumir y explicar el comportamiento motor sin perder su contextualización.

Varias técnicas de reducción de datos del campo de la ingeniería, física aplicada, o la misma biomecánica vienen siendo aplicadas en el estudio de los sistemas biológicos complejos, en particular al comportamiento motor humano. Al asumir la TSD como marco referencial de nuestras investigaciones experimentales, la

elección de las técnicas de reducción de datos a utilizar debe ser compatible con los principios propuestos por dicha aproximación. Por otro lado, las herramientas utilizadas deben ser capaces de mostrar las generalidades que exhibe un comportamiento motor debido a las propiedades comunes dentro de cada población, además de mostrar su singularidad a causa de sus características individuales. Por ejemplo, las características diferenciadas dentro del Sistema Nervioso Central (SNC) de individuos portadores de parálisis cerebral “fuerzan” a una organización o cooperación diferente entre los subsistemas, resultando en un comportamiento motor singular. Así, los procesos de adaptación de algunas poblaciones portadoras de deficiencias están asociados con reglas de cooperación diferenciadas de aquellas observadas en poblaciones no portadoras de deficiencias. En el análisis de los comportamientos motores de los individuos portadores de parálisis cerebral, las herramientas de reducción correctamente seleccionadas mostrarán patrones similares a la población no portadora de deficiencias debido a las características que compartimos todos los humanos y las características de la tarea. A la vez, estas técnicas de reducción de datos pondrán de relieve las adaptaciones que la población portadora de deficiencias realiza en el patrón del comportamiento motor de dicha tarea.

Además de las diferencias causadas por los condicionantes del organismo, los comportamientos motores pueden surgir o modificarse para servir a un propósito (condicionantes de la tarea) y su constancia puede ser o no preservada en un amplio rango de demandas cambiantes del entorno (condicionantes del entorno). Por ejemplo, podemos andar a distintas velocidades y sobre terrenos diversos mientras mantenemos aún el “andar”. El mantenimiento del comportamiento motor sobre estos cambios permite adaptaciones de los mismos comportamientos más que reorganizaciones y creación de nuevos comportamientos (Clark & Phillips, 1993). Las herramientas de análisis elegidas han de facilitar también la observación de las adaptaciones del comportamiento al entorno.

Todo sistema muestra cierto grado de fluctuación que le permite adaptar el movimiento o crear uno nuevo. A pesar de esta fluctuación inherente, los comportamientos establecidos presentan un estado estable. Los estados de transición de un sistema inestable a un sistema estable, o viceversa, son característicos de los procesos de aprendizaje. Las herramientas seleccionadas han de mostrar las fluctuaciones que permiten al sistema ser flexible y estable al mismo tiempo. En los puntos de transición, estas fluctuaciones intrínsecas aumentan y con ellas au-

mentan la variabilidad del comportamiento colectivo. Para ser capaces de analizar el comportamiento motor es necesario poder reducir la complejidad del sistema, alta-dimensionalidad, a una baja-dimensionalidad. Thelen y Smith (1994) proponen que unos pocos parámetros (variables esenciales) pueden caracterizar el funcionamiento del comportamiento motor por una simplificación de sus dimensiones y, además, estos pueden ser abstraídos en representaciones gráficas. La identificación de la variable esencial y de su valor permite la identificación de los distintos estados del sistema, estables o inestables, que constituyen la dinámica del comportamiento motor (Temprado et al., 1997).

### El retrato de fase (Phase Portrait) como técnica de análisis del comportamiento motor

#### Elaboración de los retratos de fase

Para entender mejor la baja-dimensionalidad, u organización fundamental de un sistema, podemos utilizar representaciones geométricas como los gráficos de retratos de fase. Los retratos de fase capturan el juego complejo de fuerzas activas y pasivas que se producen en un movimiento a través de un gráfico. Así, los retratos de fase son una descripción resumida de las interrelaciones del sistema y el surgimiento de la auto-organización del comportamiento motor. El gráfico del retrato de fase representa los cambios en la cinemática (posición angular versus velocidad angular) dentro de una región específica del sistema de coordenadas, región referida aquí como espacio del estado (*state space*) (Abraham & Shaw, 1984). A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para la realización de un gráfico de retrato de fase (Kurz & Stergiou, 2002, 2004; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2001):

1. Primero, el desplazamiento angular es normalizado.

$$i = \frac{2 [ i - \min( i ) ]}{\max( i ) - \min( i )} - 1$$

donde (grados) son los ángulos del recorrido articular

2. A continuación, la velocidad angular es normalizada. La velocidad angular igual a cero ha de

corresponder a una velocidad angular normalizada igual a cero.

$$i = \frac{i}{\max( i )}$$

donde (grados/segundos) son la velocidad angular del recorrido articular

3. Graficar en el eje de ordenadas y la velocidad angular ( ) y en el eje de abscisas x el ángulo ( ).

#### Interpretación de los retratos de fase

Para Thelen y Smith (1994) la convergencia de las órbitas de un sistema en una región dentro del espacio del estado caracteriza un atractor. Un atractor, representado por el retrato de fase, es una característica de

preferencia de organización para el sistema. Los retratos de fase frecuentemente son interpretados de forma cualitativa (Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2000; Winstein & Garfinkel, 1989). La forma asumida por la trayectoria del atractor nos da una idea de cómo el organismo se comporta al verse afectado por las distintas restricciones. Los investigadores pueden visualizar patrones comunes en los retratos de fase, así como las diferentes estrategias adoptadas por los sistemas e identificar y definir los mecanismos de control. A continuación presentamos unas pautas para interpretar las formas que adquiere el retrato de fase durante el comportamiento motor de una articulación o de un segmento (Kurz & Stergiou, 2004; Mauerberg-deCastro & Angulo-Kinzler, 2001; Winstein & Garfinkel) (tabla 1).

