

# BIOMECÁNICA DEPORTIVA Y CONTROL DEL ENTRENAMIENTO



# **Biomecánica deportiva y control del entrenamiento**

Coordinador académico  
Gustavo Ramón Suárez



Medellín  
2009



Ramón Suárez Gustavo, Coord Acad.  
Biomecánica deportiva y control  
del entrenamiento

Medellín: Funámbulos Editores, 2009.  
134p. (Serie Expomotricidad; 4)

ISBN: 978-958-714-306-5

Biomecánica deportiva y control  
del entrenamiento

© **Coordinador Académico**  
Gustavo Ramón Suarez



- © Universidad de Antioquia  
Instituto Universitario de Educación Física
- © Funámbulos Editores  
Ciudadela Robledo  
Cra. 75 No 65-87 Of. 111  
Medellín, Colombia  
Tel. 2199265 Fax. 2199261
- © José Acero  
Gustavo Ramón Suárez  
Young-Hoo Kwon  
Gerald L. Scheirman  
Dustin Hatfield

ISBN: 978-958-714-306-5  
Primera edición: octubre de 2009  
Impreso y hecho en Medellín - Colombia

#### **Auspician:**

Vicerrectoría de Extensión  
Instituto Universitario de Educación Física  
Gobernación de Antioquia Secretaría de Educa-  
ción para la Cultura  
INDEPORTES Antioquia  
COLDEPORTES  
INDER Medellín  
ARCOFADER  
Federación Internacional de Educación Física

#### **Coordinación Editorial**

William Moreno Gómez  
Sandra Maryory Pulido Quintero  
Juan David Gómez Valenzuela  
Natalia Cristina Galvis Arias

#### **Revisión de textos y diseño general**

Hernán Giraldo/Soluciones Editoriales  
soledito@gmail.com

#### **Diseño de portadas**

María Alejandra Sepúlveda Echeverri

#### **Impresión**

Todográficas Ltda.  
Cra. 72 No. 45E-128  
Teléfono: 412 8601  
todograficas@une.net.co

#### **Fotografía Cortesía**

José Acero – Banco de fotos IUEF

La responsabilidad de los ensayos es de los au-  
tores y no comprometen ni a la Universidad de  
Antioquia ni al Instituto Universitario de  
Educación Física ni a Funámbulos Editores.

Todos los derechos reservados.

Este libro no podrá ser reproducido, ni total ni  
parcialmente sin previo permiso escrito de los  
autores.

# CONTENIDO

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	<b>9</b>
Gustavo Ramón Suárez	
<b>BIOMECÁNICA DEPORTIVA</b> .....	<b>15</b>
¿Cuál es la función de la biomecánica?, 16. ¿Qué tan importante es el conocimiento biomecánico?, 18	
José Acero	
<b>APLICABILIDAD DE LA VARIABILIDAD EN LOS ANÁLISIS BIOMECÁNICOS DEL GESTO Y EL ENTRENAMIENTO DEPORTIVO</b> .....	<b>45</b>
Introducción, 45. Nuevos lineamientos en el entendimiento de la variabilidad del movimiento humano, 53. La variabilidad como resultado del ajuste, 56. La teoría de la variabilidad en los sistemas dinámicos en el rendimiento deportivo, 57. Funciones de la variabilidad en la técnica deportiva, 68. Metodología biomecánica tradicional para el análisis e intervención de la técnica deportiva, 69. Observaciones concluyentes, 83	
Young-Hoo Kwon	
<b>TEMÁTICAS ACTUALES EN ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO Y SUS APLICACIONES EN EL DEPORTE</b> .....	<b>89</b>
Introducción, 89. Calibración y algoritmos de reconstrucción, 91. Valoración de la exactitud de la calibración de la cámara, 98. Calibración del marco de referencia, 101. Análisis del movimiento subacuático y el TLD localizado (TLDL), 104. Temáticas de las cámaras, 107. Temas en la alineación del eje, 115	
Gerald L. Scheirman / Dustin Hatfield	
<b>TÉCNICAS DE CAPTURA ÓPTICA PARA LA VALORACIÓN DEL DESEMPEÑO DEPORTIVO</b> .....	<b>121</b>
Introducción, 121. Metodología de captura óptica tridimensional (3D), 121. Captura del movimiento, 123. Opciones de cálculo, 124. Retroalimentación en tiempo real, 124. Sincronización con otros sensores, 125. Conclusión, 130	



# Presentación

Kinesiología es el título que se le da a un curso que implica el estudio de la anatomía y las bases mecánicas del movimiento humano, relacionado específicamente con la danza, deporte o actividades adaptadas. La combinación del conocimiento de la biología, las propiedades materiales del esqueleto, el sistema neuromuscular, las leyes y principios de la mecánica, dan origen al desarrollo de un nuevo campo: la biomecánica. Generalmente, la biomecánica es definida como el área de estudio del conocimiento y los métodos de la mecánica, que son aplicados a la estructura y función del sistema de locomoción humana.

La biomecánica no es un área reservada tan sólo para los entrenadores deportivos. Ésta es usada por diversas disciplinas que incluyen la biología, la fisiología, la medicina y la mecánica. Muchos profesionales -ingenieros, terapeutas físicos, cirujanos ortopédicos o ingenieros aeroespaciales- hacen aplicaciones prácticas de la misma. Un ingeniero biomédico puede estudiar las propiedades biológicas y materiales del cuerpo humano y sus aspectos mecánicos para entender el flujo de sangre dentro de las arterias. El conocimiento obtenido puede entonces ser aplicado para ayudar a reducir los problemas circulatorios. Un ergónomo puede estudiar las características del cuerpo humano y los aspectos mecánicos de sus movimientos empleados o necesarios en su puesto de trabajo. Un biomecánico deportivo estudia las características físicas del cuerpo humano y los principios de la mecánica para guiar la efectividad de los movimientos que realiza el atleta.

Para estudiar el movimiento humano, la biomecánica deportiva utiliza dos procedimientos: el análisis cuantitativo y el cualitativo. El análisis cuantitativo implica la descripción de los movimientos del cuerpo o sus partes en términos numéricos. Tal cuantificación de las características del movimiento ayuda a eliminar las descripciones subjetivas ya que los datos son obtenidos mediante el uso de instrumentos. El observador puede entonces usar esta cuantificación para explicar o describir la situación actual. Usualmente, este análisis tiene algunos inconvenientes como no ser económico por el uso de los instrumentos, requerir mucho tiempo o por la dificultad para llevar los instrumentos al campo.

El análisis cualitativo intenta describir un movimiento en términos no numéricos. Los datos obtenidos de un análisis cualitativo pueden ser sustentados con un análisis cuantitativo y muchos proyectos de investigación son formulados de esta manera. La evaluación de un análisis cualitativo se basa en la habilidad del entrenador para reconocer los momentos críticos de la ejecución o del gesto deportivo. Las conclusiones subjetivas basadas en este tipo de análisis, pueden ser rechazadas o confirmadas por un estudio cuantitativo.

Tanto los análisis cuantitativos como los cualitativos proveen información importante acerca de la ejecución; sin embargo, el análisis cualitativo es el método predominante usado por los entrenadores en el análisis de los movimientos de los atletas.

En la mayoría de los casos, es la observación visual el procedimiento empleado. Los videotapes o las filmaciones también pueden ser empleadas para el análisis cualitativo. Estas últimas aumentan el proceso de aprendizaje porque proveen retroalimentación visual al atleta. El entrenador debe ser capaz de realizar este análisis cuando se usa un film o un video, pero se deben hacer los comentarios inmediatamente después de la filmación para que pueda operar la memoria cinestésica. Los conocimientos de biomecánica del entrenador pueden llegar a ser muy importantes cuando se desea realizar un análisis refinado. Si no se dispone de estos equipos, los pequeños detalles no pueden ser observados debido a la velocidad a la que se suceden y a la poca velocidad de captación del ojo humano.

Si se está considerando la eficiencia de un movimiento, se debe incorporar el concepto de trabajo y energía. Un movimiento eficiente es aquel en el cual una cantidad dada de trabajo es hecha con un mínimo gasto de energía. Un movimiento eficiente es una ventaja definitiva para un atleta que desea hacer tanto trabajo como le sea posible sin gastar demasiada energía, tal como un maratonista o un nadador. Un móvil o un motor eficiente permanecen más tiempo a un mismo paso o velocidad, o gastan menos energía a un paso más rápido, que un motor no eficiente. Para la mayoría de las actividades deportivas, sin embargo, el aspecto fundamental no es aprender a ahorrar energía o no consumirla. Los biomecánicos están más correlacionados con la *efectividad* de una ejecución, es decir, con la determinación de los movimientos apropiados para ayudar a un atleta a realizar, de una manera adecuada y útil, los objetivos de su rutina. El grado de esfuerzo o de trabajo

requerido o el gasto de energía no es lo importante. Por ejemplo, un corredor de 100 m puede ser muy eficiente en una carrera pero quien gana la carrera es el que tenga mayor efectividad, es decir, el que corra más rápido.

Por otra parte, en una carrera de 100 m el propósito es correr a la máxima velocidad, por lo tanto, el esfuerzo deber ser *maximizado o maximal*. Si ésta es de 5 km, un gasto maximal de energía no puede ser mantenido durante toda la carrera, debe por tanto, escogerse una velocidad *óptima* tal, que le permita ser efectivo sin llegar a estar en el *mínimo* consumo de energía. La velocidad óptima es aquella más rápida que el atleta pueda mantener durante los 5 km. La velocidad de carrera es un ejemplo en biomecánica que frecuentemente debe ser optimizado más que maximizado o minimizado. Generalmente, un movimiento efectivo es óptimamente eficiente; pero, un movimiento eficiente máximo no necesariamente es biomecánicamente efectivo. Se trata muchas veces de optimizar la eficiencia para maximizar la efectividad.

De la biomecánica deportiva se puede actualmente obtener mucha información y aplicación, motivo por el cual no ampliaremos en esta introducción todos los campos en los cuales puede ser aplicada. Sí es importante resaltar que en los deportes en los cuales la técnica es uno de los componentes principales del entrenamiento, los entrenadores recurren a los biomecánicos deportivos para que participen del equipo interdisciplinario que organiza, dirige y controla el proceso de entrenamiento. Muchos de los records obtenidos por los atletas son consecuencia de las observaciones hechas por los biomecánicos basados en los análisis con video, con plataformas de fuerza o con los diferentes equipos que se usan para estos fines.

En el presente libro se exponen cuatro artículos relacionados con la biomecánica deportiva. En la primera temática, presento un resumen de los aspectos fundamentales de la biomecánica deportiva como lo son la cinemática y la cinética (dinámica). Se recopilan todas las definiciones y fórmulas empleadas, con el ánimo de que el entrenador pueda recurrir a ellas en caso de desconocerlas o de actualizarlas. Este capítulo no pretende reemplazar los libros básicos y especializados de biomecánica deportiva.

En un segundo capítulo se presenta un trabajo del Dr. Acero, biomecánico deportivo, que basado en la teoría de la variabilidad genera una serie de observaciones y propuestas que se aplican al gesto deportivo y al entrenamiento deportivo. Hasta hace poco tiempo se tenía como premisa en

el entrenamiento de la técnica, que existía una técnica o movimiento ideal que el atleta debe imitar y repetir. Se pensaba que las repeticiones del movimiento eran o debían ser iguales. El Dr. Acero revisa estas teorías y encuentra que los teóricos y científicos del control motor actualmente no aceptan estas premisas y destacan el hecho de que el sistema neuromuscular, dado que no puede recolectar datos de manera continua sino intermitente, produce movimientos, basado en predicciones que obviamente generan respuestas aproximadas, es decir, no todos los movimientos que hacemos son exactamente iguales. El concepto de *equivalencia motora* es nuevo, aparece en la literatura que habla de la estrategia que tiene el sistema neuromuscular de alcanzar el mismo resultado final con una variación considerable. Estas nuevas concepciones están en contra de las teorías del aprendizaje motor tradicional que afirmaban que la variabilidad disminuía con la repetición y el aprendizaje, por lo que proponen *el desarrollo del repertorio motor*. Un nuevo paradigma aparece al aplicar *la Teoría de los Sistemas Dinámicos*, el autor rescata de esta teoría los conceptos de atractor y repelente y los aplica en su propuesta final, el modelo BIOMIN-VAR, para la evaluación de los gestos deportivos. Es sin duda una buena propuesta para los entrenadores y en particular para los biomecánicos.

En la tercera temática, el Dr. Young-Hoo Kwon, surcoreano que actualmente trabaja en la Universidad de Texas, USA, destaca las claves procedimentales y circunstanciales comúnmente encontradas en el análisis de los movimientos deportivos bajo la perspectiva de la precisión y la flexibilidad, de manera que inicia revisando la manera cómo se calibran las cámaras y cómo se determina su reconstrucción. Ya Abdel-Aziz & Karara (1971), han propuesto el método de transformación lineal directa (DLT) como un procedimiento matemático para la reconstrucción de las imágenes resultantes, ya sea en dos o en tres dimensiones. Con base en estas ecuaciones, determina la manera de corregir el error óptico de los lentes, el error tanto de calibración como de reconstrucción del sistema. Aborda también la problemática de los marcos de referencia haciendo énfasis en las características que debe reunir cada uno para que los resultados sean confiables. Finalmente hace un abordaje de las filmaciones subacuáticas, temática que es de mucha importancia en este tipo de deportes, en las cuales la difracción de las lentes distorsiona mucho las imágenes.

Para finalizar, la cuarta y última temática el Dr. Gerald L., Scheirman y Dustin Hatfield, de la Corporación de Análisis de Movimiento de Santa Rosa, California (USA), presentan una revisión y propuesta de las técnicas

captura óptica para la valoración del desempeño deportivo y en particular, una manera de medir la fuerza sin el uso de plataformas de fuerza. Usando tecnología de punta diseñan y prueban el sistema Cortex, el cual, comparado con datos de plataformas de fuerza, produce resultados que no se diferencian significativamente y tiene una gran correlación. Con esta herramienta, los entrenadores y los biomecánicos podrán realizar estudios de campo más cercanos a la realidad de los gestos deportivos.

**Gustavo Ramón Suárez**

Coordinador académico



# Biomecánica deportiva

Gustavo Ramón Suárez\*

## ¿Qué es biomecánica?

Debido a la gran cantidad de nociones actuales, nuevas áreas de conocimiento están siendo desarrolladas y otras viejas redimensionadas. Cuando una nueva área de conocimientos es desarrollada y llega a ser reconocida, se le asigna un nombre y la visión de las áreas en estrecha relación a la nueva ciencia aparecen bajo cuidadoso escrutinio. Lo que resulta es una multiplicidad de términos, usualmente con formas variadas de significado, todos intentando describir de una mejor manera lo que pasa con el sujeto u objeto de estudio de la nueva área.

El incremento en el desarrollo del acercamiento científico al análisis del movimiento humano ha sido intenso. Por una parte, el término *kinesiología* (literalmente la ciencia del movimiento) fue usado para describir el conjunto de conocimientos relacionados con la estructura y función del sistema músculo-esquelético del cuerpo humano. Más tarde, el estudio de los principios mecánicos aplicables al movimiento humano llegó a ser ampliamente aceptado como una parte integral de la kinesiología. Luego el término fue usado mucho más literalmente para resaltar los aspectos de todas las ciencias que de alguna manera tienen que ver con el movimiento humano. En este punto llega a ser claro que la kinesiología había perdido su utilidad para describir específicamente esa parte de la ciencia del movimiento, relacionada o con el sistema músculo-esquelético o con los principios mecánicos aplicados al movimiento. Muchos nuevos términos fueron sugeridos para sustituirla: antropomecánica, antropocinética, biodinámica, biocinética o cineantropología. Todos ellos fueron recogidos por la *biomecánica*, la cual ganó una amplia aceptación.

---

\* Lic. Educación Física. Médico Cirujano. Mg. Fisiología del ejercicio. Dr. Educación Física. Instituto Universitario de Educación Física. [gusramon2000@yahoo.es](mailto:gusramon2000@yahoo.es)

La biomecánica ha sido definida de muchas maneras:

- Las bases mecánicas de la biología, la actividad muscular, el estudio de los principios y relaciones implicadas.<sup>1</sup>
- La aplicación de las leyes mecánicas a las estructuras vivas, especialmente al aparato locomotor del cuerpo humano.<sup>2</sup>
- Es la ciencia que examina las fuerzas internas y externas que actúan sobre el cuerpo humano y el efecto que ellas producen.<sup>3</sup>

### ¿Cuál es la función de la biomecánica?

Los profesores de Educación Física y los entrenadores son continuamente confrontados con problemas relacionados con la técnica usada en varias actividades en las cuales ellos están inmersos.

Hace algunos años, el mundo se impresionaba con un saltador de alto ruso llamado Valery Brumel, al punto de ser considerado *sin igual* por aventajar marcadamente a sus rivales. En ese tiempo, al igual que hoy, hubo una amplia tendencia en entrenadores y atletas a adoptar incondicionalmente los métodos del campeón, otros copiaron sólo su carrera de aproximación o el movimiento circular con ambos brazos antes del despegue. Años después, Emil Zatopek revolucionó las carreras de distancia. Al igual que lo ocurrido con Brummel, se copiaron sus métodos de entrenamiento, su zancada, etc. La historia y la literatura están llenas de estos ejemplos.

Una de las preguntas que se deben resolver ante estos hechos es *¿cómo determinar cuál es o cuáles son los factores que determinan la técnica del campeón?*, así como *¿cuáles son los factores limitantes o que pueden ser copiados por otros atletas?* La respuesta subyace en la biomecánica, la cual, sobre una base lógica, evalúa las técnicas deportivas.

---

1 Webster's Third New International of English Language. (1961). Springfield, Mass: G&C. Merriam. CO

2 Dorland's Illustrated Medical Dictionary. (1965). Philadelphia, USA : W.B. Saunders Co.

3 Hay, G. (1978). The biomechanics of Sports Tecniches, 2 ed Prentice Hall.

En ocasiones nuevas técnicas llaman la atención por las nuevas reglas (en natación, la introducción de nuevas reglas en el volteo resultaron en nuevos cambios que regulan esta parte de la carrera), así mismo el desarrollo de nuevo equipo produce cambios en las técnicas (en ping-pong, la raqueta de caucho o de espuma; la fibra de vidrio en el salto con garrocha, etc). ¿Cómo pueden definir los educadores físicos o los entrenadores la técnica más eficiente bajo las nuevas reglas o bajo los nuevos equipos?, de nuevo la biomecánica provee las bases para la toma de estas decisiones.

Habiendo establecido qué técnica debe ser usada en un evento dado, el profesor o el entrenador se enfrentan a la tarea de detectar y corregir las fallas en la ejecución del atleta. La mayor dificultad aquí —aun si es rara vez reconocido como tal— es la localización de la causa de la falla. Aunque para un observador experimentado no es difícil determinarla, en un principiante o un atleta, la causa de la falla de una técnica (incluso si la técnica es muy conocida o usada) es posible que no sea fácil de encontrar. Una de las razones es que la causa a menudo está separada del efecto (en salto alto, trampolinismo o lanzamientos, el efecto observado en el aire o en el aterrizaje es casi siempre causado en la técnica del despegue o en la carrera previa al despegue). Muchos entrenadores intentan corregir los efectos en lugar de las causas, por lo que el atleta lejos de mejorar su técnica, la empeora.