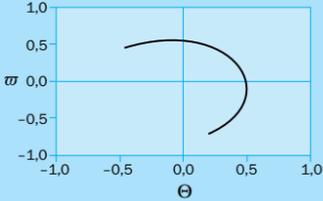
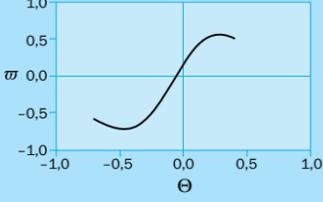
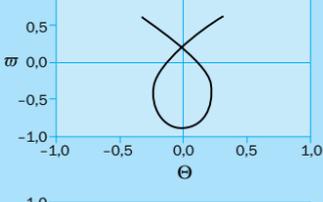
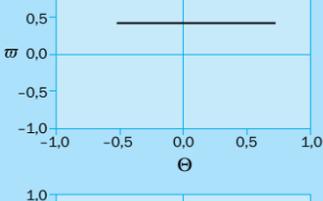
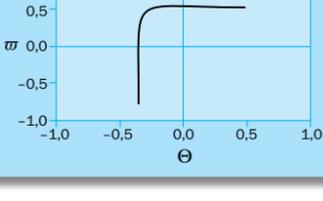
Representación gráfica	Interpretación
	La presencia de trayectorias suaves y redondeadas indica un patrón bien controlado y estable. Existen propiedades elásticas del sistema músculo-tendón involucradas en la producción de trayectorias suaves y redondeadas.
	Las inflexiones y protuberancias son mecanismos de control utilizados para parar y reiniciar el sistema.
	Los bucles (loops) que cruzan a velocidad 0 son considerados indicadores de la presencia de reversiones. Un gran número de cruces en el valor 0 podría sugerir un gran número de cambios en la dinámica del segmento.
	Una velocidad constante implica que la aceleración es 0 y por lo tanto la fuerza neta aplicada es 0. La presencia de velocidades constantes, observables en la presencia de mesetas, supone el aporte de un flujo continuo de energía para mantener el segmento en esa trayectoria restrictiva. En cambio, el movimiento libre bajo el influjo de las fuerzas pasivas, como la gravedad, se manifiesta a la inversa.
	La presencia de cantos cuadrados es una evidencia de acciones explosivas o balísticas. Los mecanismos de control actúan para parar o desacelerar la acción así como para acelerar el movimiento después de una trayectoria constante.

Tabla 1  
Posibles formas que pueden asumir los retratos de fase y su interpretación

**Estabilidad y variabilidad del comportamiento motor**

El atractor muestra una preferencia (predisposición a una configuración) que no siempre puede ser cambiada con facilidad. Por ejemplo, las configuraciones del movimiento como las de la locomoción son atractores de tanta fuerza y estabilidad que perturbaciones incluso drásticas no les afectan. Al contrario, muchas habilidades deportivas son fácilmente desestabilizadas por manipulaciones contextuales, falta de práctica o falta de atención. Los comportamientos cíclicos, como la marcha o los molinos en la barra, son marcados por la repetición dentro de una órbita cerrada del espacio del estado. La repetición de las trayectorias de los retratos de fase que caracterizan la estabilidad del patrón, puede sufrir pequeñas perturbaciones a causa de la dinámica típica de los sistemas abiertos. Estas variaciones, observables en el gráfico como pequeños cambios de tamaño o de forma, que no afectan el patrón general confirman la flexibilidad del sistema (*fig. 1a* durante la carrera y *fig. 1b* durante el molino en barra fija de gimnasia). Por otra parte, la extrema rigidez en el comportamiento, marcada por una repetición con poca variabilidad, es una evidencia de falta de flexibilidad o extremo control en la ejecución del movimiento observable durante el proceso de aprendizaje (*fig. 1c* en la marcha y *fig. 1d* en el molino de barra fija). Similarmente, la extrema irregularidad en las trayectorias son una señal de inestabilidad (*fig. 1e* en la marcha y *fig. 1f* en el molino de barra fija).

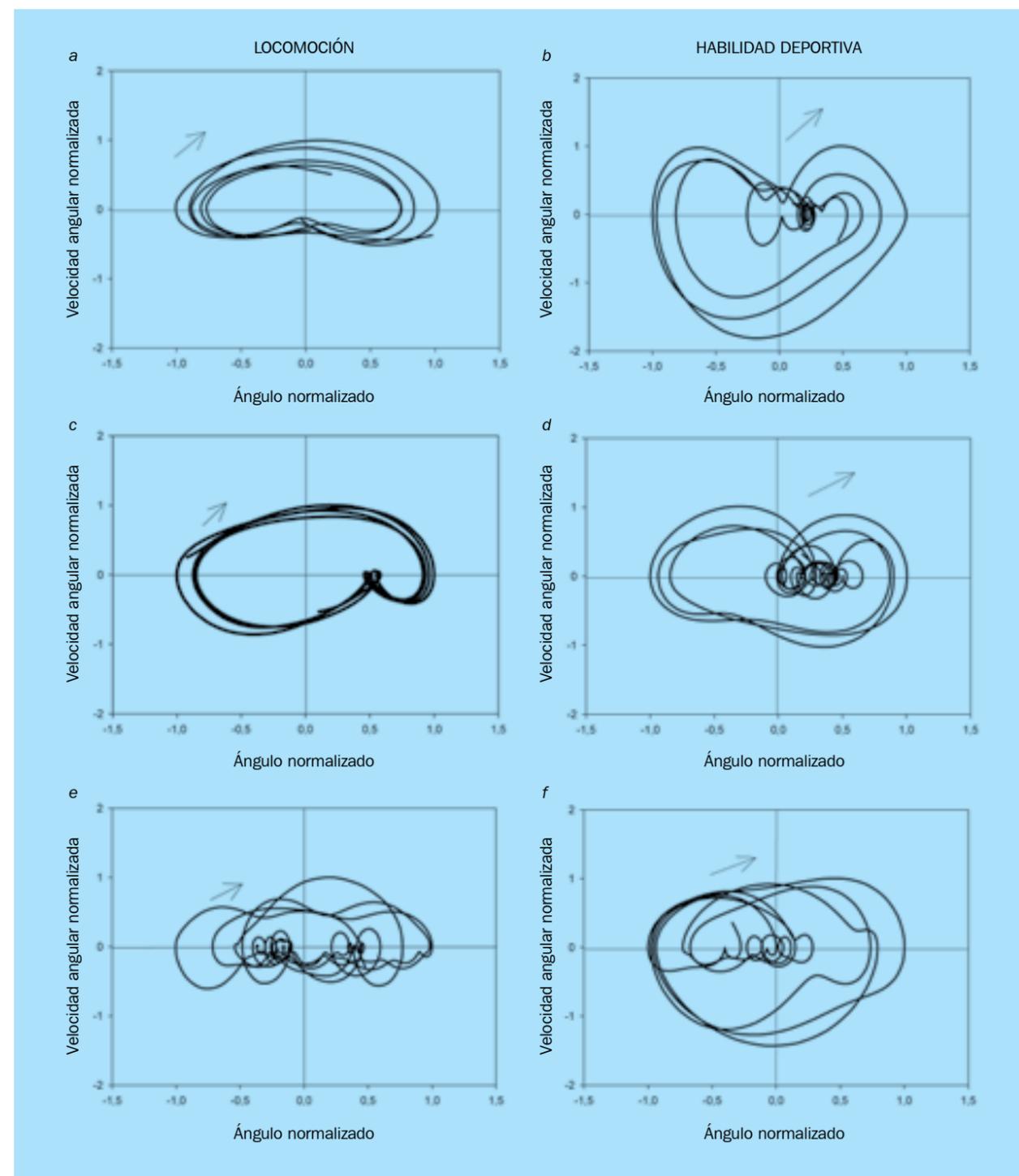
Como hemos explicado antes, la tarea (caminar, molino en la barra), la situación del entorno (suelo o barra de equilibrio) y las condiciones del organismo (presencia de un síndrome o patología cerebral) son factores importantes para justificar la estabilidad/inestabilidad del comportamiento. Tanto los niños portadores como no-portadores de deficiencias pueden adquirir patrones de comportamiento estables. En el proceso de análisis en los cambios de estos comportamientos la variabilidad y la especificidad son aspectos importantes a tener en cuenta. La *figura 2* presenta el proceso de aprendizaje de la marcha de un niño con síndrome de Down durante 8 meses de práctica (*a*, *c* y *e*) y de un balanceo en barra fija por gimnastas con distinta experiencia (*b*, *d* y *f*). Inicialmente las trayectorias para cada ciclo son distintas y el patrón no se percibe, pero con la práctica la forma trazada por el retrato de fase en cada ciclo se asemeja y emerge un patrón que será similar al del adulto o experto (ver *fig. 2*).