¿Cómo puede un profesor o un entrenador mejorar su habilidad para localizar la causa de los errores de sus pupilos? La respuesta, de nuevo, es por la vía de la biomecánica. Así como los conocimientos científicos básicos del aprendizaje motriz capacitan al profesor o entrenador para hacer juicios correctos acerca de los métodos de instrucción, frecuencia y naturaleza de las prácticas, y un conocimiento de los principios fisiológicos los facultan para decidir en lo referente a la cantidad y tipo de entrenamiento a realizar en cada caso, un conocimiento de los principios biomecánicos los capacitan para escoger las técnicas apropiadas y detectar las causas básicas de los errores en la ejecución de una técnica. En resumen, así como el aprendizaje motriz puede ser reconocido como la ciencia subyacente a la adquisición de destrezas, y la fisiología como la ciencia subyacente al entrenamiento, la biomecánica es la ciencia subyacente a la técnica (Nota: es también reconocido que estas ciencias no tienen respuestas para todos los problemas que confrontan los profesores de Educación Física y los entrenadores. Sin embargo, cuando éstas son incapaces de dar una respuesta inmediata, ofrecen la manera de obtenerla).

## ¿Qué tan importante es el conocimiento biomecánico?

Para el entrenador: el entrenador se especializa en un deporte en particular, y si el principal componente de este deporte es la técnica, deberá tener unos conocimientos en biomecánica muy definidos. La eficiencia en la técnica está determinada por la biomecánica pues son las leyes de la mecánica las que determinan a qué velocidad debe realizarse un movimiento para ser eficiente o máximo. Debido a que los entrenadores trabajan en el máximo rendimiento y dado que éste depende de la precisión en los detalles, entonces el entrenador debe conocer con mayor precisión la biomecánica, en orden a establecer estos detalles.

Para el atleta: Cuando un atleta posee un conocimiento claro de los detalles y las causas que pueden mejorar o que empeoran su movimiento, él puede y de hecho logra mejorar su técnica. El aprendizaje de la técnica se lleva a cabo de una manera más eficiente cuando el alumno puede establecer la relación entre la causa y el efecto de un movimiento. Desde este punto de vista, la biomecánica es un instrumento muy valioso para los atletas en el sentido de que este conjunto de conocimiento le provee de respuestas a muchos de los interrogantes en lo referente al porqué de la técnica.

### *Magnitudes escalares y vectoriales*

Se denominan cantidades escalares aquellas que sólo poseen un número que indica la cantidad y una unidad de medida. Así por ejemplo, 40 libras, 50 naranjas, 10 hombres, etc., son magnitudes escalares porque cumplen con las dos condiciones enumeradas.

Para sumar cantidades escalares sólo se debe tener en cuenta que las unidades de medidas sean iguales. Así, con las cantidades anteriormente enumeradas, no podrían sumarse todas ya que poseen unidades de medida diferentes. Pero si el caso fuese 40 lb, 70 lb y 25 lb, la suma de ellas sería 135 lb. En general, los procesos matemáticos de cantidades escalares son los mismos procesos matemáticos normales de suma, resta, multiplicación y división.

Se denominan vectores a las cantidades que poseen cuatro condiciones: un número que indica cantidad, una unidad de medida, una dirección y un sentido. Así, la fuerza es una variable vectorial porque debe indicar las unidades de medida, la dirección y sentido en el cual se ejerce. Una fuerza de

10 N hacia arriba, posee las cuatro condiciones: un número (10), una unidad de medida (newton), una dirección (vertical) y un sentido (hacia abajo).

## *Formas de movimiento*

### *Traslación*

*La traslación* (o movimiento lineal) tiene lugar cuando un cuerpo<sup>4</sup> mueve todas sus partes de manera que todas recorren el mismo espacio, en la misma dirección e intervalo de tiempo. Una manera de determinar si el movimiento de un cuerpo en particular es de tipo traslatorio, es considerar el movimiento de una línea dibujada arbitrariamente sobre el cuerpo. Si durante el movimiento la línea permanece con la misma longitud y siempre está paralela a la posición inicial, se puede concluir que el movimiento es traslatorio.

Un cuerpo puede tener un movimiento de traslación que describe una trayectoria rectilínea (como en el caso de un patinador deslizándose en la pista), una trayectoria curvilínea (como en el caso de un paracaidista que cae libremente luego de saltar desde un avión) o una trayectoria no lineal (como en el caso de un esquiador que se desliza sobre un terreno ondulado).

### *Rotación*

El movimiento rotatorio (o movimiento angular) tiene lugar cuando todas las partes de un cuerpo se mueven a lo largo de una trayectoria circular alrededor de una línea (considerada como eje de rotación), con el mismo ángulo, al mismo tiempo. Este eje de rotación puede o no pasar por el cuerpo, pero siempre es perpendicular al plano de rotación.

Ejemplos de este tipo de movimiento los encontramos en el gimnasta realizando un girasol en la barra, o en todos los movimientos segmentarios del cuerpo al realizar una flexión o una extensión.

---

<sup>4</sup> En biomecánica, el término cuerpo es usado para referirse o a objetos inanimados (equipo deportivo) o a objetos animados (como el cuerpo humano o sus partes). Es importante resaltar que algunas veces es conveniente referirse al cuerpo humano como un todo pero en otras ocasiones es útil considerarlo como un conjunto articulado (cabeza, tronco, miembros).

### *Movimiento mixto o general*

Mientras la rotación es un movimiento más común que la traslación en las técnicas deportivas, lo es mucho más el movimiento mixto o general. Un ciclista que corre, por ejemplo, traslada su tronco en una trayectoria casi rectilínea, mientras que sus piernas realizan movimientos rotatorios.

### *Cinemática lineal*

La cinemática es la rama de la biomecánica que describe los movimientos sin tener en cuenta su causa. La cinemática lineal está relacionada con los movimientos de tipo lineal o curvilíneo.

El movimiento se define como *la variación de posición que experimenta un cuerpo en el transcurso del tiempo con respecto a un marco de referencia considerado como fijo.*

En el estudio de la cinemática se estudian las siguientes variables:

- Temporales: tiempo, frecuencia y período
- Espaciales: distancia y desplazamiento
- Espacio-temporales: velocidad, rapidez y aceleración

### *Variables Temporales*

La unidad internacional de medida del tiempo o básica es el segundo. Otras medidas mayores son el minuto, la hora, el día, la semana, el mes o el año. Medidas menores son las décimas de segundo, las centésimas o las milésimas de segundo.

La *frecuencia* es el número de movimientos que se realizan en la unidad de tiempo, por ejemplo, el número de pasos por segundo, el número de brazadas por segundo en natación.

$$f = \# \text{ movimientos} / \text{intervalo de tiempo}$$

El período es el inverso de la frecuencia, es decir, el tiempo para un movimiento.

$$p = 1 / f$$

### *Variables espaciales*

Cuando un cuerpo experimenta una variación de posición en el espacio durante un determinado tiempo y con respecto a un punto de referencia considerado como fijo, se habla de que el cuerpo recorrió una distancia o que realizó un desplazamiento.

La *posición* de un objeto se refiere a su localización en el espacio relativa a un punto considerado como fijo, que puede ser un eje de coordenadas X o Y. Así por ejemplo, cuando decimos que el aro de baloncesto está a 3.05 m, lo está con respecto al piso, considerado como el punto 0. La línea de lanzamiento para un tiro libre está a 4.8 m (aproximadamente) del aro, tomando el aro como el punto 0.

El término *distancia* hace referencia a la sumatoria de los cambios de posición de un objeto en el espacio, recorrido que se hace sin tener en cuenta su dirección. En este sentido, la distancia es una cantidad escalar. Así por ejemplo, un nadador que recorre dos piscinas de 50 m, nada una distancia de 100 m, no importando que en la segunda piscina se devuelva.

El término *desplazamiento* es la diferencia de posición inicial comparada con la posición final ( $d = p_f - p_i$  donde  $p_f$  = posición final,  $p_i$  = posición inicial). Es de carácter vectorial, por lo que se tiene en cuenta su dirección. Para el ejemplo anterior del nadador, el desplazamiento es de cero, pues el punto de inicio y el punto final fueron los mismos. Por lo tanto, la distancia neta o resultante es de cero.

No en todos los casos de movimiento de un cuerpo la distancia y el desplazamiento son diferentes. En el caso de un corredor de 100 m llanos, la distancia y el desplazamiento son iguales.

La unidad internacional de medida es el metro (m). Esta unidad de medida tiene a su vez derivadas mayores como son el decámetro (dam = 10 m), hectómetro (hm = 100 m) y el kilómetro (km = 1.000m). Las menores son del decímetro (dm = 0.10 m), el centímetro (cm = 0.01 m) y el milímetro (mm = 0.001 m).

*Variables espacio-temporales*

Las variables espacio-temporales son las variables que no sólo tienen en cuenta la variación espacial que sufre un cuerpo con respecto al marco de referencia fijo, sino que además las relacionan con el tiempo empleado para dicho movimiento.

Las variables espacio-temporales son por tanto la *rapidez y la velocidad*. Así como se diferenciaron entre distancia y desplazamiento (porque son cantidades de diferente tipo: escalar la primera y vectorial la segunda), de la misma manera la rapidez es una cantidad escalar y la velocidad es una cantidad vectorial.

Para el ejemplo del nadador que recorre 100 m nadando, si asumimos que en el trayecto emplea 50 s, entonces su rapidez será igual a:

$$\begin{aligned} r &= \text{distancia} / \text{intervalo del tiempo} \\ r &= d / t \\ r &= 100 \text{ m} / 50 \text{ s} = 2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Para el mismo ejemplo, la velocidad resultante será de:

$$\begin{aligned} v &= \text{desplazamiento} / \text{tiempo} \\ v &= \text{posición final} - \text{posición inicial} / \text{tiempo final} - \text{tiempo inicial} \\ v &= (P_f - P_i) / (t_f - t_i) \\ \mathbf{v} &= \Delta \mathbf{P} / \Delta t \\ v &= 0 \text{ m} / 50 \text{ s} = 0 \end{aligned}$$

Las unidades de la velocidad son básicamente los metros sobre segundo, pero pueden aparecer otras unidades como los kilómetros por hora, los metros por segundo, etc.

Cuando se toma en consideración un intervalo de tiempo prolongado, la velocidad resultante que se calcula se denomina *velocidad promedio* ( $v = (\text{velocidad final} + \text{velocidad inicial}) / 2$ ) Cuando el intervalo de tiempo es muy corto o tendiendo a cero, se considera como la *velocidad instantánea*.

Cuando un movimiento se realiza con velocidad constante, el movimiento recibe el nombre de movimiento uniforme. Los cálculos en este tipo de

movimientos son sencillos sobre todo cuando las cantidades que se manejan son escalares. Cuando se trabaja con magnitudes vectoriales, los cálculos son un tanto más complejos por el tratamiento matemático, en especial el de trigonometría.

Cuando el movimiento no es uniforme, aparece una variable derivada de la velocidad que es la *aceleración*. Cuando un cuerpo cambia su velocidad en el transcurso del tiempo, se dice que éste experimenta una aceleración. De esta manera, la aceleración es:

$$a = (\text{velocidad final} - \text{velocidad inicial}) / (\text{tiempo final} - \text{tiempo inicial})$$

$$a = (V_f - V_i) / (t_f - t_i)$$

donde  $V_f$  = velocidad final  
 $V_i$  = velocidad inicial  
 $t_f$  = tiempo final  
 $t_i$  = tiempo inicial  
 $a = \Delta V / \Delta t$

Las unidades de la aceleración son metros por segundo cada segundo ( $m / s^2 = m*s^{-2}$ ).

A este tipo de movimiento se le puede llamar movimiento uniformemente acelerado. Para el cálculo de distancias velocidades en este tipo de movimiento, aparecen algunas fórmulas derivadas de las anteriores:

$$a = (V_f - V_i) / t$$

$$V_f = V_i + at \quad (1)$$

La velocidad promedio es igual al cambio de posición sobre el tiempo:

$$(V_f + V_i) / 2 = (P_f - P_i) / t \quad (2)$$

reemplazando  $V_f$  (1) y despejando  $P_f - P_i$ , obtenemos :

$$P_f - P_i = (V_f + V_i) * t / 2$$

$$P_f - P_i = (V_i + at + V_i) * t / 2$$

$$P_f - P_i = (2V_i + at) * t / 2$$

$$P_f - P_i = 2V_i t / 2 + at^2 / 2$$

pero  $P_f - P_i = d$ , entonces

$$d = V_i t + \frac{1}{2} at^2 \quad (3)$$

De la ecuación (1) se puede despejar el tiempo, obteniéndose:

$$t = (V_f - V_i) / a \quad (4)$$

la cual se puede reemplazar en la ecuación (2):

$$\begin{aligned} (V_f + V_i) / 2 &= P_f - P_i / ((V_f - V_i) / a) \\ (V_f + V_i) / 2 &= (P_f - P_i) * a / (V_f - V_i) \\ (V_f + V_i)(V_f - V_i) &= 2 (P_f - P_i) a \\ (V_f^2 - V_i^2) &= 2 (P_f - P_i) a \\ V_f^2 &= V_i^2 + 2a(P_f - P_i) \\ \mathbf{V_f^2} &= \mathbf{V_i^2 + 2ad} \quad (5) \end{aligned}$$

### *Movimiento parabólico*

Un caso especial de movimiento tanto en la física clásica como en la biomecánica deportiva es el movimiento parabólico. Este tipo de movimiento se produce cuando un cuerpo es lanzado al aire, de manera que sobre él *sólo influyen dos factores para modificar su trayectoria: la fuerza de la gravedad y la resistencia del viento*. La fuerza de la gravedad es un vector perpendicular a la superficie terrestre y en sentido hacia el centro de la misma. La magnitud de la aceleración de esta fuerza es de 9.8 m/s<sup>2</sup>.

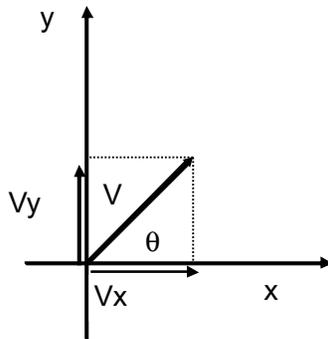
En el movimiento parabólico se produce una combinación de movimiento uniforme y de movimiento uniformemente acelerado o retardado. Así, en el plano horizontal, el movimiento es uniforme, aplicándose para ello las fórmulas pertinentes, anteriormente anotadas. En el plano vertical, el movimiento es uniformemente variado. Hacia arriba es un movimiento uniformemente retardado y hacia abajo, uniformemente acelerado. Para los cálculos en este plano se usan las fórmulas pertinentes anteriormente anotadas.

A causa de la fuerza de la gravedad, el movimiento de un cuerpo que es lanzado al aire, sigue una trayectoria parabólica, pues la atracción de la gravedad implica una variable exponencial, que produce trayectorias parabólicas. Si la atracción de la tierra no existiera, al lanzar un cuerpo al espacio, éste seguiría una trayectoria rectilínea.

En el estudio de los movimientos parabólicos existen tres casos:

1. Cuando el punto de partida está al mismo nivel horizontal de aterrizaje.
2. Cuando el punto de partida está más alto que el nivel horizontal de aterrizaje.
3. Cuando el punto de partida está mas bajo que nivel horizontal de aterrizaje.

Ecuaciones para cuando el punto de aterrizaje está al mismo nivel horizontal de lanzamiento.



- En el plano horizontal (movimiento uniforme)
  - $V_x = \text{Velocidad horizontal}$
  - $V_x = V \cdot \cos$
  - $X = V_x \cdot t$
  - $X = V \cdot \cos \cdot t$

En este plano, la velocidad horizontal es máxima cuando el  $\cos$  sea máximo, es decir, cuando el ángulo es de  $0^\circ$ .

- En el plano vertical (movimiento uniformemente variado)
- Hacia arriba :

$$V_y = V \cdot \text{sen}$$

$$V_{fy} = V_{iy} - gt$$

donde  $V_{fy}$  es la velocidad final en Y;  $V_{iy}$  es la velocidad inicial en Y;  $g$  es la gravedad con valor negativo porque el movimiento es hacia arriba y la aceleración es siempre hacia abajo.

Pero como  $V_{fy}$  es igual a 0 al llegar al punto más alto de la parábola, entonces:

$$0 = V_{iy} - gt$$

$$V_{iy} = gt$$

pero como  $V_{iy} = V \cdot \text{sen } \theta$ , entonces

$$V \cdot \text{sen } \theta = gt \text{ de donde,}$$

$$\mathbf{t = V \cdot \text{sen } \theta / g}$$

El espacio que recorre el móvil en el eje vertical será igual a:

$$y = V_{iy} \cdot t - \frac{1}{2} gt^2$$

$$\mathbf{y = (V \cdot \text{sen } \theta) \cdot t - \frac{1}{2} gt^2}$$

Hacia abajo :

$$V_{fy} = \text{Velocidad final hacia abajo}$$

$$V_{iy} = \text{velocidad inicial hacia abajo}$$

$$V_{fy} = V_{iy} + gt,$$

pero como  $V_{fy}$  es igual a 0 al iniciar en lo más alto de la parábola, entonces,

$$V_{fy} = gt$$

El espacio que recorre el móvil hacia abajo (Y) será igual a

$$Y = V_{iy} \cdot t + \frac{1}{2} gt^2,$$

pero como  $V_{iy}$  es igual a cero, entonces,

$$Y = \frac{1}{2} gt^2$$

De la anterior ecuación se puede despejar el tiempo (t):

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

pero como

$$V_f y^2 = V_i y^2 + 2ay$$

$$V_i y^2 = 0$$

a = g, entonces,

$$Y = V_f y^2 / 2g,$$

pero  $V_y = V \cdot \sin \theta$ , entonces,

$$Y = (V \cdot \sin \theta)^2 / 2g$$

reemplazando Y tenemos

$$t = \sqrt{\frac{2(V \cdot \sin \theta)^2 / 2g}{g}} = \frac{V \cdot \sin \theta}{g}$$

Si comparamos las fórmulas para el cálculo del tiempo, tanto en el movimiento hacia abajo como hacia arriba, vemos que son iguales a  $V \cdot \sin \theta / g$ , de manera que el tiempo total (tiempo subiendo más tiempo bajando), será igual a

$$T = V \cdot \sin \theta / g + V \cdot \sin \theta / g$$

$$\mathbf{T = 2V \cdot \sin \theta / g}$$

de donde se desprende que el tiempo que el objeto permanezca en el aire es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad y del máximo valor del seno  $\theta$ , el cual es de 1 cuando el ángulo es de  $90^\circ$ , pero cuando el ángulo es  $0^\circ$ , el seno es 0, es decir, el objeto no se eleva. Por otra parte, el tiempo es inversamente proporcional a la gravedad. Cuando se realizan actividades que están de determinada altura sobre el nivel del mar, el valor de la gravedad disminuye, por lo que un objeto lanzado al aire, demora más. Estos factores son

determinantes en la práctica de los deportes de competencia, en especial en los juegos olímpicos pues este hecho afecta los resultados de las competencias.

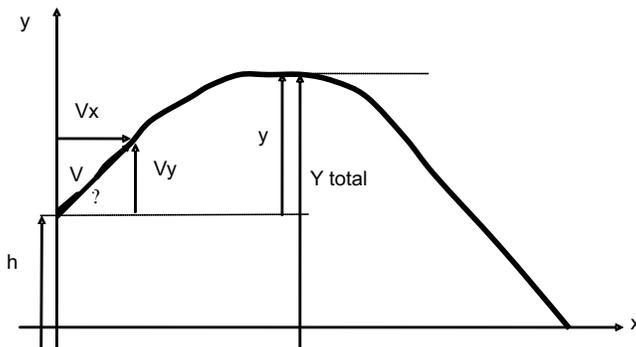
El desplazamiento total en el eje X, llamado Rango (R), será igual

$$\begin{aligned}
 R &= V_x * T \\
 &= V * \cos \theta * 2V * \sin \theta / g \\
 &= V^2 * 2 \cos \theta \sin \theta / g \\
 \mathbf{R} &= \mathbf{V^2 * \text{sen } 2\theta / g}
 \end{aligned}$$

De esta fórmula se desprende que:

el rango depende de la magnitud de la velocidad al cuadrado, el ángulo óptimo está condicionado por el máximo valor de  $\text{sen } 2\theta$ , el cual es igual a 1 (que es el valor de un ángulo de  $90^\circ$ ), de donde  $\text{sen } 2\theta = 1 = 90^\circ$ ,  $2\theta = 90^\circ / 2 = 45^\circ$ , el rango es inversamente proporcional a la gravedad.

Ecuaciones cuando el plano del lanzamiento no es igual al del aterrizaje.



- Hacia abajo  
 $Y$  = espacio recorrido en el eje Y  
 $h$  = altura desde donde es liberado el cuerpo

$$Y_{\text{total}} = Y + h$$

$$Y_{\text{total}} = (V * \text{sen } \theta)^2 / 2g + h$$

Pero como el tiempo en el eje vertical es igual a

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

reemplazando en esta ecuación el valor de Y, entonces se obtiene que,

$$t = \sqrt{\frac{2\left(\frac{V * \text{sen}\theta^2}{2g}\right) + h}{g}} = \sqrt{\frac{(V * \text{sen}\theta)^2 + 2gh}{g}}$$

Tiempo total :

T = tiempo subiendo + tiempo bajando

$$t = \frac{V * \text{sen}\theta}{g} + \sqrt{\frac{(V * \text{sen}\theta)^2 + 2gh}{g}}$$

### *Cinemática rotatoria*

La cinemática rotatoria está relacionada con los movimientos de tipo angular. En este sentido, ésta describe los movimientos angulares sin tener en cuenta su causa. Para este apartado, se desarrollarán las siguientes variables:

- Temporales: tiempo, frecuencia y período
- Espaciales: distancia angular y desplazamiento angular
- Espacio-temporales: velocidad angular, rapidez angular y aceleración angular

### *Variables temporales*

La unidad internacional básica de medida del tiempo es el segundo. Otras medidas mayores son el minuto, la hora, el día, la semana, el mes o el año. Medidas menores son las décimas de segundo, las centésimas o las milésimas de segundo.

La *frecuencia* es el número de rotaciones o giros que se realizan en la unidad de tiempo, por ejemplo, el número de girasoles que hace un gimnasta en la barra. El período es el inverso de la frecuencia, es decir el tiempo para una rotación.

### *Variables espaciales*

Cuando un cuerpo experimenta una rotación en el espacio, durante un determinado tiempo y con respecto a un marco de referencia considerado como fijo, se habla de que el cuerpo recorrió un ángulo o que realizó un desplazamiento angular.

El término *distancia angular* hace referencia a la sumatoria de ángulos recorridos sin tener en cuenta su dirección. En este sentido, la distancia angular es una cantidad escalar. Así por ejemplo, un gimnasta que realiza tres girasoles en la barra fija, recorre una distancia angular de  $1080^{\circ}$  ( $360^{\circ} * 3$ ).

El término *desplazamiento* es de carácter vectorial, por lo que se tiene en cuenta su dirección. Para el ejemplo anterior del gimnasta, el desplazamiento angular es de cero, pues el punto de inicio y el punto final fueron los mismos. Por lo tanto, la distancia neta o resultante es de cero.

La unidad internacional de medida angular es el grado. Una revolución o giro completo tiene  $360^{\circ}$ . Existe también el radián. **El radián (rad) equivale a  $57.3^{\circ}$  o 0.16 revoluciones.**

### *Variables espacio-temporales.*

Las variables espacio-temporales son aquellas que no sólo tienen en cuenta la variación espacial que sufre un cuerpo con respecto al marco de referencia fijo, sino que además la relacionan con el tiempo empleado para dicho movimiento.

Las variables espacio-temporales son por tanto la **rapidez angular ( $\sigma$ )** y **la velocidad angular ( $w$ )**. De igual modo que se diferenció entre distancia angular y desplazamiento angular (porque son cantidades de diferente tipo: escalar la primera y vectorial la segunda), así mismo la rapidez es una cantidad escalar y la velocidad es una cantidad vectorial.

Para el ejemplo del gimnasta que realiza tres girasoles en 1.2 s, entonces su rapidez será igual a:

$$\sigma = \text{distancia angular} / \text{tiempo}$$

$$\sigma = 1080^\circ / 1.2\text{s} = 900^\circ / \text{s}$$

Para el mismo ejemplo, la velocidad resultante será de:

$$w = \text{desplazamiento angular} / \text{tiempo}$$

$$W = \text{ángulo final} - \text{ángulo inicial} / \text{tiempo final} - \text{tiempo inicial}$$

$$W = (\theta_f - \theta_i) / t_f - t_i$$

$$W = \Delta\theta / \Delta t$$

$$W = 0^\circ / 1.2\text{s} = 0^\circ / \text{s}$$

Como se puede apreciar, las unidades de la velocidad son básicamente los grados, pero pueden aparecer otras como radianes o revoluciones sobre segundo.

Cuando se toma en consideración un intervalo de tiempo prolongado, la velocidad resultante que se calcula se denomina *velocidad promedio*. Cuando el intervalo de tiempo es muy corto o tendiendo a cero, se considera como la *velocidad instantánea*.

Cuando un movimiento se realiza con velocidad constante, el movimiento recibe el nombre de movimiento uniforme. Los cálculos en este tipo de movimientos son sencillos sobre todo cuando las cantidades que se manejan son escalares. Cuando se trabaja con magnitudes vectoriales, los cálculos son un tanto más complejos por el tratamiento matemático, en especial el de trigonometría.

Cuando el movimiento no es uniforme, aparece una variable derivada de la velocidad: la *aceleración*. Cuando un cuerpo cambia su velocidad en el transcurso del tiempo, se dice que el cuerpo experimenta una aceleración. De esta manera, la aceleración es igual:

$$= \text{velocidad final} - \text{velocidad inicial} / \text{tiempo final} - \text{tiempo inicial}$$

$$= (W_f - W_i) / t_f - t_i$$

$$\alpha = \Delta W / \Delta t$$

donde  $W_f$  = velocidad final  
 $W_i$  = velocidad inicial

Las unidades de la aceleración son grados por segundo cada segundo ( $^\circ / s^2$ ).

A este tipo de movimiento se le puede llamar movimiento uniformemente acelerado. Para el cálculo de distancias velocidades en este tipo de movimiento aparecen algunas fórmulas derivadas de las anteriores:

$$w_f = w_i + \alpha t$$

$$= w_i t + 1/2 \alpha t^2$$

$$w_f^2 = w_i^2 + 2 \alpha s$$

Aunque una partícula girando alrededor de un punto posee una trayectoria curva, en un momento determinado su velocidad es tangente a la trayectoria y por lo tanto tiene una velocidad lineal. La velocidad lineal en un movimiento rotatorio tiene una trayectoria que es perpendicular al radio del movimiento. Su magnitud se puede hallar obteniendo la velocidad angular en rad/s, multiplicándola por el valor del radio. Por lo tanto:  $V = W * r$ .

La aceleración lineal, relacionada con la magnitud de la aceleración angular es también tangencial a la trayectoria circular, por lo que se puede escribir:

$$= W / t, a = V / t, V = W * r. \text{ Entonces } a_T = W * r / t \text{ y } a_T = r \cdot \alpha$$

Aunque un cuerpo rote con velocidad angular constante, la dirección de la velocidad siempre está cambiando, por lo que siempre existirá aceleración. El cambio de dirección apunta hacia el centro del círculo a lo largo de su radio y a esto se le llama la *aceleración radial* la cual tiene una dirección radial hacia el centro de la trayectoria y cuya magnitud es igual a  $a_R = W^2 * r = V^2 / r$ .

El componente de aceleración tangencial y el componente de aceleración radial son perpendiculares entre sí ( $a_R$  y  $a_T$  son los dos lados de un triángulo rectángulo), la aceleración resultante será  $a^2 = a_R^2 + a_T^2$ .

Relaciones entre cinemática lineal y angular

Variables	Cinemática lineal	Cinemática angular
<b>Símbolos</b>		
Distancia	d (metros)	(radianes)
Desplazamiento	d (metros, ángulo)	(rad, hor-antihor)
Rapidez	r (m/s)	(rad/s)
Velocidad	v (m/s, ángulo)	w (rad/s, hor-antihor)
Aceleración	a (m/s <sup>2</sup> )	(rad / s <sup>2</sup> )
<b>Ecuaciones</b>		
Desplazamiento	$d = V_i t + \frac{1}{2} a t^2$	$= w_i t + \frac{1}{2} t^2$
Velocidad	$V_f = V_i + a t$	$w_f = w_i + t$
	$V_f^2 = V_i^2 + 2 a d$	$w_f^2 = w_i^2 + 2$
Aceleración	$a = (V_f - V_i) / t_f - t_i$	$= (W_f - W_i) / t_f - t_i$
<b>Conversiones</b>		
Desplazamiento	$d = * r$	$= d / r$
Velocidad	$v = w * r$	$w = v / r$
Aceleración	$a = * r$	$= a / r$

### *Cinética o dinámica*

La rama de la biomecánica que estudia el movimiento y las causas que lo producen es la **dinámica o cinética**, su estudio está centrado en la fuerza, como la causa que produce los movimientos. El estudio de la dinámica es por tanto el estudio de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo para producir movimiento. En algunas ocasiones, aunque sobre un cuerpo estén actuando varias fuerzas, no se produce movimiento, en este caso, aparece la *estática*, como rama de la dinámica que estudia los cuerpos sometidos a fuerzas que están en equilibrio.

### *Cinética lineal*

La fuerza es un concepto usado para describir la *interacción* entre un objeto y su medio. Puede ser definida como un agente que produce o tiende a producir un cambio en el estado de reposo o de movimiento de un objeto. Así por ejemplo, un balón de fútbol colocado sobre la grama permanecerá en ese sitio a menos que alguien le aplique una fuerza por medio de un puntapié y entonces él cambiará de posición y de velocidad. En otro caso, un ciclista que rueda por una pista a una velocidad de 30 km/h tenderá a permanecer en esa velocidad, a menos que ejerza una fuerza sobre los pedales para cambiar su velocidad.

Desde el punto de vista físico, todas las fuerzas son ejercidas por interacciones y repulsiones de cargas nucleares. A este tipo de fuerzas se les denomina fuerzas sin contacto.

Brancazio (1984) divide las fuerzas en dos grupos: fuerzas de contacto y fuerzas sin contacto. En el primer grupo se encuentran todas las fuerzas ejercidas por un objeto sobre otro, como en el caso de la fuerza del aire, la muscular o la fricción. En el segundo caso, está la fuerza de la gravedad, las fuerzas electrónicas, etc. La fuerza es un vector que tiene magnitud, dirección y sentido. Para determinar la fuerza resultante sobre un cuerpo se deben utilizar los procedimientos del álgebra vectorial.

Newton (1642-1727) definió la relación entre fuerza y movimiento mediante tres leyes que son conocidas como las leyes del movimiento. Estas leyes son: la ley de la inercia (I Ley), la ley de la aceleración (II Ley) y la ley de la acción y reacción (III Ley).

### **I Ley o ley de la inercia**

Todo cuerpo tiende a permanecer en estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo mientras no sea obligado a cambiar su estado por aplicación de fuerza externas sobre él.

De acuerdo a esta ley, siempre se requiere una fuerza para iniciar un movimiento, para pararlo o cambiar su dirección o velocidad. De la misma manera, es necesario definir los conceptos de inercia y de masa para aclarar esta ley:

**Inercia:** propiedad de los cuerpos de conservar el estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. Es directamente proporcional a la masa o a la cantidad de movimiento ( $mv$ ).

**Masa:** es la cantidad de materia que contiene un cuerpo. Representa la resistencia de los cuerpos a la aceleración lineal ( $m = F/a$ ).

**Cantidad de movimiento o momento lineal:** es la fuerza que adquieren los cuerpos en virtud de su masa y de su velocidad ( $p = m*v$ ) ( $kg * m/s$ ).

De acuerdo a estos dos conceptos, dos cuerpos con igual masa (5 kg) que se mueven a diferente velocidad (2 m/s y 3 m/s), tienen diferente inercia. Para

el primero, su cantidad de movimiento es de 10 kgm/s mientras que para el segundo es de 15 kgm/s. Para alterar la inercia de cada uno de estos cuerpos se requieren fuerzas diferentes.

De acuerdo a esta ley, cuando un cuerpo unido a una cuerda se hace girar, una vez la cuerda se suelte, el cuerpo continuará viajando en línea recta. El ejemplo típico es el lanzamiento de martillo; una vez el martillista suelte el martillo, éste se moverá en línea recta, a menos que en el plano horizontal actúe alguna fuerza como la del viento.

Por el contrario, siempre que un objeto viaje en línea curva, deberá existir una fuerza que siempre esté cambiando su trayectoria rectilínea.

## **II Ley de Newton o ley de la aceleración**

El cambio de momento de un cuerpo es proporcional a la fuerza aplicada y tiene la dirección en la cual actúa la fuerza o la resultante de las fuerzas aplicadas.

La aceleración que adquiere un objeto por la acción de una fuerza constante no equilibrada es directamente proporcional a dicha fuerza y tiene la misma dirección y sentido que ella ( $F = m \cdot a$ ).

El término momento ( $p$ ) describe la cantidad de movimiento que posee un cuerpo y se define por el producto de su masa ( $m$ ) por su velocidad ( $v$ ):

$$p = mv$$

El cambio de su momento puede ser escrito como:

$$p / t = (mv) / t$$

Debido a que  $m$  no es aplicable al cuerpo humano, puesto que la masa siempre permanece constante, entonces, de acuerdo a la segunda ley de Newton, la fuerza aplicada ( $F$ ) es proporcional a la velocidad del cambio de momento:

$$F = p / t = m v / t$$

pero  $v / t$  es el equivalente de la aceleración ( $a$ ), por lo que la segunda ley se escribe también:

$$F = ma$$

Esta ecuación es la expresión algebraica de la segunda ley de Newton. Conceptualmente, es una relación causa-efecto. El término del lado izquierdo de la ecuación representa la causa porque simboliza la interacción entre un sistema y su medio ambiente. En contraste, el término de la derecha revela el efecto porque indica el efecto cinemático de las interacciones sobre el sistema.

La fuerza se expresa en newtons<sup>5</sup>. Un newton es la fuerza que al ser aplicada sobre una masa de un kilogramo le produce una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$ :

$$F = m \cdot a; 1\text{N} = 1\text{kg} \cdot 1\text{ms}^{-2}$$

### III Ley o ley de la acción y reacción

Cuando dos objetos físicos interactúan, las fuerzas de interacción son iguales y opuestas (la misma magnitud pero sentido contrario).

Esto implica que la fuerza ejercida por un cuerpo sobre otro, es contrarrestada por una fuerza que el segundo cuerpo ejerce sobre el primero. Esta ley enfatiza en que la fuerza representa una interacción entre un objeto y su medio circundante. Por ejemplo, un jugador de baloncesto al realizar un salto, ejerce una fuerza contra la tierra y la tierra responde con una fuerza de reacción sobre el saltador. Según la tercera ley, la consecuencia de estas fuerzas es una aceleración experimentada por cada cuerpo dependiendo de su masa. Si el promedio de fuerza fuese de  $1.500\text{N}$  y el jugador tuviera una masa de  $75\text{kg}$ , entonces el jugador debió estar sometido a una aceleración de  $20 \text{ m/s}^2$  ( $1.500\text{N}/75\text{kg}$ ). Debido a la gran masa de la Tierra, la aceleración experimentada por ella debe ser imperceptible ( $1.500\text{N}/$  masa de la Tierra =  $1500\text{N} / 6 \cdot 10^8$  toneladas).

---

<sup>5</sup> Existen otras unidades de fuerza como lo son el kilopondio (kp) que se consideraba como la fuerza que al actuar sobre una masa de  $1 \text{ kg}$ , le produce una aceleración de  $9.8 \text{ m/s}^2$

### *Fuerzas sin contacto*

Las fuerzas que obran sin estar de por medio el contacto entre los cuerpos son las fuerzas asociadas con los componentes de los núcleos de los átomos y que son debidas a la gravedad.

Newton caracterizó la gravedad en la ley de la gravitación universal: dos objetos físicos cualesquiera, se atraen con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

$$F = G * m_1 * m_2 / r^2$$

$$G = 6.67 * 10^{-8} \text{ din} * \text{cm}^2 / \text{gr}^2.$$

donde  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los dos cuerpos y  $r$  la distancia entre ellos.

Las fuerzas de atracción entre los cuerpos son a menudo despreciadas en el estudio del movimiento humano con excepción de la atracción entre la tierra y los objetos. La magnitud de esta atracción, fuerza conocida como el *peso*, depende de la masa de los objetos implicados y de la distancia entre ellos.

Peso ( $w$ ): representa la fuerza con la cual la masa del cuerpo es atraída por la tierra ( $w = m * g$ ).

Es importante diferenciar los conceptos de masa y de peso. La masa, como ya fue definida, es la cantidad de partículas que posee un cuerpo mientras que el peso es la fuerza con la que esa masa es atraída por la gravedad de la tierra.

Las básculas generalmente miden la masa de los cuerpos y de ahí que sus unidades se den en kilogramos. Un error común en biomecánica es confundir masa con peso, más específicamente, cuando de toman las unidades de las básculas como unidades de peso.