**Eficiencia mecánica del comportamiento motor**

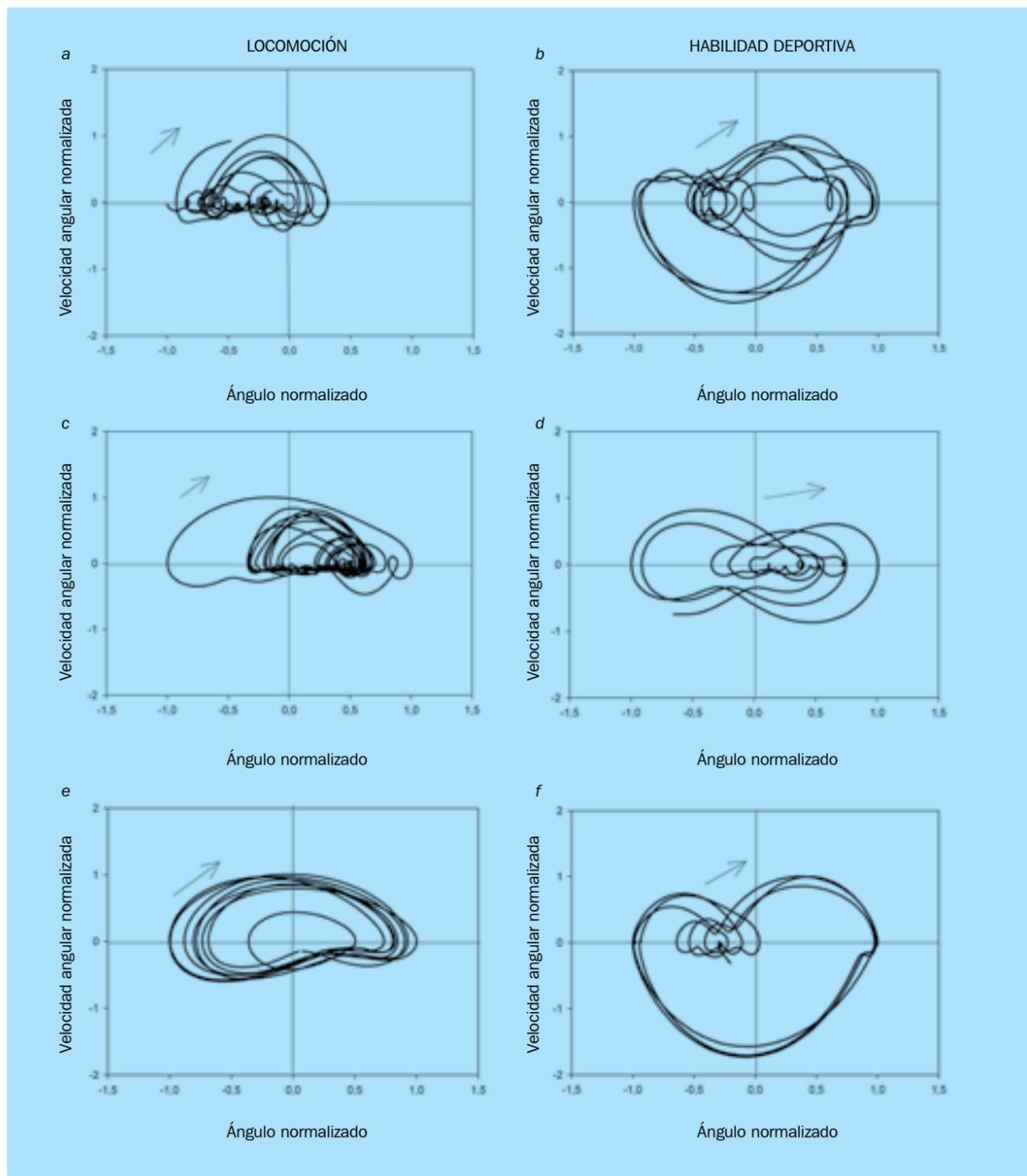
Otro aspecto importante durante el surgimiento y perfeccionamiento de un comportamiento motor se relaciona con la eficiencia del movimiento. La disipación de energía durante el movimiento como un proceso de gasto de energía, y con ello la eficiencia mecánica, puede ser visualizada en los retratos de fase basándonos en las inflexiones (cambios rápidos de velocidad) y expansiones de las trayectorias (el tamaño del atractor como producto de la relación entre el desplazamiento y la velocidad). Mucha de la energía gastada es generalmente resultado de los cambios de velocidad, como podemos ver en la *figura 3a* y *3b* el gasto de energía se vincularía a un movimiento amplio y más lento con mayor desplazamiento.

Las expansiones de las trayectorias se visualizan como una mayor área del espacio de estado indicando un mayor gasto energético. Aunque si los retratos de fase son normalizados podemos encontrarnos que el área aumente o disminuya perdiendo su tamaño original. A pesar de esta limitación, la normalización nos permite comparar retratos de fase de diferentes sujetos o en diferentes contextos. Un ejemplo donde se producen estas diferencias entre el tamaño del retrato de fase normalizado y no normalizado es la *figura 3c*. En esta figura, un bebé exhibe pequeños pasos en la cinta rodante probablemente debido a las sensaciones (cosquillas o irritación en la planta del pie) causadas por las protuberancias de goma añadidas sobre la cinta. Esta manipulación del entorno probablemente hace que el bebé opte por no ampliar el paso, de esta forma, no aumenta la presión de la planta del pie sobre una superficie desagradable para él. Si observásemos el retrato de fase sin normalizar el área ocupada, y con ello el gasto energético implicado, sería muy pequeña. Al contrario, el área ocupada se expande una vez normalizados el desplazamiento y la velocidad angular, no por ello implicando un mayor gasto energético (*fig. 3c*). Lo mismo sucede en la *figura 3d*, donde se observa el comportamiento motor de la cadera durante los balanceos de poca amplitud de un niño gimnasta de poca experiencia.