De la ley de atracción gravitacional se desprende que el peso cambia con la altura sobre el nivel del mar porque varía la distancia entre los cuerpos. Así por ejemplo, Bob Bemon, campeón olímpico de salto largo en México (altitud de 2.250m), tenía una masa de 75kg, con un peso a nivel del mar de 736N, pero a la altura de ciudad de México fue de 735N.

La dirección del vector peso es siempre vertical hacia el centro de la tierra; el origen del vector es un punto conocido como el centro de gravedad.

El centro de gravedad representa un punto de balance, un lugar en el cual todas las partículas del cuerpo están eventualmente representadas. Existen varias metodologías para calcularlo; la más conocida es la de Dempster (1955) basada en el estudio de cadáveres. Dempster encontró el peso de cada segmento corporal y lo comparó con el peso total, determinando el peso relativo para cada uno de ellos ( $\text{peso del segmento} \times 100 / \text{peso total del cuerpo}$ ). Igualmente, mediante el método de la balanza halló el centro de masa de cada segmento, relacionándolo con la longitud total del mismo. Determinó un promedio de distancia relativa ( $\text{distancia desde el punto proximal al punto donde se ubica el centro de gravedad} \times 100 / \text{distancia total del segmento corporal}$ ) para 14 segmentos corporales, todos ubicados en dirección próximo distal. Zatsiorsky y Seluyanov (1983) realizando estudios con rayos gamma, mejoraron la metodología de Dempster. En 1996 de Leva, adapta los resultados obtenidos por Zatsiorsky-Seluyanov (1995) y establece parámetros inerciales, que son los más usados actualmente en la determinación del centro de gravedad de los deportistas:

Segmento	Peso de los segmentos relativo al peso total del cuerpo (% de 1)		Localización del vector CG de los segmentos corporales, expresado como porcentaje de la distancia total, a partir del punto proximal	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Cabeza-Cuello	0.0694	0.0688	59.76	58.94
Tronco	0.4346	0.4257	44.86	41.51
Brazo	0.0271	0.0255	57.72	57.54
Antebrazo	0.0162	0.0138	45.74	45.59
Mano	0.0061	0.0056	79.00	74.74
Muslo	0.1416	0.1478	40.95	36.12
Pierna	0.0433	0.0481	44.59	44.16
Pie	0.0137	0.0129	44.15	40.14

*Fuerzas de contacto*

Estas fuerzas no son realmente fuerzas de diferente tipo, sino diferencias en el agente que causa la interacción. Tales fuerzas se hallan frecuentemente en análisis de movimiento humano y son: la fuerza de reacción articular, la fuerza de reacción de la tierra, la fuerza elástica y la fuerza muscular.

Fuerza de reacción articular: Cuando un sistema es definido de manera que los músculos representan una fuerza externa, entonces el concepto de fuerza

de reacción articular es definida como *la cantidad de fuerza neta generada por el contacto entre hueso-hueso de segmentos corporales adyacentes*. En la mayoría de los casos, estas fuerzas no son calculadas, pero con la tecnología apropiada, es posible determinarla.

### *Fuerzas de reacción de la tierra*

Fricción ( $F_{fr}$ ) : es la fuerza que acciona en dirección tangencial al punto de contacto entre dos cuerpos y opone resistencia o impide el movimiento ( $F_{fr} = \mu F_N$ ). ( $\mu$  = coeficiente de fricción;  $F_N$  = fuerza normal).

Impacto: representa el choque entre dos cuerpos en movimiento relativo, uno con respecto a otro.

Ley de impacto de Newton: si dos cuerpos se mueven uno hacia el otro en una línea recta, la diferencia de las velocidades después del impacto depende de la diferencia de sus velocidades en el momento del impacto.

$$V_1 - V_2 = -e (U_1 - U_2)$$

$$-e = (V_1 - V_2) / (U_1 - U_2)$$

(Coeficiente de restitución)

$$V_1 / U_1 = -e$$

(Choque con un cuerpo fijo).

V = velocidad después del impacto

U = velocidad antes del impacto

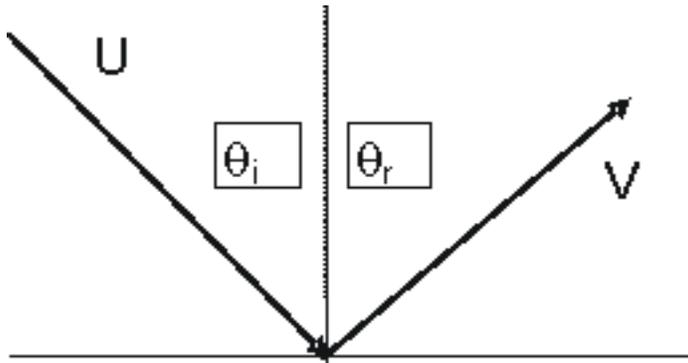
Rebote vertical de una pelota:

$$U_1 = (2gh_a)^{1/2} \text{ (Antes del impacto)}$$

$$V_1 = (2gh_d)^{1/2} \text{ (Después del impacto)}$$

$$e = (h_a / h_d)^{1/2}$$

Impacto oblicuo:



- i = ángulo de incidencia
- r = ángulo de reflexión
- U = velocidad antes del impacto
- V = velocidad después del impacto.

Impacto entre dos cuerpos en movimiento:

El momento del sistema antes del impacto es igual al momento del sistema después del impacto:

$$m_1 * U_1 + m_2 * U_2 = m_1 V_1 + m_2 * V_2$$

Presión: representa la fuerza aplicada sobre la unidad de superficie ( $P = F/A$ ;  $N / cm^2$ ).

Trabajo mecánico (W): cuando una fuerza actúa sobre un objeto y lo desplaza venciendo una resistencia, el producto de la fuerza y el desplazamiento producido durante la acción es el trabajo mecánico realizado ( $W = F*d$ ;  $N*m = 1 \text{ Joule}$ ).

Potencia: representa la rapidez de la realización de un trabajo mecánico ( $P = W/t = F*V = \text{Joule} / s = \text{vatio}$ ).

Energía cinética: es la energía producida en virtud del movimiento ( $E_c = 1/2 mv^2 = \text{Joule}$ ).

Energía potencial: es la energía adquirida en virtud de su posición o altura ( $E_p = mgh$ ).

Energía mecánica: es igual a la suma de la energía cinética más la energía potencial. Esta energía es constante durante el movimiento.

### *Cinética rotatoria*

Fuerza excéntrica: es la una fuerza cuya línea de acción no pasa o no actúa directamente sobre el centro de masa de un cuerpo o sobre el eje de giro.

Torque o momento de una fuerza: es el producto entre la fuerza y el brazo de momento de la misma ( $= F \cdot b_m = N \cdot m$ ).

Equilibrio: es el estado de descanso de un cuerpo. Se obtiene cuando sobre un cuerpo actúan fuerzas balanceadas. Las condiciones de equilibrio de un cuerpo son:  $\sum \tau = 0$ ,  $\sum F = 0$ .

Equilibrio estable: un cuerpo que puede rotar se encuentra en equilibrio estable cuando un pequeño desplazamiento angular origina un momento que lleva al objeto a su posición inicial (centro de masa debajo de la base de apoyo).

Equilibrio inestable: un cuerpo que puede rotar se encuentra en equilibrio inestable cuando un pequeño desplazamiento angular origina un momento que hace aumentar el desplazamiento (centro de masa encima de la base de apoyo).

Equilibrio indiferente: un cuerpo que puede rotar se encuentra en equilibrio indiferente cuando en cualquier posición permanece en equilibrio (centro de masa pasa por el eje de giro).

Factores de la estabilidad:

1. Un cuerpo es más estable en cuanto mayor área de sustentación posea.
2. Un cuerpo es más estable en cuanto mayor peso posea.
3. Un cuerpo es más estable en cuanto menor sea la altura del centro de

masa en relación a su base de sustentación.

4. Un cuerpo es más estable en cuanto la proyección del centro de masa del cuerpo sobre la base de sustentación caiga más al centro de esta.
5. Un cuerpo es más estable en cuanto mayor sea el ángulo de estabilidad, tomado éste como el ángulo formado entre el centro de masa y los bordes de la base de sustentación en relación a la perpendicular del piso.

Momento de inercia: es la resistencia de los cuerpos a la aceleración angular y depende de la masa del cuerpo y de su distribución alrededor del eje de giro. ( $I = mr^2$ )

Momentum angular: es la cantidad de movimiento angular que posee un cuerpo en movimiento; es igual al producto entre su velocidad angular y el momento de la inercia de la masa alrededor del eje de giro ( $M = I * \omega = mr^2 * \omega$ ).

Fuerza centrípeta: es la fuerza de dirección radial (hacia el centro de la circunferencia) que produce la aceleración centrípeta, originada por el cambio de dirección y sentido del vector velocidad tangencial ( $F_{cp} = m * a_{cp}$ ;  $F_{cp} = m * v^2 / r = m * r * \omega^2$ ).

Fuerza centrífuga: es la fuerza que actúa en dirección radial, alejando el cuerpo del centro de rotación ( $F_{cf} = - F_{cp}$ ).

Leyes de Newton en el movimiento angular:

Primera ley: un cuerpo que rota, continuará rotando alrededor de su eje con un momentum angular constante, a menos que sobre él actúe una cupla (par de fuerzas) o una fuerza excéntrica.

Segunda ley: la aceleración angular de un cuerpo es proporcional al torque (momento) que la produce y se realiza en la dirección de la acción del torque.

Tercera ley: Para cada torque aplicado sobre un cuerpo, existe un torque opuesto de igual magnitud pero de sentido contrario.

Transformación del momentum angular: el momentum angular de una parte

del cuerpo se transfiera a todo el cuerpo en el momento de la desaceleración brusca de las partes del cuerpo.

Relaciones entre cinética lineal y angular

Variable	Cinética lineal	Cinética Rotatoria
Masa	$m$	$I = mr^2$
Cantidad de movimiento	$q = m \cdot v$	$M = mr^2 \cdot \omega$
Fuerza	$F = m \cdot a$	$L = I \cdot \alpha$
Impulso	$F \cdot t$	$L \cdot t$
Trabajo	$F \cdot d$	$L \cdot \theta$
Potencia	$F \cdot V$	$L \cdot \omega$
Energía cinética	$\frac{1}{2} mv^2$	$\frac{1}{2} I \cdot \omega^2$

## REFERENCIAS

- Brancazio, P.J. (1984). *Sport Science: Physical laws and optimum performance*. New York: Simon and Schuster.
- De Leva. (1996). Adjustements to Zatsiorsky-Seulyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*. 29 (9), 1223-1230.
- Dempster, W. T. (1955). Space requeriments of the seated operator (WADCA-TR-55-159). Wright Patterson Air Force Base, OH: Aerospace Medical Research Laboratory (NTIS N° AD-87892).
- Dorland's illustrated medical dictionary*. (1965). Philadelphia, USA: W. B. Saunders Co.
- Enoka, R. (1988). *Neuromechanical Basis of Kinesiology*. Human Kinetics. Champaign, Illinois, USA.
- Gutiérrez, M. (1999). *Biomecánica Deportiva*. Síntesis: Valle Hermoso.
- Hay, J. G. (1978). *The Biomechanics of Sports Techniques*. Prentice Hall, Inc. 2 ed.
- Kreighbaum, E. & Barthles, K. (1990). *Biomechanics : A Cualitative Aproach for studying human movement*. New York, USA: Macmillan Publishing Company. 3 ed.
- Luttgens, K. & Wells, K. (1982). *Kinesiología: Bases científicas del movimiento humano*. 7 ed. Saunders College Publishing.
- O'Connel, A. Gardner, E. (1981). *Understanding The Scientific Bases of Human Movement*. Williams Wilkins. Baltimore, London.
- Webster's Third New International of English Language. (1961). Springfield, Mass: G&C Merriam CO2.
- Williams, I. M. & Lessner, H. (1991). *Biomecánica del movimiento humano*. Argentina: Ed. Trillas.



# Aplicabilidad de la variabilidad en los análisis biomecánicos del gesto y el entrenamiento deportivo

José Alcides Acero Jáuregui. Ms. Sc. & Sci.\*

## Introducción

La mayoría de biomecánicos deportivos están fundamentalmente orientados al mejoramiento del rendimiento deportivo y a reducir el nivel de la incidencia de las lesiones. Según Bartlett (2008) la investigación aplicada en la biomecánica deportiva ha cubierto tres grandes tópicos: (1) ¿Cómo la lesión deportiva puede ser reducida a través de la investigación biomecánica y las intervenciones? , (2) ¿Cómo los biomecánicos deportivos pueden investigar el control y la coordinación de los movimientos deportivos para ayudar a optimizar el rendimiento deportivo? y (3) ¿Cómo los biomecánicos pueden dirigir la retroalimentación de la información pertinente a los mejoramientos del rendimiento o a la reducción del riesgo de la lesión?

Hasta hace unos pocos años, la investigación aplicada en biomecánica deportiva, teniendo en cuenta el mejoramiento del rendimiento, ha trabajado con algunos presupuestos que en forma implícita se relacionan con: a) los movimientos deportivos que son y deben ser repetidos idénticamente, b) la existencia de un movimiento óptimo que pueda ser aplicado a todos los deportistas de esa especialidad, c) el hecho de asumir que un intento del movimiento representa los otros intentos y la realidad final del mismo, d) la predominancia de un acercamiento determinístico (lineal) para establecer las variables del rendimiento que conllevan a un mejor rendimiento deportivo. Entonces, el uso de un solo intento o una muestra de intentos para representar la realidad dinámica del comportamiento general de un deportista, es una práctica común en la investigación biomecánica en el deporte. Se asume

---

\* Lic. Educación Física. Ms. Sc. & Sci. Director científico, Instituto de Investigaciones & Soluciones Biomecánicas. Cali, Colombia. [jacero5@telmex.net.co](mailto:jacero5@telmex.net.co)

por parte de algunos biomecánicos, que el rendimiento deportivo está caracterizado por un bajo nivel de variabilidad entre cada ejecución de un determinado movimiento y que la repetición de los movimientos deportivos tiende a ser idéntica. Esta noción ha llevado a los investigadores biomecánicos a establecer valores normativos de variables que operan como claves en el rendimiento del gesto deportivo y que pueden ser consideradas como criterio para todos los deportistas de la especialidad, creándose así la técnica deportiva ideal.

Teóricos en sistemas dinámicos, (Newell & Slifkin 1998, Davids et al. 2003b; Bartlett, R. M. Wheat, J. S. & Robins, M. 2007) arguyen, desde otro ángulo, que la existencia de un patrón común y óptimo es una falacia, dada la gran variabilidad observada inter e intra-individuos en el rendimiento motor humano. La teoría sobre los sistemas dinámicos con un marco teórico multidisciplinario, acompaña las ideas del caos, complejidad, la dinámica no lineal, que son tenidos en cuenta para sustentar estos resultados. Desde esta perspectiva, la variabilidad en el comportamiento del sistema del movimiento humano no es vista como típicamente se ve, como un factor de ruido o error en la ejecución, por el contrario, se indica en Davids y otros (2003a), que los sistemas del movimiento humano necesitan acceder a esta información para contextualizar los movimientos en presencia de error o ruido, en la forma de variabilidad de la estructura del resultado motor, factor que constituye un imperativo para las adaptaciones funcionales a los ambientes dinámicos. En otras palabras, la variabilidad en el movimiento humano no debe ser concebida como un factor negativo sino como un factor funcional que aporta al rendimiento deportivo.

Cada deportista, atendiendo a sus diferencias individuales tanto a su estructura corpórea como en la ejecución de los gestos deportivos, tiene variabilidad en sus patrones y su relación con los de otros deportistas. De esta manera, investigar la variabilidad del movimiento en forma intra e inter individual es un nuevo acercamiento a la evaluación, diagnóstico y control de las técnicas deportivas. Así, la meta de esta investigación es presentar una visión comprensiva, científica y práctica sobre la variabilidad de factores biomecánicos del movimiento deportivo que afectan la “técnica” intra e inter individual, su adquisición, el mantenimiento, perfeccionamiento, evaluación y control en el proceso del entrenamiento deportivo.

Conceptos y perspectivas tradicionales de la variabilidad en el movimiento humano

La variabilidad en el movimiento humano puede ser conceptuada como las variaciones normales que ocurren en la ejecución motora a través de múltiples repeticiones de un gesto (Stergiou et al. 2004). La variabilidad es inherente en todos los sistemas biológicos, en espacio y tiempo y puede ser fácilmente observada.

En la literatura de Control Motor existe una variedad de lineamientos científicos sobre la variabilidad del movimiento humano. Por ejemplo, en concordancia con Schmidt (2003) y Schmidt & Lee (2005), la variación de un patrón de movimiento en un momento determinado, puede ser considerada como la consecuencia de errores en la habilidad de predecir los parámetros necesarios para utilizar un programa motor y, con la práctica de tareas específicas, la predicción de errores puede ser eliminada gradualmente y de esta forma optimizar la precisión y eficiencia del patrón motor. En términos prácticos, esta tendencia de pensamiento implicaría que a mayor práctica de una tarea específica, como por ejemplo en el saque en tenis de campo, los errores vistos inicialmente se corregirán paso a paso hasta obtener un nivel de poca variabilidad en este gesto deportivo.

Otra forma de interpretación de este fenómeno de la variabilidad, es que los sistemas biológicos son auto organizados en cuanto al ambiente y las restricciones de orden biomecánico y morfológico, para encontrar la solución más estable en la producción de un movimiento específico (Thelen & Smith, 1994 y Kelso, 1995). Bajo este concepto, un incremento en la variabilidad de un patrón de movimiento significa una menor cooperación de los tres componentes del sistema referencial antes enunciado. Una disminución en la variabilidad del patrón de movimiento indicaría un comportamiento cooperativo y altamente estable del sistema. Esta línea de pensamiento indicaría en el plano deportivo, que para realizar el saque de tenis hay que tener en cuenta el ambiente o estado externo del momento del gesto y las limitaciones biomecánicas y morfológicas del tenista. Si el saque es efectivo y eficiente implicaría una colaboración muy buena de estos tres componentes y por consiguiente, el sistema permanecería más estable, es decir, menos variable.

Estadísticamente, la variabilidad puede ser definida como la varianza de los datos relacionada con su promedio y cuantificada usualmente por el tamaño de la desviación estándar (Riley & Turvey, 2002). La desviación estándar informa sobre el grado de variabilidad de un parámetro dado del sistema.

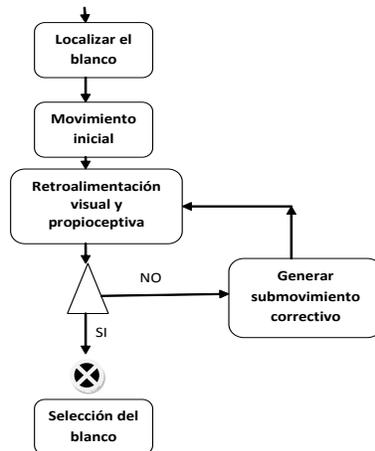
Entonces la variabilidad en el movimiento humano ha sido tradicionalmente interpretada como un problema o “ruido” que debe ser minimizado para un rendimiento óptimo en una técnica definida (Newell & Corcos, 1993). El “ruido” aquí se presume como las fluctuaciones al azar y está presente en los mecanismos neuromusculares en los sistemas biológicos. Este concepto ha sido adoptado como un factor limitante en control motor pero esta visión necesita de una mayor exploración para ir más allá de la desviación estándar. Entre mayor sea la variabilidad operacionalizada por la desviación estándar, mayor el ruido en el sistema. Atendiendo a esta perspectiva, los investigadores en biomecánica y control motor han buscado típicamente parámetros de baja variabilidad o “menor ruido” dentro del movimiento humano, ignorando el papel que los parámetros con variabilidad o “mayor ruido”, pueden jugar en este caso.

De acuerdo con Latash & Gutman (1993) la noción de variabilidad puede ser presentada en dos formas. La primera considera las desviaciones de las características del movimiento tomadas desde aquellas observadas durante un rendimiento “ideal” o “promedio”. Por ejemplo, esta noción puede ser aplicada en cualquier acción repetitiva tales como el pedaleo en ciclismo o el ciclo de marcha, describiendo variables cinemáticas, cinéticas o electromiografías. Puede ser utilizada también para el análisis de series de acciones motoras discretas, asumiendo que las condiciones de ejecución e intenciones del sujeto, no cambian de un intento a otro. La dispersión de una variable escogida es frecuentemente utilizada como la medición de la variabilidad. La segunda interpretación se relaciona con el factor que requiere la introducción de la noción de un blanco cuantificable, la cual impone restricciones explícitas sobre los cambios en ciertas variables de la ejecución, tales como una posición final, el tiempo del movimiento o un objetivo externo. En control motor y en las técnicas deportivas, las dimensiones de estos blancos están fijadas como el gol en fútbol, producto de un lanzamiento libre desde una zona escogida. Algunas veces el porcentaje del número de intentos exitosos, es utilizado como una medida (efectividad = 45% de los intentos).

Tradicionalmente la variabilidad en el movimiento humano se ha considerada como un recurso de “error” o “ruido” en el rendimiento, que debe ser eliminado del sistema motor. Varios modelos determinísticos han sido propuestos en el control del movimiento humano basados en que la variabilidad es producida por ruido que puede ser superpuesta a diferentes niveles en la relación entre el aporte (input) y el resultado (output). El modelo determinístico es un modelo

teórico que presenta la relación entre el resultado de una tarea motora y los factores que producen este resultado. Estos modelos son, entre otros, el modelo determinístico de interacción y correcciones (*iterative-corrections model*) creado por Crossman & Goodeve (1963, 1983) y después desarrollado por Keele (1968) y Langolf y otros (1976). Este modelo implica que los movimientos para alcanzar un determinado objetivo son hechos rápidamente y en forma precisa, a través de interacciones de sub-movimientos corregidos y guiados por una retroalimentación visual o cinestésica. Establece que el movimiento está enteramente basado en el esquema de un bucle de control cerrado, que consiste en el concepto de que un movimiento consiste en una serie de sub movimientos discretos, que al final de cada uno de ellos, la retroalimentación visual es utilizada para planear el siguiente sub-movimiento hasta que el blanco es obtenido (Ver figura 1).

En el campo de la biomecánica deportiva el profesor James Hay fue sin duda el pionero de los modelos determinísticos o jerárquicos que han sido aplicados a tareas motoras seleccionadas y a las ejecuciones técnicas en el alto rendimiento por varios investigadores alrededor del mundo en las últimas tres décadas. Un modelo determinístico puede ser construido con base en cantidades mecánicas o combinaciones apropiadas de las cantidades mecánicas y todos los factores incluidos en ese nivel (Ver figura 2).



**Figura 1.** Esquema de control para sub-movimientos correctivos

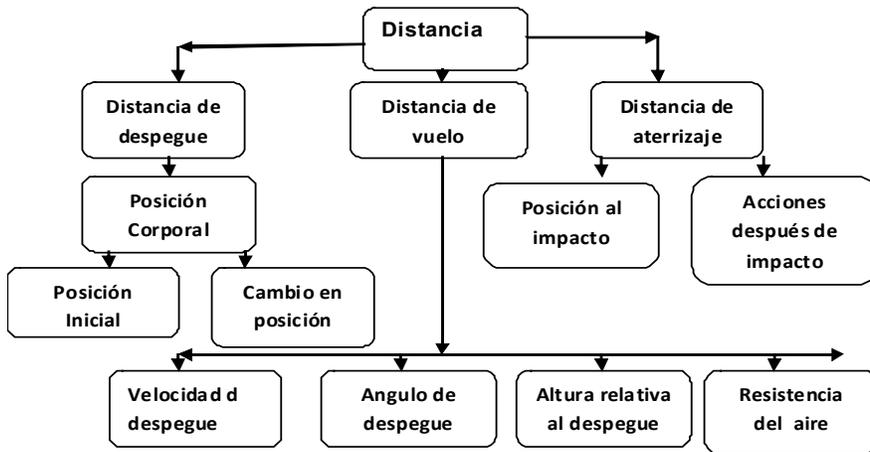
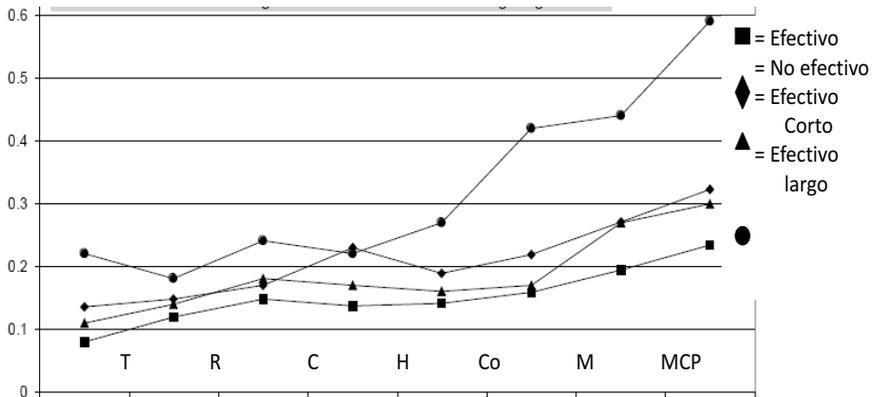


Figura 2. Modelo Determinístico de un salto en longitud utilizado para un análisis cualitativo. Traducido, adaptado y modificado de Hay, 1993.

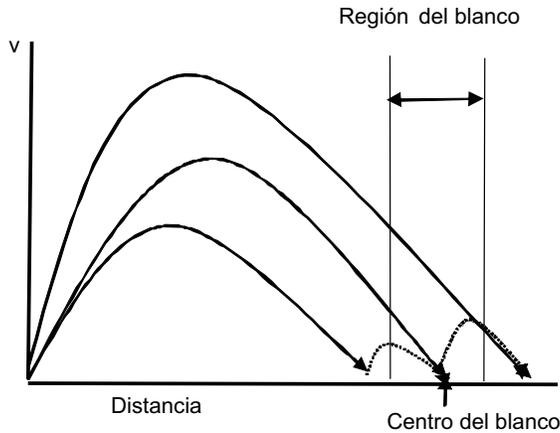
Segundo, el modelo de variabilidad-impulso (MV-I) (*Impulse-Variability Model*) sustentado por Schmidt y otros (1979) según el cual el movimiento es atribuido a un impulso inicial dado por músculos que llevan el segmento hacia el objetivo, seguido por un deslizamiento hacia éste sin ninguna corrección. Este modelo sugiere que los movimientos que combinan velocidad y precisión pueden ser entendidos en términos de dificultades de programación inherentes al factor de que los impulsos grandes, necesarios para arribar a velocidades más altas, están asociados a variabilidades más amplias. Por los resultados demostrados en este modelo, se deduce que existe una relación lineal entre la precisión final y el momento del tiempo. En el mundo de la técnica deportiva son muchos los ejemplos que pueden ser sujetos a la aplicación de este modelo que conlleva precisión y velocidad. Por ejemplo, se conocen, entre otros, los lanzamientos en baloncesto, los saques en tenis y voleibol, los tiros al arco en fútbol, los saltos en atletismo, los agarres en la mayoría de los deportes y las técnicas gimnásticas. Para explicar esta teoría de la variabilidad- impulso desde el mundo del deporte, se ha reportado por Miller (2002) una gran variabilidad en velocidad lineal de los segmentos terminales (T= tobillo, R = rodilla, C= cadera, H= Hombro, Co = codo, M = muñeca y MCP = metacarpo) para los tiros libres largos y cortos, en baloncesto. Los tiros no efectivos son más variables, lo mismo que los tiros largos.



**Figura 3.** Desviaciones estándar de velocidades lineares en la liberación de la pelota en tiros libres efectivos y no efectivos en rangos cortos (2,74 m) y largos (6,4 m)

El tercer modelo es denominado sub-movimiento optimizado estocástico (SEO) (hipotético o fortuito) (*stochastic optimized-submovement model*) creado por Meyer y otros (1988, 1990) basado sobre la premisa de que el ruido existe en el sistema neuro-motor y que conlleva relaciones sistemáticas entre la velocidad y la variabilidad de los puntos finales de los componentes de los sub-movimientos. Meyer y otros (1990) describe el proceso de cumplir un objetivo como un sub-movimiento primario inicial donde si el movimiento tiene éxito, el proceso termina y si no (causa de un ruido o error) se produce un sub-movimiento correctivo secundario, basado en una retroalimentación visual o propioceptiva. Meyer y otros (1990) asumen que un solo sub-movimiento correctivo es típicamente utilizado.

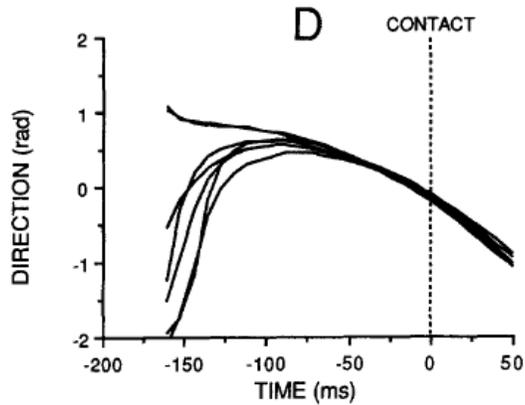
Los impulsos iniciales que son muy rápidos, serán altamente variables e invertirán tiempos más largos en los movimientos totales, a causa de una amplia necesidad de sub-movimientos correctivos. Si los impulsos iniciales son muy bajos en velocidad, serán altamente más precisos pero también revertirán en tiempos largos de movimientos totales, a causa de la larga duración en los impulsos iniciales. Una velocidad óptima del impulso inicial, debe ser asumida de tal manera que las duraciones combinadas del impulso inicial y las fases de corrección de errores, puedan ser minimizadas (Ver figura 4).



**Figura 4.** Secuencias representativas de los sub-movimientos hacia un área-objetivo en el modelo estocástico optimizado. Traducido, tomado y adaptado de Meyer et al. 1988.

En el contexto del análisis de la técnica deportiva, la aplicación de este modelo (sub-movimiento optimizado estocástico) se describe como la ejecución de un movimiento inicial que puede ser corregido por otro subsiguiente, para obtener el resultado de alcanzar un objetivo preciso. Por ejemplo, en el trabajo investigativo de Bootsma & Van Wieringen (1990) se analizó, en términos de temporalidad, el *drive* de ataque en tenis de mesa. En la figura 5 se observan claramente las estrategias del primer sub-movimiento, empleadas en siete ejecuciones de esta técnica de alto nivel, en donde se manifestó una amplia variabilidad de inicio en la dirección de la raqueta hasta llegar al momento de contacto (o segundos). Esto implica, según este modelo, que un segundo sub-movimiento correctivo fue necesario para llegar al objetivo final que fue el impacto raqueta-pelota.

Resumiendo, estas perspectivas tradicionales son complementarias y tienen un común denominador: a) variabilidad es equivalente a “ruido”, b) reconocen que la disminución de la variabilidad resulta de la ejecución eficiente de un patrón de movimiento dado y c) que los cambios de los estados de conducta motora pueden ser señalados incrementando la variabilidad, hasta que un patrón de movimiento más estable sea adoptado. Esta propuesta implica que la falta de la variabilidad en el movimiento, en presencia de demandas de tareas motoras cambiantes o condiciones ambientales, puede indicar comportamientos motores rígidos e inflexibles con una adaptación limitada.



**Figura 5.** Variabilidad de inicio en la dirección de la raqueta en tenis de mesa en siete técnicas del drive frontal de ataque. Tomado y adaptado de Bootsma & Van Wieringen, 1990.

En este sentido, reducir la variabilidad se considera uno de los factores más importantes en la adquisición de la destreza o gesto motor (proceso de enseñanza aprendizaje), tan es así que muchos estudios han indicado que los resultados y patrones de movimiento son más consistentes con la práctica.

### **Nuevos lineamientos en el entendimiento de la variabilidad del movimiento humano**

La variabilidad está inherente dentro y entre los sistemas biológicos (Newell & Corcos, 1993). Teniendo en cuenta el principio de la complejidad de la medición y análisis del movimiento humano expuesto por Acero (2002) donde existe un número finito de partes corporales y un número infinito de combinaciones de movimientos producidos por ellas, comprendiendo que todas están trabajando para producir un mismo patrón de movimiento, parece imposible que un movimiento humano del mismo patrón sea igual a otro. Tal como se estableció en el numeral anterior, la concepción tradicional de variabilidad ha sido vista como el ruido o error que debe ser eliminado en un sistema motor, sin embargo, en la última década se ha acentuado la posibilidad de considerar la variabilidad con un papel funcional muy importante en el entendimiento del movimiento humano. En este sentido investigadores biomecánicos han

empleado, recientemente, técnicas de análisis que van desde la aplicación de acercamientos de sistemas dinámicos hasta el control y coordinación de movimientos (ejemplos: Hamill *et al.* 1999; Field-Fote and Tepavac, 2002; Ferber *et al.* 2005).

La variabilidad en el movimiento ha sido tradicionalmente vista como disfuncional y también como la reflexión de un ruido en el sistema nervioso central (CNC) (Newell and Corcos, 1993). Para alcanzar el rendimiento en tareas motoras altamente complejas (tales como los gestos deportivos) se presentan varios problemas dada la naturaleza variable de los ambientes externos e internos del cuerpo humano (Kudo & Ohtsuki, 2008). Una de las razones es que los humanos, bajo el primer problema de la complejidad del movimiento humano (Acero, 2002), tenemos un gran número de grados de libertad (GDL) en nuestro sistema motor dada la variabilidad de articulaciones que posee el cuerpo (desde 1 GDL hasta 3 GDL), el número de músculos que están unidos a varias o una sola articulación y miles de fibras musculares que componen un músculo y que se contraen para ejercer la fuerza que produce el movimiento. Entonces, cuando un deportista ejecuta un movimiento, tiene que resolver este problema y cómo lo logra resolver teniendo en cuenta esta variabilidad inherente. Es aquí donde nace el segundo problema denominado de equivalencia motora, definida como la capacidad de un sistema motor para alcanzar el mismo producto final con una variación considerable en los componentes individuales y que contribuyen a este resultado. Por consiguiente, la variabilidad en el movimiento humano ha sido reconocida en la inter-disciplina del control motor y de la biomecánica, como una tarea muy importante para escudriñar este fenómeno en dos direcciones: a) el factor del ruido presumido o los recursos del azar de la variabilidad del movimiento y b) los aspectos adaptativos de la variabilidad.

Es la opinión del autor de este artículo que las perspectivas tradicionales sobre la variabilidad en el movimiento humano no son suficientemente explicativas de comportamientos motores, que aunque parecen ser muy estables, paradójicamente son ejecutados en formas muy variadas. Esto es evidente en el caso de deportistas de alto rendimiento que realizan movimientos muy complejos como la gimnasia, saltos sobre plataformas, levantamiento olímpico, saque en tenis, lanzamiento de tres puntos en baloncesto, técnicas diversas en judo, karate, lucha, tiros en fútbol, etc. Estos deportistas destacados, exhiben más consistencia que los menos capaces pero también han desarrollado unas formas infinitas de resolver la misma técnica deportiva. Por consiguiente,

ellos tienen comportamientos motores muy estables fundamentados en un gran repertorio.

Otro aspecto de la variabilidad del movimiento, es que existe la idea en un sentido, relacionado con la visión tradicional, de que ésta se disminuye con la adquisición de la técnica, proceso que se denomina “paradigma del aprendizaje motor” y en otro sentido no tradicional, la variabilidad se incrementa con la adquisición de la técnica denominado “el desarrollo del repertorio motor” (Stergiou *et al.* 2006). Estas dos visiones tienen una fuente de análisis diferenciada y es la forma como se miden. Las curvas típicas de aprendizaje motor en el modelo tradicional utilizan medidas estadísticas para establecer la variación, calculando la desviación estándar con valores independientes de su orden en la distribución. La cantidad de variabilidad disminuye y eventualmente se estabiliza, en un valle de la curva en la medida en que el aprendizaje motor ocurre (dinámica lineal). En cambio, la variación de cómo el comportamiento motor cronológicamente va generándose en el tiempo (4 dimensión), puede ser capturada por herramientas derivadas de la dinámica no lineal, por lo cual la secuencia temporal en series de valores es de supremo interés. Un seriado de tiempo que surge en una secuencia simple ordenada y predictiva, es el resultado de interacciones entre los componentes de un sistema de control con un recurso determinístico lineal. Mientras que si sucede en una secuencia enteramente impredecible es derivado al azar o sea no lineal.

Siguiendo los planteamientos de Stergiou y otros, (2006) se determinan ciertas características que describen y diferencian las medidas lineares y no lineares de la variabilidad en el movimiento humano:

En forma típica en la investigación en el movimiento humano, los datos cinemáticos y cinéticos de varios intentos de la misma técnica, son promediados para generar un registro intermediado por la ejecución de la persona o el patrón del movimiento, acompañado de una normalización. Aquí el patrón de organización temporal se pierde.

Desde la estadística, las herramientas lineares tradicionales para estudiar e interpretar la variabilidad asumen que las variaciones entre las repeticiones de una técnica son aleatorias e independientes de repeticiones pasadas y futuras. Sin embargo, en estudios recientes se ha demostrado que las mencionadas variaciones son diferenciadas del “ruido”. Entonces estas no son ni aleatorias ni independientes.

Las herramientas tradicionales lineales proveen diferentes respuestas cuando son comparadas con las no lineales, considerando la estabilidad de un patrón de movimiento (Harbourne & Stergiou, 2003 y Slifkin & Newell, 2000).