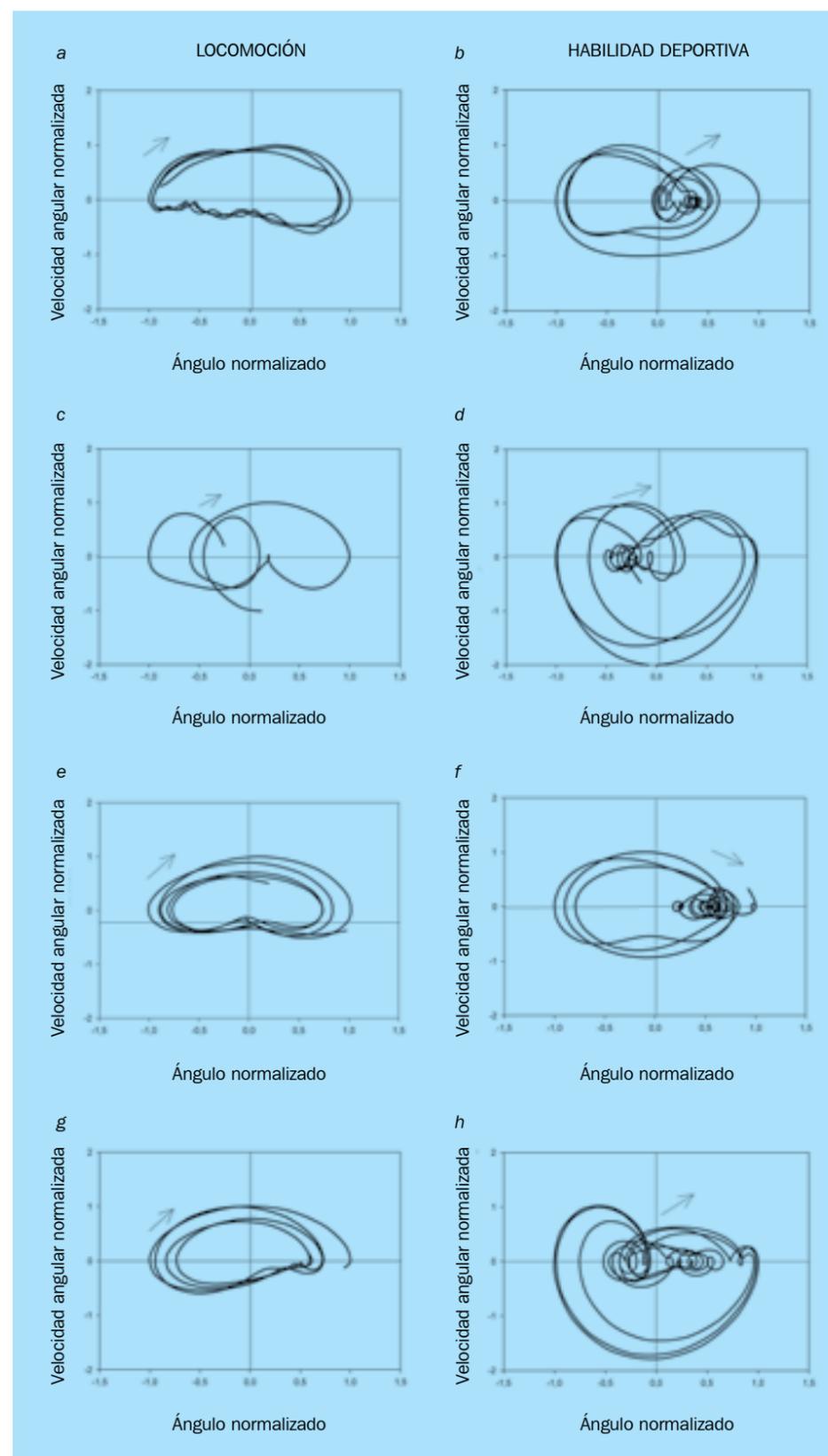
En las *figuras 3e* y *3g*, se puede observar como dos niños portadores del síndrome de Down tienen similares disipaciones de energía en dos tareas, correr en el suelo y caminar en un trampolín respectivamente. En el primer caso la impulsión generada en la carrera hace al atractor expandir gradualmente su trayectoria, mientras que al caminar en el trampolín la elasticidad de la lona elástica genera el impulso (inclinación mostrada en la parte inferior de la gráfica).

**Figura 1**

A la izquierda, retratos de fase del muslo en la locomoción: a) niño portador del síndrome de Down corriendo en un suelo; c) adolescente portador de parálisis cerebral caminando en el suelo; e) niño portador del síndrome de Down caminando sobre una barra. Y a la derecha, retratos de fase del ángulo formado por el tronco y el muslo durante el balanceo en barra fija: b) gimnasta experto (categoría senior) realizando balanceos completos; d) niño gimnasta (categoría alevín) realizando balanceos completos; f) niño gimnasta de categoría alevín realizando balanceos no completos



**Figura 2**  
 A la izquierda, retratos de fase del muslo de un bebé portador del síndrome de Down en un estadio pre-locomotor caminando en una cinta rodante: a) evaluación inicial; c) después de 3 meses de práctica en la cinta rodante; e) después de 5 meses de práctica en la cinta rodante. Y a la derecha, retratos de fase del segmento tronco en relación a los muslos en varias etapas de formación de los gimnastas en barra fija: b) balanceo de un niño gimnasta (categoría alevín) con 2 años de práctica; d) balanceo completo de un niño gimnasta (categoría alevín) con 4 años de práctica; e) balanceo completo de un adolescente gimnasta (categoría infantil) con 6 años de práctica



**Figura 3**  
 Retrato de fase: a) de la pierna de un individuo de edad avanzada caminando con cadencia impuesta de 60 pasos/minuto por un suelo; b) de la cadera de un gimnasta experto realizando molinos a baja velocidad; c) de la pierna de un bebé portador del síndrome de Down caminando sobre una cinta rodante con protuberancias de goma (efecto distorsionado debido a la normalización); d) de la cadera de un niño gimnasta realizando balanceos en barra con poca amplitud de movimiento (efecto distorsionado debido a la normalización); e) de la pierna de un niño portador de síndrome de Down corriendo en el suelo; f) de la cadera de un niño gimnasta realizando un molino sin aprovechar las fuerzas externas; g) de la pierna de un niño portador del síndrome de Down caminando en una cama elástica; h) de la cadera de un niño gimnasta realizando un molino aprovechando las fuerzas externas

Además, en este último caso donde el niño se somete a la acción de las fuerzas pasivas y elásticas de la superficie, podemos ver como estas fuerzas dificultan el control del movimiento, lo cual queda reflejado en la variabilidad de las inflexiones que se presentan en la parte derecha e inferior de la gráfica. Ambas situaciones exhiben grandes cantidades de energía. Las figuras 3f y 3h corresponden a la realización por parte de dos niños gimnastas de varios balanceos completos en la barra fija. En el primer caso se aprecia una parte inferior de la curva más plana, lo que indica un menor aprovechamiento de la fuerza de la gravedad y de los momentos de inercia.