## **La variabilidad como resultado del ajuste**

Deportistas extraordinarios tales como Tiger Woods, Diego Maradona, Michael Jordan, Rafael Nadal, Nadia Comaneci y Sergei Bubka, entre otros, han mostrado capacidad para ejecutar sus técnicas en una forma muy consistente, sin embargo sus movimientos no son los mismos de intento a intento, cuando se miden en una forma precisa. Esto implica que sus movimientos fueron o son altamente consistentes pero no son los mismos entre sí. Entonces, ¿será que la variabilidad en la consistencia de los movimientos es producida únicamente por el “ruido o error” o por otros factores? Éste es el valor adaptativo de la variabilidad (Kudo & Ohtsuki, 2008). Por ejemplo, en un partido de tenis cuando contactamos la pelota ésta nunca viene en la misma dirección, con la misma velocidad, con el mismo ángulo y nivel de rotación, por consiguiente, la respuesta motora no es la misma y nuestros movimientos deben ser variables para ser modificados o ajustados cada vez, y así poder conseguir el objetivo final.

Algunas investigaciones han encontrado que hay otras causas de la variabilidad diferentes a las tradicionales como son un resultado de ajustes, compensaciones y coordinación. Por ejemplo, Kudo & Ohtsuki, (2008) reportaron que el movimiento humano es producido en ambientes variables externos e internos y que a causa de esta variabilidad, un mismo comando motor puede resultar en patrones de movimiento bastante diferentes. Entonces, para producir movimientos complejos o altamente habilidosos, como los gestos deportivos, los humanos tenemos que coordinar la variabilidad y no tratar de excluirla. También hay que considerar que el movimiento humano es producido en sistemas complejos y redundantes. Es por esto que los autores mencionados presentan en su investigación modelos dinámicos no lineales, que describen una variedad de movimientos como una auto-organización en un sistema dinámico con un gran número de grados de libertad. Por ejemplo en la figura 6, en las tareas de lanzamiento con blancos estacionarios (tiro libre en baloncesto, tiros al arco en fútbol, saques en voleibol, tiro con arco, remate en voleibol etc.) si los movimientos son consistentes en los parámetros de liberación (punto de liberación, la magnitud del vector y el ángulo) que determina la trayectoria del objeto lanzado, este movimiento se torna

consistente (ver A). Pero este movimiento también puede ser consistente, como consecuencia de una serie de movimientos de parámetros variables, coordinados en tal forma que la trayectoria del proyectil dé en el blanco dado el gran número de grados de libertad que pueden tener las variables de la liberación, pues no siempre se lanza desde el mismo punto, con la misma dirección del vector y con el mismo ángulo (ver B).

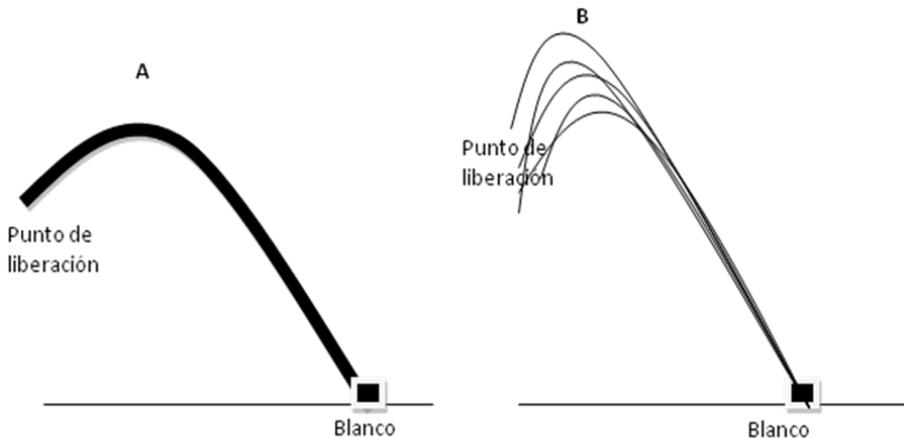


Figura 6. Dos soluciones posibles para el lanzamiento de precisión. A soluciones por parámetros consistentes y B solución por combinaciones combinatorias de parámetros variables. Traducido y adaptado de Kudo y Ohtsuki, 2008

## La teoría de la variabilidad en los sistemas dinámicos en el rendimiento deportivo

La teoría de los sistemas dinámicos (TSD) ha surgido como un marco viable para la comprensión del rendimiento deportivo basada en los procesos de coordinación y control en los sistemas del movimiento humano. TSD es originalmente un área de la matemática aplicada, utilizada para describir el comportamiento de sistemas biomecánicos complejos. Un sistema, según Aracil (1986), puede definirse como una entidad compleja formada por partes en interacción mutua, cuya identidad resulta de una adecuada armonía entre sus constituyentes, y dotada de una sustantividad propia que trasciende a la de esas partes. Un sistema dinámico (SD) implica la generación de una actividad de cooperación entre un grupo de componentes inter-actuales de un sistema (Mpitsoy & Soynila, 1993). Entonces, ¿qué es un sistema dinámico?

En términos muy simples, es un medio de describir el despliegue temporal de un sistema. Un SD está relacionado con dos conceptos fundamentales: cambio y tiempo. Cada modelo dinámico tiene el tiempo como variable aunque éste es a menudo representado en forma implícita. En términos más formales y en concordancia con lo expresado por Bennett (2008), un modelo dinámico simple es una ecuación diferencial:

$$dx/dt=at \text{ (ecuación 1)}$$

$dx$  = delta de un punto en  $x$   
 $dt$  = delta del tiempo  
 $at$  = aceleración en el tiempo

En un modelo más complejo que tiene retroalimentación y provee un mecanismo de auto-organización, se describe ecuacionalmente como:

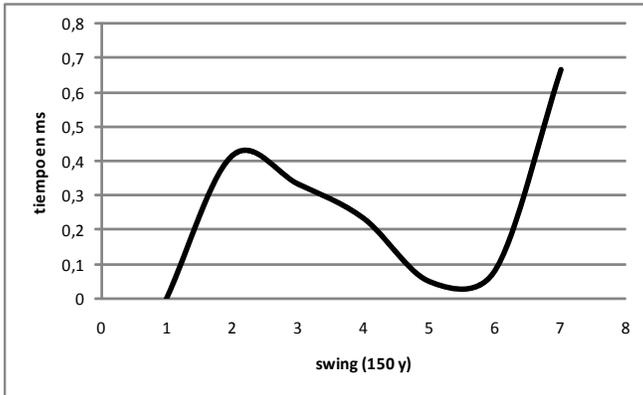
$$dx/dt = ax-bx^2 \text{ (ecuación 2)}$$

$dx$  = delta de un punto en  $x$   
 $dt$  = delta del tiempo  
 $ax$  = aceleración del punto  $x$   
-  $bX$  = es negativo y disminuye el cambio de  $x$  en una tasa de aceleración cuando  $x$  es más grande

A continuación se explican los conceptos y principios más fundamentales que han sido aplicados desde la TSD en el estudio del movimiento humano, siguiendo los derroteros expuestos por Carlota, (2005). a) **El espacio de estados** es el rango abstracto de valores que pueden adquirir las diferentes variables de un sistema complejo y sus combinaciones. Si este espacio de estados es interpretado geoméricamente los movimientos se establecen a lo largo de la superficie de este espacio (ver figura 7). b) **El espacio de fases** será la representación del comportamiento del sistema dinámico en el espacio de estados (Stergiou et al. 2004) que permite analizar totalmente el comportamiento del sistema, en términos de dirección y velocidad en un tiempo infinitesimal (ver figura 8). c) **La relación de fases** es la correspondencia entre los componentes de un sistema dentro del espacio de fases (ver figura 9). En el siguiente ejemplo (Acero, 2009) sobre un análisis temporal (ms) del cabezote de un palo de golf en un *swing* medio (150 yardas), se pueden apreciar estos conceptos. En la figura 7 se presenta el modelo geométrico de los estados posibles del sistema del tiempo del cabezote del palo de golf.

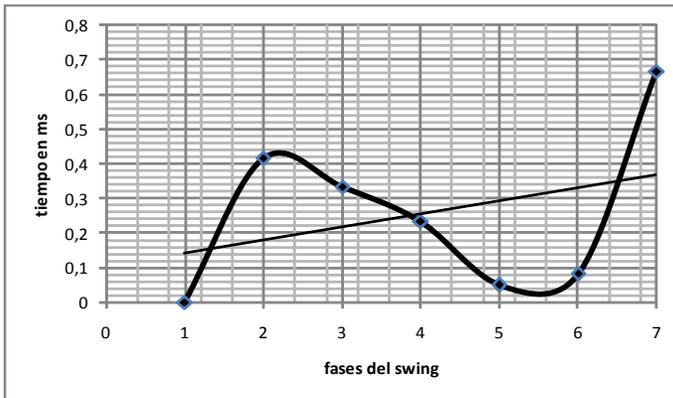


**Figura 7.** Tiempo del *swing* en golf



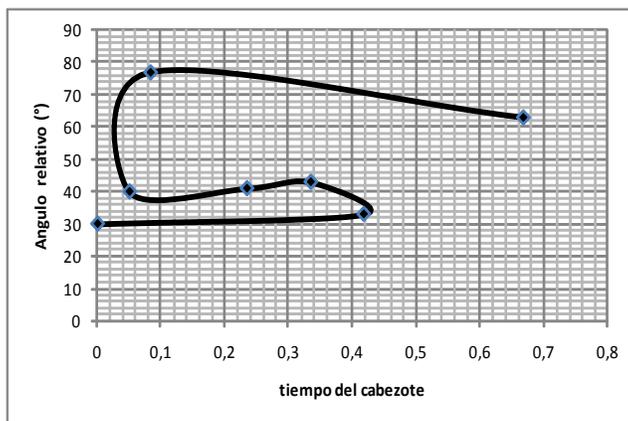
**Figura 8.** El espacio de fases del tiempo del cabezote del palo de golf en un *swing* medio (150 Y). Acero, 2009.

En la figura 8 está representada la serie por fases, de la variable tiempo del cabezote del palo de golf. En la figura 9 la relación del tiempo con las 7 fases del movimiento del *swing* en golf.



**Figura 9.** Relación de fases del tiempo del cabezote del palo de golf en un *swing* medio (150 Y). Acero, 2009.

d) **La trayectoria del sistema** depende de cuantas variables se describen. Si son dos variables, la trayectoria será una curva en dos dimensiones y en un plano. En la figura 10 se observa la relación de tiempo del cabezote del palo de golf y el ángulo relativo a la horizontal de los hombros durante el mismo *swing* (150 y). Las trayectorias describen así, el comportamiento del sistema en un intervalo de tiempo, y la teoría de los sistemas dinámicos intentará predecir estas trayectorias de forma cualitativa. e) **El atractor puntual** es el punto fijo que atrae la trayectoria en los sistemas fluctuantes debido a que el volumen de espacio se hace más pequeño y un lugar es preferencial con respecto a otros más grandes. Este atractor contextualiza los estados a que un sistema tiende y representa un sistema dinámico en equilibrio después de que hayan desaparecido las transiciones o los ajustes (Hayles, 1998). En la figura 11, el atractor puntual es la posición inicial de la bola que está fija y todos los movimientos inician y tienden a buscar ese lugar espacial para ejecutar el movimiento.



**Figura 10.** La relación de tiempo del cabezote del palo de golf y el ángulo relativo a la horizontal de los hombros durante *swing* (150 y) Acero, 2009.



**Figura 11.** El atractor puntual localizado en la posición de la bola (A) y el repelente en B (rodilla) en el *swing* en golf (150 y). Acero- II&SB 2009.

f) **Los repelentes** son puntos o ciclos límite que producen el efecto contrario de los atractores o sea, alejan el sistema de los estados de equilibrio (ver figura 11 B)

Hoy en día, las aplicaciones de esta teoría se extienden a multitud de áreas del conocimiento tales como la biomecánica, ciencias cognitivas, bioingeniería, biofísica, salud y rendimiento deportivo, entre otras. Desde la perspectiva SD, el sistema del movimiento humano es una red altamente compleja (Acero, 2002) de subsistemas co-dependientes (once sistemas de vida) que está compuesto por un gran número de componentes inter-actuantes (músculos, huesos, redes nerviosas, ligamentos, tendones y otros tejidos blandos), un sistema de ambiente espacial (dimensiones, planos, ejes, leyes cinemáticas y cinéticas y direcciones de movimientos) y el tiempo como un factor imperativo (ver tabla 1). En la TSD los patrones de movimiento emergen a través de procesos de auto-organización encontrados en sistemas biológicos y físicos. Desde este punto de vista (TSD) la variabilidad del movimiento humano puede ser vista como un índice de fluctuación necesario para permitir que el sistema de movimiento se adapte a los cambios, de una situación a otra.

Los teóricos como Glazier, Davids & Bartlett (2003) en SD arguyen que el número de grados de libertad del sistema motor es reducido considerablemente por el desarrollo de estructuras coordinativas o ajustes temporales de los complejos musculares y que la complejidad reducida del sistema motor favorece el desarrollo de la coordinación preferida o atractores de carácter

funcional, para apoyar las acciones dirigidas hacia el objetivo. Dentro de cada región del vecindario del atractor, los sistemas dinámicos son muy ordenados y estables, ocasionando patrones de movimientos consistentes para tareas específicas. La variación entre los múltiples atractores y sus regiones límite permite un comportamiento del sistema motor flexible y adaptativo, permitiéndole a cada deportista exploraciones libres de los contextos del rendimiento. En la aplicación directa de la TSD al rendimiento deportivo es importante, dentro de un gesto deportivo, tener un número adecuado de atractores y evolución a nuevos estados, teniendo en cuenta los repelentes. Posiblemente en una ejecución técnica mal realizada, el número de repelentes es grande en comparación con el de los atractores. También es primordial no sólo tener un número suficiente de atractores sino que la variabilidad entre sus regiones sea reducida. La relación de la paradoja expuesta por Handford y otros (1997) donde la variabilidad en el comportamiento motor permite explicar porque los deportistas son capaces de tener una persistencia y un cambio en el resultado durante la ejecución. De esta manera la variabilidad apropia procesos de exploración de las técnicas y el ambiente para adquirir soluciones motoras estables.

La llegada de la TSD a las ciencias del movimiento, ha ayudado a los biomecánicos deportivos a entender mejor el papel de la variabilidad dentro de los sistemas del movimiento humano (Bartlett *et al.* 2007). Los siguientes son algunos de los ejemplos investigados y reportados en la literatura biomecánica, para detectar la presencia de la variabilidad en gestos propios de la actividad deportiva. Best y otros (1995) estudiaron el vuelo de la jabalina y cómo éste fue afectado por varios parámetros de ejecución del lanzador, teniendo en cuenta una predicción computarizada de la variabilidad (**variabilidad en predicción computacional**). Para ejemplarizar estos hallazgos ver la figura 12 donde se indica que la figura de la derecha es un mapa de contornos de dos de los más importantes parámetros de liberación de la jabalina: a) el ángulo de liberación de ataque de la jabalina (a) en la figura de la izquierda o sea el ángulo desde la dirección de vuelo en el momento de la liberación hasta su eje longitudinal y b) el ángulo conformado por la línea horizontal a la dirección de la jabalina y la misma línea de dirección de movimiento resultante (b en la figura de la izquierda). Las líneas del contorno en la figura de la izquierda son líneas de igual distancia lanzada. El rango se incrementa hacia la cima de la altura. El punto verde en la punta de la altura es la distancia máxima a la que este lanzador puede llegar según este modelo. Este punto puede operar como un atractor hacia el centro del punto verde donde se manifiestan una

COMPONENTES	INVENTARIO
1. Células	Trillones
2. Sistemas de vida	11
3. Segmentos	SC-4 SC-14 SC-16 SC-18
4. Músculos	+640 ( 35-45%MC)
5. Huesos	206 ( 148 móviles 12-15%MC)
6. Dimensiones de movimiento	2 ( X, Y) 3 ( X, Y, Z) 4 (X, Y, Z, t)
7. Planos Básicos	3 ( transversal, sagital y frontal )
8. Ejes de rotación	3 ( sagital, lateral , longitudinal)
9. Articulaciones	+200
10. Direcciones espaciales de movimiento	20
11. Tipos de movimiento	28
12. Grados de libertad (Movilidad)	244 aprox.
13. Cadenas de movimiento	2- 4
14. Leyes cinemáticas	2 primarias – 4 derivadas
14. Leyes cinéticas	3 primarias – (7-15) derivadas

**Tabla 1.** Componentes finitos básicos en el movimiento humano (Acero, 2002)

combinación única de parámetros de liberación, dando como resultado un lanzamiento máximo. El mapa de contornos 2D indica que cualquier par de parámetros sobre una línea de rango constante produce un lanzamiento sub-óptimo así sea en una diferencia de 20 centímetros del punto verde.

De acuerdo, con estos investigadores los resultados demuestran que las combinaciones infinitas de los parámetros de liberación de la jabalina, pueden estar en el mismo rango sub-óptimo y haber realizado diferentes patrones de movimientos. Lo anterior sustenta que podremos medir la variabilidad en movimientos sub-óptimos. Morris, Bartlett, & Fowler (2000) realizaron un estudio a tres medallistas del mundo en lanzamiento de jabalina, para conocer cuáles eran los patrones de movimiento del brazo y sus contribuciones a la velocidad de liberación. Los resultados establecieron que uno de ellos utilizó rotación medial del húmero, el otro la extensión del codo y el último una combinación de extensión del hombro y flexión a la horizontal. Estas diferencias indican muy claramente, que la existencia de un modelo de patrón de lanzamiento en términos de la utilización del brazo, no está sustentada ni puede ser copiada por otros lanzadores.

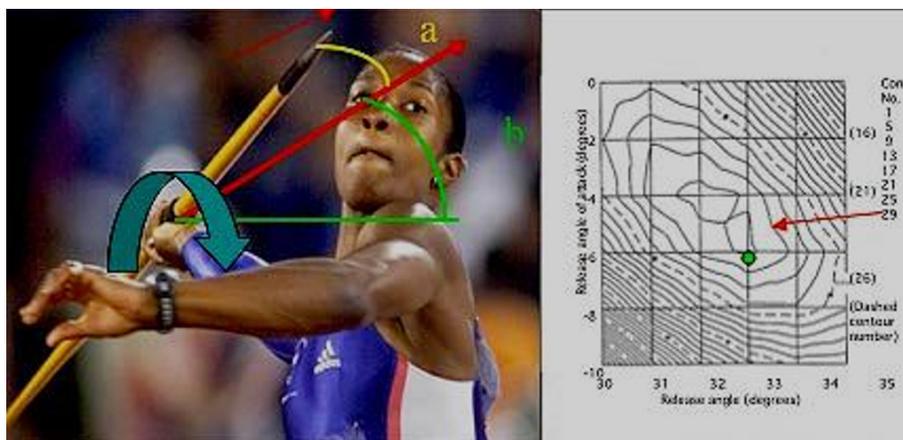


Figura 12. Representación de la predicción computarizada de la variabilidad en el vuelo y distancia de la jabalina. Traducido, adaptado y tomado de Best *et al.* 1995.

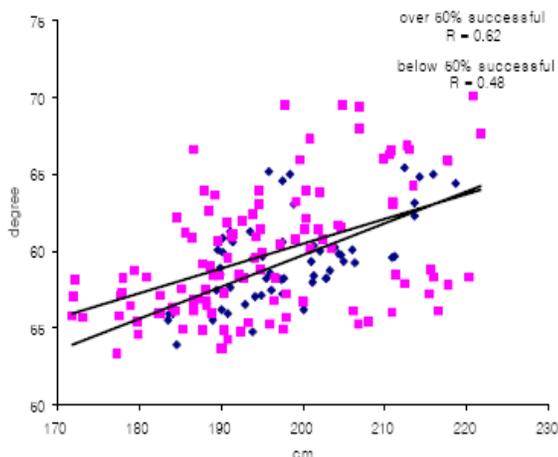
Wheat y otros (2002) compararon la variabilidad en coordinación de un participante en la carrera, cuantificando dos técnicas previamente utilizadas en la fase de apoyo (**variabilidad intraindividual**). Los ángulos de flexo-extensión a nivel de cadera y rodilla fueron calculados e interpolados a 100 puntos de datos, por diez intentos a 3.8 m/s. La desviación estándar en la fase relativa y continua y el coeficiente de correspondencia de la codificación del vector fue calculada en cada punto. Las dos técnicas dieron como resultado

indicaciones similares en el apoyo temprano pero fueron contradictorias hacia el final del apoyo. Esta investigación dejó en claro que existe variabilidad intra-individuo y que la mayor variabilidad al final del apoyo merece un estudio más profundo a nivel de TSD.

Rojas y otros (1998) cuantificaron las diferencias en la ejecución del lanzamiento en salto de jugadores profesionales de baloncesto, analizando la variabilidad intra- e inter-sujetos en variables de producto, que determinan la consecuencia final de lo que ha ocurrido durante el gesto y corresponden con el ángulo, la velocidad y la altura de salida del balón y las variables de proceso; consideradas como las causas más significativas que determinan la eficacia del gesto durante su ejecución tales como el tiempo y las posiciones espaciales. El análisis de la consistencia temporal del gesto, reveló que los sujetos lanzan con similares características temporales, en las fases iniciales del gesto la variabilidad es mayor, ajustándose en las fases finales del mismo, donde la variabilidad es mínima. Los resultados obtenidos, indicaron que la inter-variabilidad es mayor que la intra-variabilidad, en todas las variables cinemáticas analizadas.

Miller (2002), estudió la variabilidad de los lanzamientos en baloncesto y reportó que los lanzadores de baloncesto habilidosos son incapaces de generar parámetros idénticos en la fase de liberación del balón y en la condición de inter-intento (**variabilidad Inter-individual**). Sin embargo, los lanzamientos libres imprecisos fueron caracterizados por una variabilidad relativamente mayor en la velocidad de liberación del balón y una variabilidad absoluta mayor en la velocidad lineal en los puntos terminales de cada segmento en la liberación. La proporción más baja de éxitos de los lanzamientos de rango largo es una función del bajo margen de error en la velocidad de liberación de la bola y de la gran variabilidad absoluta asociada con la generación de un gran impulso. Woo y otros (2008) investigaron sobre los efectos de la variabilidad en el lanzamiento de tiro libre, analizando las variables de ángulo, velocidad y altura de proyección, con 29 participantes cada uno de los cuales lanzó seis veces (total de lanzamientos estudiados = 174). El coeficiente de variación (CV) fue calculado para representar la variabilidad relativa. La desviación estándar fue representada como un porcentaje de los ángulos, velocidades y alturas de proyección promedio de cada individuo. Los resultados indicaron que a más bajo CV se sustenta una mejor dependencia de un mejor rendimiento y que la altura y el ángulo de proyección tienen una alta correlación (ver figura 13).

Anderson y otros (2008) investigaron el movimiento y el resultado de la variabilidad asociada con el levantamiento de pesos (envión) en tres niveles de 12 levantadores olímpicos: novatos (5) experimentados (5) y elite (2) (**variabilidad Inter-individual**). Cada levantador realizó 12 intentos cada uno al 80% de 1RM. La variabilidad de la fase relativa, los ángulos de cadera y rodilla y la fuerza de reacción terrestre fueron calculados para cada sujeto. La variabilidad en las mediciones del movimiento evaluado, fue calculada a través del método de la curva de promedios. La desviación estándar fue calculada para los 12 intentos en cada punto y la suma de valores de la desviación estándar generó el resultado de la variabilidad para cada levantamiento en cada individuo. La variabilidad en el resultado fue calculada utilizando el método RSMD midiendo el desplazamiento antero-posterior del centroide de la barra con referencia a la línea vertical absoluta originada en el punto 0 en x del centroide del disco (el mismo centroide de la barra) en su posición inicial. En esta investigación no se encontraron diferencias significativas entre los tres grupos para el resultado de la variabilidad entre las variables de coordinación y cinemáticas, sin embargo, algunas diferencias fueron reportadas (Fx) en la variabilidad cinética. En resumen, el punto tradicional de que los patrones de movimiento invariantes tales como el recorrido en el plano sagital de la barra, aplican para los deportistas elite, quedó refutado dado que no existió diferencia de esta variabilidad en los grupos.



**Figura 13.** Relación entre ángulo y altura proyectada en los tiros libres en baloncesto. Tomado y adaptado de Woo et al. 2008.

Irwin, Kerwin y Robins (2008) investigaron cómo las mujeres gimnastas controlaban la caída y el aterrizaje de los movimientos de salida en la barra de equilibrio, ejecutando mortales adelante y hacia atrás. Una mujer gimnasta fue analizada ejecutando diez movimientos de cada tipo (total 20) (**variabilidad intra-individual e inter intento**). Se determinaron en este estudio los perfiles de acoplamiento de las articulaciones cadera-rodilla y tobillo-rodilla y los coeficientes de variación. La variabilidad en el acoplamiento de ambas fases (caída y balance) en las salidas con mortal atrás, fue el doble de los mortales hacia adelante (ver tabla 2). La variabilidad de las salidas en mortal adelante fue similar en el acoplamiento rodilla-tobillo que puede ser explicada por la retroalimentación visual reducida y por consiguiente por una mayor restricción en los acoplamientos articulares. Estos hallazgos sustentan la idea de que la variabilidad en el movimiento es dependiente de los restrictores en acción.

CV (%)	CAÍDA CR	CAÍDA RT	BALANCE CR	BALANCE
ADELANTE	8	17	5	11
ATRÁS	19	17	12	12

**Tabla 2.** Coeficientes de variabilidad de Cadera-Rodilla (CR) y Rodilla-Tobillo (RT) en las fases de caída y de balance de las salidas con mortal adelante y atrás. Traducido, tomado y adaptado de Irwin, Kerwin & Robins, 2008.

Glazier & David (2007) han documentado cualitativamente que el *swing* perfecto en el golf no es del todo una realidad, desde el punto de vista de la variabilidad en la técnica utilizada en cada golfista y entre golfistas (**variabilidad en los restrictores**). En un alto porcentaje de la literatura reportada en el campo de golf, se muestra la existencia de un modelo ideal que trasciende la enseñanza del mismo movimiento. Los autores sugieren que en lugar de ver las desviaciones de este patrón del movimiento óptimo del *swing*, como indeseables o el ruido del sistema o como una debilidad potencial de la técnica del golfista, la variabilidad del movimiento puede ser vista en una forma más positiva de tal manera que ésta refleje la confluencia de restrictores propios del jugador, ambientales y de habilidad, actuando sobre la ejecución de este gesto deportivo en una forma más positiva.

**Los restrictores del jugador** son aquellos que son internos en el sistema del movimiento humano y pueden ser subdivididos en estructurales (morfología

2D y 3D) y funcionales (fisiológicos y psicológicos). **Los restrictores ambientales** son los externos al sistema del movimiento humano y pertenecen al contexto temporal y espacial en el campo de las fuerzas externas que actúan sobre el movimiento (luz, temperatura, acústica, fuerza gravitacional y de reacción, superficies, etc.). Los restrictores de la habilidad son aquellos específicos al gesto deportivo que incluyen entre otros las metas, el reglamento, los implementos y herramientas, los campos deportivos. Todos estos hacen de cada movimiento una situación especial en tiempo, espacio y organismo y por consiguiente, un *swing* perfecto o ideal no existe, dada la consideración de que la confluencia de restrictores que afectan el rendimiento o la eficiencia es específica al individuo y fluctúa continuamente sobre el tiempo.

### **Funciones de la variabilidad en la técnica deportiva**

Los anteriores estudios tomados como ejemplos reales (entre otros) de la investigación biomecánica, explican como la variabilidad y la aplicación de nuevos paradigmas reportados están influenciando actualmente la forma como se concibe el aporte de la biomecánica al estudio de la técnica deportiva y por ende a los métodos de entrenamiento y control deportivo. La variabilidad ha sido reportada en lanzamientos, baloncesto, carrera, velocidad, gimnasia, tenis de mesa, tenis de campo, hockey sobre hierba, cricket, golf, fútbol, levantamiento olímpico, movimientos cíclicos y acíclicos, procedimientos terapéuticos y de rehabilitación; en competiciones reales y en condiciones de laboratorio con una alta validez investigativa. Los siguientes pueden ser los principales aportes de la variabilidad al rendimiento en la técnica deportiva y a su proceso de control en el entrenamiento:

Una técnica perfecta no existe. La existencia de la variabilidad en el gesto deportivo nos está indicando que un sólo tamaño de zapato no puede calzar a todos.

Cada deportista, teniendo en cuenta su individualidad, hace que sus movimientos dependan de la adaptación funcional a nuevos y diferentes esquemas de restrictores que se presentan en el momento de la ejecución de un mismo patrón de movimiento, que emergen de un comportamiento cooperativo de múltiples grados de libertad.

Entre más riqueza en el repertorio del gesto deportivo encuentre el deportista, mayores serán las posibilidades de éxito y adaptación.

El antiguo axioma de que a mayor volumen de entrenamiento de la técnica deportiva, menor es la variabilidad presentada y por lo tanto mejor es el rendimiento deportivo, queda refutada por la aplicación de la teoría de los sistemas dinámicos (TSD) en la que el deportista es visto como un ser que se adapta a nuevas situaciones y construye su resultado a través del conocimiento de los atractores y repelentes del sistema dinámico de la técnica.

Para los entrenadores, preparadores físicos y deportólogos la meta es optimizar el gesto deportivo de cada individuo conociendo sus características y sus comportamientos seriales en el tiempo y en el espacio.

El estudio de la variabilidad en el gesto deportivo facilita cambios reales en la coordinación individual de cada deportista y adapta funcionalmente los diferentes cambios ambientales.

El estudio de la variabilidad puede ser de carácter intra-individuo, inter-individuo, inter-intento, inter-técnicas y por restrictores del movimiento.

Representa un nuevo paradigma que merece toda la atención futura en investigaciones de rendimiento deportivo y de los biomecanismos de lesión.

### **Metodología biomecánica tradicional para el análisis e intervención de la técnica deportiva**

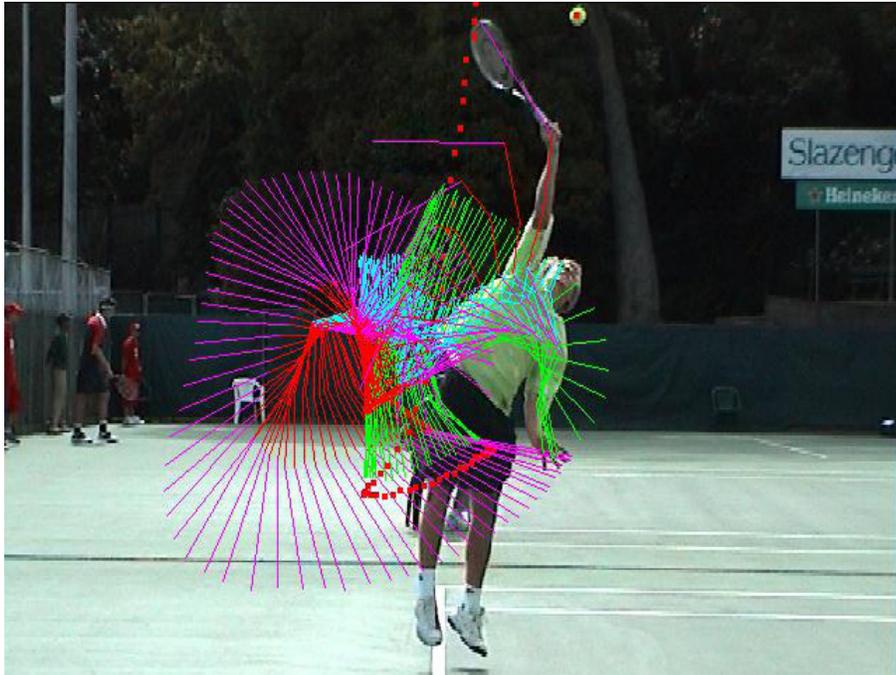
El análisis de la técnica en biomecánica deportiva ha tenido tradicionalmente los siguientes pasos: a) observación directa o indirecta de los movimientos ejecutados de los deportistas, b) comparación de sus técnicas de movimiento con las de los deportistas “superiores”, tomadas como el modelo a mejorar y a optimizar, c) evaluación y diagnóstico de los movimientos de los deportistas, d) identificación de los errores técnicos y factores limitantes y e) enseñanza al deportista de cómo modificar su técnica a través de un entrenamiento apropiado. Lo más difícil en esta elipse de optimización es el diagnóstico del movimiento y la identificación de sus errores y factores limitantes (ver figura 14).



**Figura 14.** Elipse de la metodología biomecánica tradicional para analizar e intervenir el gesto deportivo

En los procesos investigativos, tres metodologías tradicionales han sido utilizadas para este análisis de la técnica deportiva: cualitativa, cuantitativa y predictiva.

La **metodología de la cualificación biomecánica** se caracteriza por la observación, la evaluación y el diagnóstico (ver figura 15). La elipse de optimización, previamente mencionada en las técnicas deportivas, es un ejemplo de la cualificación del movimiento. El otro acercamiento al análisis cualitativo es el modelo determinístico de rendimiento propuesto por Hay & Reid en 1982 que se basa en un modelo teórico y en las relaciones del resultado y los factores limitantes, los cuales son determinados por los análisis estadísticos. Este modelo de diagramas en bloques (ver figura 2) ha sido utilizado para identificar factores de rendimiento en varias técnicas deportivas, sin embargo las dificultades de este acercamiento son que no clarifica los patrones de movimiento deseables en las técnicas deportivas y es también muy difícil de aplicar a los deportes de juegos de pelota.



**Figura 15.** Análisis cualitativo de fases de movimiento en el saque de tenis – II&SB 2009

**La técnica de análisis cuantitativo** es la recolección de datos biomecánicos para identificar variables claves en la técnica que afectan el rendimiento. Un análisis cuantitativo es ideal en el diagnóstico y la evaluación de algunas partes de la técnica deportiva, pero este método emplea mucho tiempo en el análisis y podría resultar inoficioso al identificar las características del patrón de movimiento corporal general en una determinada técnica (ver figura 16).



**Figura 16.** Análisis cuantitativo de variables cinemáticas seleccionadas en la fase 3 (*backswing to top*) del *swing* en golf (Acero- II&SB, 2009)

**La técnica de análisis predictivo** está basada en el modelado y las simulaciones técnicas computarizadas que están siendo desarrolladas y tiene gran potencial para la investigación y predicción de los movimientos ideales de cada deportista. En el uso de este método predictivo se han encontrado dificultades para determinar las funciones objetivas y los criterios de decisión y estimar los movimientos ideales. Un efecto integrador de las tres metodologías mencionadas anteriormente podría resultar en una muy efectiva en los procesos de entrenamiento y de la enseñanza de la técnica deportiva, sin embargo, en la literatura mundial esta nueva metodología integradora no ha sido desarrollada plenamente.

En **la práctica tradicional** los procesos del entrenamiento y control de la técnica y de la enseñanza del gesto deportivo se hacen básicamente por la imitación de una técnica hecha por deportistas superiores o suficientemente adiestrados. Esta técnica ideal opera como una plantilla del modelo técnico de rendimiento. Los entrenadores adoptan este modelo basados en fotografías o figuras secuenciales de los deportistas con mayor rendimiento (ver figura 17). Este acercamiento tiene algunas limitaciones dada la variabilidad en la técnica modelo de un deportista que tiene sus propias características antropométricas, musculares, óseas, articulares, respiratorias, y de respuestas fisiológicas y psicológicas (para enumerar sólo algunas), entonces probablemente no hay fundamento para determinar la técnica o modelo ideal en esta forma. No obstante, a pesar de estas limitaciones, se puede abordar otra metodología si investigamos y descubrimos patrones de movimientos más apropiados,

que en muchos casos no son los llamados “ideales” sino más bien, el patrón estándar o promedio en uso práctico.



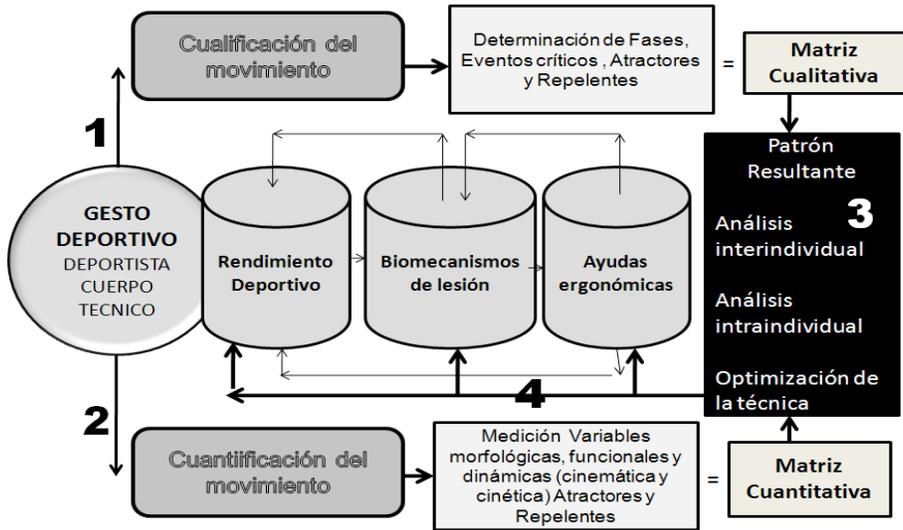
**Figura 17.** Modelo tradicional de la enseñanza, entrenamiento y control de la técnica del gesto deportivo. Acero- II&SB, 2009.