**Adaptaciones del comportamiento motor**

Los distintos procesos o adaptaciones de los comportamientos motores pueden ser analizados simplemente visualizándose las formas del retrato de fase bajo restricciones ambientales y biológicas. En la figura 4, columna de la izquierda, cada bebé exhibe un patrón único de movimiento de la marcha sobre una cinta rodante. Así, en la figura 4a, donde el bebé camina en condiciones naturales, se observa una trayectoria que se inicia con una velocidad constante (meseta en la parte superior del gráfico) y que posteriormente desacelera causando la formación de una esquina (forma cuadrada en el atractor). En la figura 4c se presenta el comportamiento motor de un bebé que está caminando sobre una superficie de velcro colocado sobre la cinta y en la planta del bebé con un calcetín. Las fuerzas elásticas del segmento y las características de la superficie son probablemente responsables del movimiento balístico que marca el inicio de la trayectoria (forma cuadrada en el atractor). A continuación, gradualmente sucede una desaceleración de la pierna en la mitad de la fase de balanceo de la marcha (parte superior de la gráfica) y reasumiendo un poco de velocidad angular al final de la misma fase de balanceo. Las figuras 4e y 4g pertenecen a dos bebés caminando sobre una cinta rodante con protuberancias de goma. En el primer caso la fase de balanceo de la marcha es claramente pendular, no obstante, en la fase de apoyo (parte inferior de la gráfica) la trayectoria es plana y sin ganancia de velocidad angular, implicando una participación muscular de control del movimiento para estabilizar el muslo. En el segundo caso, el movimiento errático de la pierna en la fase de balanceo marca los dos bucles en la trayectoria del retrato de fase, que sugieren reversiones del movimiento y por lo tanto, falta de control.

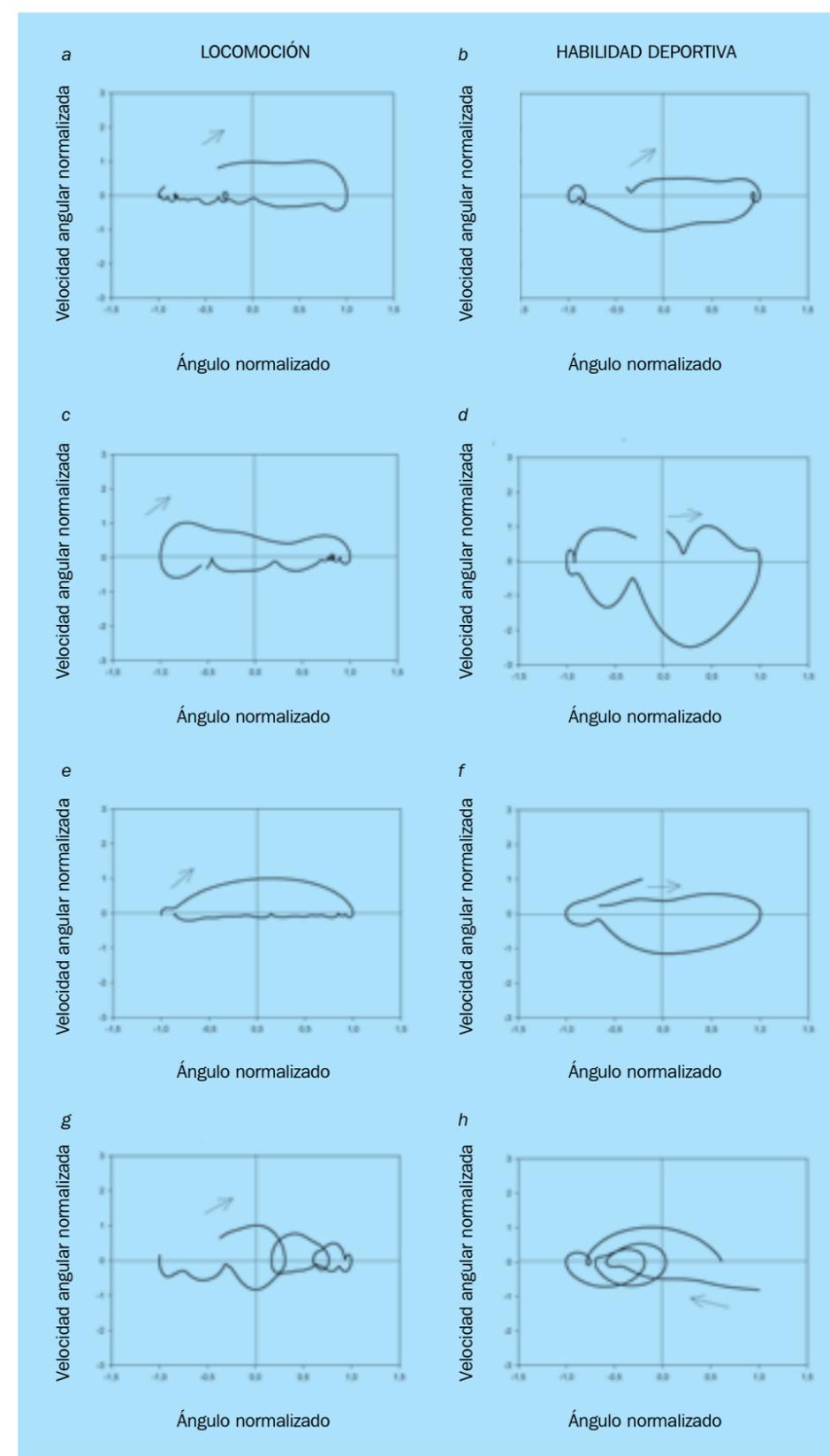
Por otro lado, en la columna de la derecha podemos observar como sucede lo mismo con jóvenes adultos que

adquieren una nueva habilidad deportiva concreta: el molino en la barra fija. En la figura 4b, el participante iniciaba el movimiento con una meseta debido a la velocidad constante de la abertura de la cadera. En la figura 4d quedan reflejadas las acciones balísticas (inflexiones en la trayectoria del retrato de fase) que otro joven adulto en fase de aprendizaje realiza para intentar ganar amplitud de balanceo. La figura 4f muestra una fase claramente pendular en la fase intermedia del movimiento, en cambio en las fase iniciales y finales la trayectoria es plana implicando una mayor implicación del control muscular. Y el último caso, figura 4h, pertenece a un movimiento errático que realiza varios bucles en la trayectoria del retrato de fase sugiriendo reversiones del movimiento.

**Limitaciones de los retratos de fase**

Los investigadores han de tener en cuenta que los retratos de fase, como todas las herramientas de análisis, tienen sus limitaciones. En primer lugar, el aspecto temporal se pierde porque los parámetros de las coordenadas (posición angular y velocidad angular) son ambos representados independientemente del tiempo. Aunque, indirectamente se podría observar el distanciamiento entre los puntos graficados en la curva y estimar el tiempo en función de la frecuencia de muestreo de los datos recogidos. Esta ausencia de tiempo no permite verificar su coordinación con los otros segmentos o articulaciones. Para el análisis de las coordinaciones que se producen en la adquisición o perfeccionamiento de las habilidades motrices, tendríamos que recurrir a otras herramientas de la TSD como el ángulo de fase y la fase relativa continua (Clark & Phillips, 1993; Kurz & Stergiou, 2002, 2004).

El análisis también puede estar limitado porque los retratos de fase sean representaciones bidimensionales de un sistema que en realidad se comporta tridimensionalmente. Además, según el tipo de tarea que se analiza, se suele dar preferencia a evaluar los planos de movimiento donde se suceden los movimientos más importantes, como el sagital en el caso de la locomoción o el balanceo en barra fija. Pero no debemos olvidar que las actividades en los diferentes planos de movimiento son importantes cuando se trata de niños portadores de alguna deficiencia o cuando se trata de patrones que aún están emergiendo (como es el caso del aprendizaje del balanceo). Aunque el plano frontal en la locomoción y el balanceo sea de menor importancia, en sistemas inmaduros y atípicos pueden mostrar detalles de cómo los sujetos controlan y reducen los movimientos.



**Figura 4**  
 A la izquierda retrato de fase del muslo de los bebés portadores del síndrome de Down, en un estadio pre-locomotor, caminando en una cinta rodante: a) sin restricciones; c) superficie de velcro; e) y g) superficie con protuberancias de goma. A la derecha retratos de fase del ángulo muslo-tronco de jóvenes adultos en proceso de aprendizaje del balanceo en barra

Otra limitación del uso de esta técnica es su interpretación. Una interpretación del retrato de fase, debido a su naturaleza cualitativa, acaba por sufrir ambigüedades causadas por el subjetivismo del investigador al hacer el análisis. Por ejemplo, ¿cuando se decide si el control del movimiento es pendular o balístico? No existen límites claros y objetivos en esta decisión. Además, como cualquier sistema abierto, el surgimiento de un comportamiento motor suele ser errático y estos comportamientos erráticos son más difíciles de ser descritos. Para facilitar la interpretación de los retratos de fase y eliminar cierto grado de subjetividad se suelen complementar los estudios con el análisis de variables cuantitativas, como por ejemplo el ratio [perímetro/(área<sup>1/2</sup>)] o el análisis elíptico de Fourier (Polk et al., 2008).

Por último, también ha de considerarse que según Kurz y Stergiou (2002, 2004) la normalización de los datos tiende a distorsionar la dinámica del comportamiento ya que la utilización de dos factores escalares distintos cambia el aspecto de los retratos de fase (el desplazamiento angular encaja en un rango de 1 y la velocidad angular se escala mediante su máximo). Una pérdida del aspecto del ratio de los retratos de fase podría cambiar el comportamiento no-lineal del segmento. Así, por lo tanto, es aconsejable realizar representaciones no normalizadas para evitar este problema e incluir las normalizadas para poder realizar comparaciones.

## Conclusiones

El principal objetivo de este artículo fue proporcionar a los lectores una metodología para el estudio del comportamiento motor basada en los principios de la TSD. La herramienta presentada, los retratos de fase, permitió reducir la multidimensionalidad que forma el comportamiento motor a un parámetro de control (el trazado de la gráfica) y así facilitar el análisis. Con el análisis cualitativo de los retratos de fase fuimos capaces de mostrar cuales eran los patrones generales de las habilidades analizadas (marcha y el molino en la barra), así como poder discernir las singularidades de las características poblacionales (niños con deficiencias y sin deficiencias) o individuales a lo largo del proceso de aprendizaje (no iniciados y expertos en la habilidad). También, facilitó la observación de las adaptaciones del comportamiento a distintos entornos (cinta rodante, suelo, cama elástica, velcro y goma) y siempre analizando el proceso en cada intento y no únicamente el resultado. No obstante, los retratos de fase no son representacio-

nes completas del comportamiento motor y deberíamos complementarlos con: (1) el análisis en otros planos del movimiento; (2) el análisis de la coordinación de ese segmento o articulación con otras implicadas en el movimiento; (3) utilizar variables cuantitativas que faciliten la interpretación de los gráficos.

## Referencias

- Abraham, R. H. & Shaw, C. D. (1984). *Dynamics: The geometry of behavior*. Santa Cruz, California: Aerial Press.
- Arampatzis, A. & Bruggemann, G. P. (1999). Mechanical energetic processes during the giant swing exercise before dismounts and flight elements on the high bar and the uneven parallel bars. *Journal of Biomechanics*, 32(8), 811-20.
- Clark, J. E. & Phillips, S. J. (1991). The development of intralimb coordination in the first six months of walking. En J. Fagard & P. H. Wolff (Eds.), *Temporal organization in coordination actions* (pp. 245-260). The Netherlands: Kluwer Academic Publs.
- Clark, J. E. & Phillips, S. J. (1993). A longitudinal study of intralimb coordination in the first year of independent walking: a dynamical systems analysis. *Children Development*, 64(4), 1143-57.
- Delignieres, D., Nourrit, D., Sioud, R., Leroyer, P., Zattara, M., & Micallef, J. P. (1998). Preferred coordination modes in the first steps of the learning of a complex gymnastics skill. *Human Movement Science*, 17(2), 221-241.
- Delignieres, D., Teulier, C., & Nourriy, D. (2009). L'apprentissage des habiletés motrices complexes : des coordinations spontanées à la coordination experte. *Bulletin de Psychologie*, 62(4), núm. 502, 327-334
- Eng, J. J. & Winter, D. A. (1995). Kinetic analysis of the lower limbs during walking: what information can be gained from a three-dimensional model? *Journal of Biomechanics*, 28(6), 753-758.
- Foti, T.; Davids, J. R., & Bagley, A. (2000). A biomechanical analysis of gait during pregnancy. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 82-A(5), 625-632.
- Hiley, M. J. & Yeadon, M. R. (2003). Optimum technique for generating angular momentum in accelerated backward giant circles prior to a dismount. *Journal of Applied Biomechanics*, 19(2), 119-130.
- Jensen, J. L. (2005). The puzzles of motor development: how the study of developmental biomechanics contributes to the puzzle solutions. *Infant and Child Development*, 14(5), 501-511. doi: 10.1002/icd.425
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1986). Non-equilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical fluctuations. *Physics Letters A*, (118), 279-284.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1982). On the control and coordination of naturally developing systems. En J. A. S. Kelso & J. E. Clark (Eds.), *The development of movement control and coordination* (pp. 5-78). New York: Wiley.
- Kurz, M. J. & Stergiou, N. (2002). Effect of normalization and phase angle calculations on continuous relative phase. *Journal of Biomechanics*, 35(3), 369-74.
- Kurz, M. J. & Stergiou, N. (2004). Applied dynamics systems theory for the analysis of movement. En N. Stergiou (Ed.), *Innovative analyses of human movement* (pp. 93-119). Champaign, Illinois: Human Kinetics Publishers.
- Mauerberg-deCastro, E. & Angulo-Kinzler, R. (2000). Locomotor patterns of individuals with Down syndrome: Effects of environmental and task constrains. En D. Elliot, R. Chua, & D. Weeks (Eds.),

- Perceptual-motor behavior in Down syndrome* (pp. 71-98). Champaign, IL: Human Kinetics Publishers.
- Mauerberg-deCastro, E. & Angulo-Kinzler, R. (2001). Vantagens e limitações das ferramentas usadas para investigar padrões de comportamento motor segundo a abordagem dos sistemas dinâmicos. En L. A. Teixeira (Ed.), *Avanços em Comportamento Motor* (pp. 62-87). Sao Paulo, Brasil: Movimento.
- Mauerberg, E., Schuller, J., & Fantucci, I. (1994). Phase portrait descriptions of walking patterns of severely mentally retarded subjects. *Brazilian International Journal of Adapted Physical Education Research* (1), 19-50.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. En M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pp. 341-360). Dordrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers.
- Polk, J. D., Spencer-Smith, J., DiBerardino, L., Ellis, D., Downen, M., & Rosengren, K. S. (2008) Quantifying variability in phase portraits: application to gait ontogeny. *Infant Behavior & Development*, 31(2), 302-306.
- Prince, F., Corriveau, H., Hébert, R., & Winter, D. A. (1997). Gait in the elderly. *Gait and Posture*, 5, 128-135.

- Riera, J. (2005). *Habilidades en el deporte*. Barcelona, Spain: Editorial INDE.
- Schmidt, R. A. (1982). *Motor control and learning: a behavioral emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers.
- Temprado, J., Della-Graza, M., Farrell, M., & Laurent, M. (1997). A novice-expert comparison of (intra-limb) coordination subserving the volleyball serve. *Human Movement Science*, 16(5), 653-676.
- Thelen, E. & Smith, L. (1994). *A dynamic system approach to the development of cognition and action*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Thelen, E. & Ulrich, B. D. (1991). Hidden skills: a dynamic systems analysis of treadmill stepping during the first year. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 56(1), 1-98, discussion 99-104.
- Winstein, C. J. & Garfinkel, A. (1989). Qualitative dynamics of disordered human locomotion: a preliminary investigation. *Journal of Motor Behavior*, 21(4), 373-91.
- Winter, D. A. & Eng, P. (1995). Kinetics: our window into the goals and strategies of the central nervous system. *Behavioural Brain Research*, 67(2), 111-20.