Ya está demostrado que existe variabilidad en cualquier secuencia del movimiento humano (Stergiou et. al. 2004; Glazier & David, 200; Irwin, Kerwin & Robins, 2008; Hamill et al. 1999; Field-Fote & Tepavac, 2002; Ferber et al. 2005; Anderson et al. 2008; Woo et al. 2008; Rojas et. Al; Wheat et. al. 2002; Morris, Bartlett & Fowler 2000; Best et al. 1995; Bartlett et al. 2007; Glazier, Davids & Bartlett, 2003; Carlota, 2005; Kudo y Ohtsuki, 2008; Harbourne & Stergiou, 2003; Slifkin & Newell, 2000; Stergiou et al, 2006; Newell & Corcos, 1993). Una variabilidad reducida o la repetitividad consistente de un movimiento es un indicador de un deportista técnico. Esta variabilidad del movimiento, descrita en la literatura previamente expuesta, es de carácter intra e inter individual. Probablemente la de mayor uso en el análisis de la técnica deportiva, particularmente en la evaluación y el diagnóstico de los patrones técnicos deportivos, sea la de carácter inter-individual expresada como el arribo a obtener el concepto de **movimientos críticos** (movimientos de menor variabilidad = **atractores**) hechos por varios deportistas experimentados para ejecutar movimientos segmentales más similares (similar = menor variabilidad). En contraste, una mayor

variabilidad de movimiento o **movimientos diferenciales (repelentes)** indica que existe una diferenciación sustancial en los patrones de movimiento entre los deportistas, las cuales pueden ser atribuidas a las características de los deportistas estudiados y que no pueden ser generalizadas. Por consiguiente, estudiar la variabilidad de movimiento inter- e intra -individuos puede ser el camino para el diagnóstico, evaluación y control de las técnicas deportivas.

### Propuesta del modelo biomecánico (BIOMIN-VAR) utilizando la variabilidad en la interpretación del gesto deportivo

Ya han sido expuestos los métodos tradicionales y de tendencia moderna aplicando la variabilidad en el estudio del gesto deportivo, contribuyendo de esta manera con una clarificación sobre la evaluación de la técnica y su respectivo control del entrenamiento.



**Figura 18.** Modelo biomecánico (BIOMIN-VAR) de edición, análisis e intervención en el gesto deportivo y en el control de su entrenamiento basado en estudios de variabilidad. Acero, 2009.

En la figura 18 se establece el mapa conceptual de una nueva propuesta que integra varios conceptos modernos en la visión de buscar nuevos caminos o rutas en la construcción de paradigmas que realmente analicen el gesto

deportivo con más profundidad y objetividad. Para el BIOMIN-VAR todo parte del eje central del objeto de estudio de la biomecánica deportiva que es el gesto deportivo o la forma como una técnica es ejecutada por el deportista. El gesto deportivo es continua y directamente enseñado, monitoreado y ejecutado por el deportista bajo la dirección de un cuerpo técnico (entrenador director, preparador físico y entrenadores especializados). Éste es el principio y el fin de todo análisis biomecánico que sirve como apoyo científico y tecnológico a las decisiones del cuerpo técnico y eventualmente a otro tipo de profesionales como médicos deportólogos, fisioterapeutas, psicólogos y fisiólogos.

La función de la biomecánica deportiva en los procesos de evaluación y control del entrenamiento de la técnica deportiva es entonces, en este modelo BIOMIN-VAR, tripartita. Fundamentalmente, a través de esta inter-disciplina científica, se analiza el gesto deportivo con metodologías y tecnologías muy modernas con miras a obtener una optimización de la técnica empleada y por ende, buscar desarrollos positivos en el **rendimiento deportivo**. Una segunda posibilidad de apoyo se encuentra en los procesos de prevención y rehabilitación de lesiones deportivas. El papel de la biomecánica en el entendimiento de **la prevención y el tratamiento de la lesión deportiva** es fundamental, dado que a través de esta interdisciplina científica se puede explicar cómo sucedió la lesión, denominado en el argot biomecánico como el biomecanismo causativo y cuáles pueden ser las sugerencias para reducir la frecuencia, mejorar los tratamientos y monitorear los cambios de las intervenciones. En este sentido la biomecánica deportiva explica y sugiere pero no sana directamente, porque el modelo biomecánico entiende muy bien que los profesionales de la salud son los éticamente llamados a realizar la función directa de los procesos de rehabilitación. Una tercera opción de parte de la biomecánica deportiva, es crear **ayudas ergonómicas y tecnológicas** que contribuyan a mejorar el rendimiento deportivo o los estados de salud del deportista.

La primera fase del modelo BIOMIN-VAR (1) está relacionada con **el análisis cualitativo** del gesto deportivo. El análisis cualitativo es la observación sistemática y el juzgamiento introspectivo de la cualidad del movimiento humano con el propósito de proveer la intervención más apropiada para mejorar el rendimiento (Knudson & Morrinson, 1996). Debido a que los términos, observación, intervención y rendimiento son utilizados en esta definición, es necesario definirlos también. La observación, es el proceso de obtener, organizar y dar significado a la información de los sentidos en

el rendimiento humano motor. La intervención es la administración de la retroalimentación, las correcciones u otros cambios en el ambiente para mejorar el rendimiento. El rendimiento, es la efectividad en términos cortos o largos del movimiento de una persona para alcanzar una meta. El análisis cualitativo es por naturaleza un juzgamiento subjetivo, pero esto no significa que sea desorganizado, vago y arbitrario. Al contrario éste necesita de una información extensa desde diferentes disciplinas, una planeación y pasos sistemáticos para ser más efectivo.

Una de las estrategias de escaneo del movimiento es observar puntos críticos dentro de un ordenamiento por **fases de movimiento y eventos críticos**. Una fase de movimiento es el consecutivo en el tiempo y el espacio, de una serie de posturas dinámicas que tienen su propia caracterización entre sí pero que pertenecen al mismo movimiento. La cronología del movimiento es un buen indicador para la formación conceptual de estas fases. Generalmente las primeras hipótesis son elaboradas con base en la observación directa, el concepto de expertos, la literatura científica, la opinión de los deportistas y la experiencia del entrenamiento de la técnica de los analistas del gesto deportivo. Los eventos críticos son considerados dentro de las fases de movimiento, como las acciones motoras instantáneas que son muy significativas para los aspectos puntuales de análisis de movimiento y que representan momentos cruciales dentro de la secuencia de las posturas dinámicas. La determinación de estos eventos críticos (EC) tampoco tiene una regla fija, generalmente tienen un rango entre 2-4 EC dentro de todas las fases de movimiento. Liberación de objetos, contactos, alturas máximas o mínimas, despegues, rangos de máxima o mínima movilidad, fuerzas máximas y mínimas, son ejemplos para puntualizar los EC.

El análisis cualitativo debe entonces empezar a establecer hipótesis iniciales que sirvan de sustento a la variabilidad del gesto aplicando la TSD. La obtención de posibles **atractores** y **repelentes** es un ejercicio objetivo importante en esta fase. El atractor incluirá los estados del sistema hacia los que tiende, el límite, y representará el comportamiento de un sistema en equilibrio dinámico, después de que hayan desaparecido las transiciones. Un punto central es un atractor puntual en un espacio de dos dimensiones. Hay una zona circular en la que cualquier trayectoria que se inicie dentro de ella finalizará en el punto, éste, el atractor puntual. También puede haber puntos o ciclos límite que produzcan el efecto contrario de los atractores, y serán denominados **repelentes**. Un repelente es un punto o varios puntos

del cuerpo humano que a la menor perturbación produce desequilibrio e inestabilidad y por lo tanto afecta la efectividad y eficiencia del movimiento.

El resultado final de esta fase uno es la consolidación de una matriz cualitativa que interrelacione las fases del movimiento objeto de análisis (F), sus eventos críticos (EC) y la posibilidad de enunciar hipótesis iniciales que proporcione la detección de atractores (A) y repelentes (R) encontrados por observación directa o indirecta en ese gesto deportivo. En la figura 19 se puede observar como ejemplo, una matriz gráfica sobre el *swing* en golf donde existen siete fases detectadas en el tiempo y el espacio, dos eventos críticos dentro de esas fases, dos atractores posibles y dos repelentes que alterarían la estabilidad del sistema dinámico de este gesto deportivo.



**Figura 19.** Matriz Cualitativa de Carácter Grafica de un Swing en Golf compuesta por fases de movimiento, eventos críticos, atractores y repelentes posibles. Modelo BIOMIN-VAR. Acero, 2009.

La segunda fase del modelo BIOMIN-VAR (2) (ver figura 18) es la medición y análisis cuantificado del movimiento deportivo. Es el proceso de asignar números y magnitudes a las diferentes variables cinemáticas y cinéticas del gesto deportivo objeto del análisis. La cuantificación del movimiento deportivo debe resolver las dudas o hipótesis establecidas en el análisis cualitativo previo y debe ser de carácter selectivo, pues pueden aparecer muchas variables que no son muy significantes para el análisis ni para el gesto deportivo. El modelo de Análisis Biomecánico Integral (*BIOMIN según Acero 2006*) en deportistas de rendimiento y talentos especiales, se sustenta

en (1) dos acercamientos científicos que integralmente se deben interpretar: el deportista morfológico (DM) y el deportista dinámico (DD), cuyos conceptos y metodologías se integran e interrelacionan para determinar el tipo de rendimiento en este deporte.

Dentro del DM, existen unas variables antropométricas que según *Acero (2002)*, cuando esas medidas toman un significado de proyección y análisis de los factores cinemáticos y cinéticos del movimiento deportivo, son del dominio exclusivo de la antropometría biomecánica predictiva (ABP). Cada segmento tiene una masa corporal determinada que afecta el movimiento (*Zatsiorsky et al, 1990; De leva, 1996*). Dentro de la funcionalidad del DM, otro conjunto de variables se relaciona con la posición en los tres planos del centro de masa corporal total (*Acero, 2002*). La base sustentación y el tipo de pie según la impresión plantar, son factores importantes en el manejo y equilibrio de las fuerzas (*Acero, 2007*). Las desviaciones y alineamientos posturales operan como una descripción estructural del cuerpo humano.

La cuantificación del movimiento deportivo en el deportista dinámico (DD) según *Gowitzke & Milner (1981)*, *Zatsiorsky, V. (1994)*, *Grabiner, M. (1993)* y *Nelson, R. (1993)*, se establece por la diferencia entre describir un movimiento mismo e identificar las fuerzas que producen y controlan el movimiento. La descripción del movimiento sin consideración de las fuerzas generadoras es conocida como **la cinemática**, mientras que su valoración con respecto a las fuerzas relacionadas se denomina **cinética**. Cuando el cuerpo se mueve desde el ángulo de *la cinemática*, cinco variables primarias son tenidas en cuenta: a) las características temporales, b) la posición o localización, c) el desplazamiento o qué movimiento ha ocurrido, d) la velocidad o qué tan rápido un cuerpo se mueve y e) la aceleración o cómo la velocidad del cuerpo ha cambiado. La valoración de la cinemática del cuerpo humano puede ser vista en dos dimensiones (cinemática planar: x, y) o tridimensionalmente (cinemática espacial: x, y, z). La descripción del movimiento es un primer paso muy importante al concebir el movimiento humano, pero está limitada a describir su geometría espacial sin investigar las fuerzas que generan estos resultados. Debido a que la fuerza es el agente causal en el movimiento, *la cinética* es un área importante de consideración. Conceptos tales como: masa e inercia, fuerza, centro de masa y centro de gravedad, presión, torques, momentos de masa inercial, leyes del movimiento de Newton, equilibrio, trabajo y potencia, energía, colisiones, fricciones y fluidos, son elementos fundamentales en el entendimiento del movimiento humano.

Como resultado final de este análisis cuantitativo o la fase dos del modelo BIOMIN-VAR, se obtiene una **matriz cuantitativa** que reúne todas las variables biomecánicas medidas y seleccionadas por fase de movimiento. En el siguiente ejemplo gráfico (Figura 20) se observa como las variables del deportista dinámico son distribuidas en cada fase. Para el caso de este ejemplo gráfico de ilustración del gesto técnico, presentado anteriormente en el análisis cualitativo en el *swing* en golf, se observan 35 variables de carácter cinemático distribuidas en las siete fases descritas y agrupadas bajo temporalidad, distancias lineales, ángulos relativos e inter-segmentales y velocidades lineales.



**Figura 20.** Matriz cuantitativa de carácter gráfica de un swing en golf compuesta por siete fases de movimiento y 35 variables cinemáticas. Modelo BIOMIN-VAR. Acero, 2009.

La tercera fase del modelo BIOMIN-VAR (3) (ver figura 18) establece los procesos estadísticos de determinar el **patrón resultante** de una técnica deportiva, siguiendo los principios de variabilidad y los respectivos

coeficientes de variación de las variables seleccionadas. Este patrón no es el “modelo ideal”, ni el gesto deportivo “perfecto” porque según esta TSD este tipo de patrón, sencillamente no existe. Éste resulta porque es un producto de reunir y estandarizar los movimientos respectivos en la secuencia del tiempo y en la traslación 2D y 3D espacial. Siguiendo los resultados obtenidos por Ae, Muraki, Koyama, y Fujii (2008) en su investigación, los siguientes tres pasos básicos son necesarios para establecer el patrón resultante o “patrón estandarizado” en este modelo BIOMIN-VAR:

Recolectar coordenadas 2D y 3D de los puntos finales segmentales de los deportistas superiores o altamente adiestrados en condiciones de laboratorio o de competición entre 11 a 15 intentos válidos (video grafía computarizada manual o automática). Se deben descartar aquellos intentos muy alejados de la realidad técnica del deportista por desconcentración, influencia de algún factor externo o distractor que afecte notablemente la técnica y produzca, de esta manera, un sesgo significativo.

Normalizar los datos de las coordenadas relativas a un punto de referencia antropométrico tal como el centro de masa corporal, supra-esternal, acromial, cervical siete, etc. O por la estatura corporal o tiempo empleado durante cada fase del movimiento, etc.

Promediar los datos de las coordenadas, normalizados.

Las siguientes ecuaciones pueden ser utilizadas para cumplir con los tres pasos anteriores

$$r_i = R_i - R_{pr} \text{ (ecuación 3)}$$

$$nr_i = r_i/E \text{ (ecuación 4)}$$

$$\bar{r}_i = \frac{\sum_{j=1}^n nr_{i,j}}{n} \quad \bar{r}_i = \frac{\sum_{j=1}^n nr_{i,j}}{n} \text{ (ecuación 5)}$$

$$\bar{R}_{pr} = \frac{\sum_{j=1}^n R_{pr,j}}{n} \quad \bar{R}_{pr} = \frac{\sum_{j=1}^n R_{pr,j}}{n} \text{ (ecuación 6)}$$

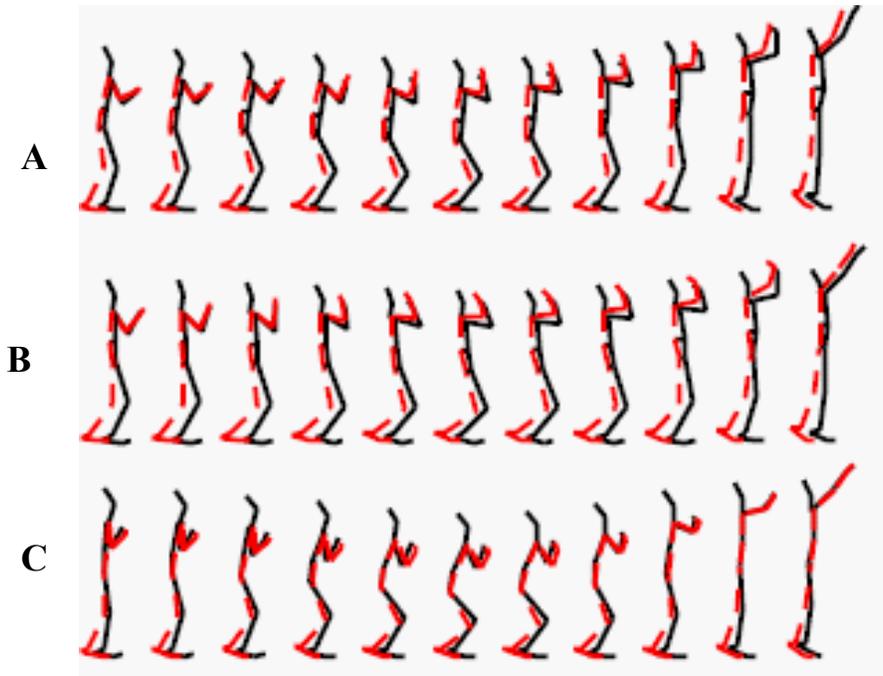
$$\bar{R}_i = \bar{r}_i + \bar{R}_{pr} \quad \bar{R}_i = \bar{r}_i + \bar{R}_{pr} \text{ (ecuación 7)}$$

Donde:

$R_i$  = vector de la coordenada de punto  $i$  normalizada a la fase del tiempo  
 $pr$  = punto de referencia

$n\mathbf{r}_i$  = vector normalizado a la estatura del individuo( $E$ )  
 $\mathbf{R}_{pr}\mathbf{R}_{pr}$  = vector promedio del punto de referencia  
 $\mathbf{r}_i\mathbf{r}_i$  = promedio del vector de la coordenada normalizada  
 $E$  = estatura de la persona  
 $i$  = número del punto  
 $j$  = sujeto  
 $n$  = número de intentos

En la figura 21 se presenta un ejemplo de un patrón de movimiento resultante en el lanzamiento de tiro libre en baloncesto, como resultado de este proceso y basado en la investigación realizada por Murata, Ae y Uchiyama (2008).



**Figura 21.** Kinegramas de los movimientos en el lanzamiento de tiro libre en baloncesto. (A) Patrón resultante, (B) patrón de excelencia y (C) patrón de un grupo

La variabilidad del movimiento ha sido representada por el coeficiente de variación (CV) en varios acercamientos científicos (Ferrario et al, 1995; Hatze, 1995; Ae, Muraki, Koyama, y Fujii, 2008). Para este modelo BIOMINVAR en cada variable en condiciones intra-individuo y / o inter-individual se establece la siguiente didáctica estadística:

- Cálculo del promedio ( $\bar{X}$ )
- Desviación estándar (DE)
- Calcular el error estándar  
( $EE\% = ((DE/\sqrt{N}))/\bar{X} * 100$  Ecuación )
- Calcular el coeficiente de variación ( $CV\% = (DE/\bar{X})*100$  Ecuación
- Calcular el coeficiente de variación biológico ( $CVB\% = CV\% - EE\%$ )

En la tabla 3 se presentan, como un ejemplo de este derrotero, los resultados parciales obtenidos por Bradshaw y otros (2006) en un estudio sobre el coeficiente de variabilidad normal y biológica en la fase de salida o liberación desde un partidador en carreras de velocidad.

Fase de la salida Del bloque	Angulo (°)		
	DE	CV%	CVB%
Tronco	6.03	10.37	5.19
Cadera lider	6.82	4.65	2.39
Rodilla lider	5.34	4.62	2.66
Tobillo lider	4.72	3.21	1.60
Cadera Atrazada	8.02	2.33	1.29
Rodilla Atrazada	5.19	1.93	0.53
Tobillo Atrazada	6.41	3.52	1.76

**Tabla 3.** Coeficiente de variación tradicional (CV%) y el coeficiente de variación biológico (CVB%) en una medición cinemática en la salida desde el partidador.  
Traducido, tomado y adaptado de Bradshaw et al. 2006.

## Observaciones concluyentes

El estudio de la técnica o del gesto deportivo, visto desde el ángulo de la variabilidad, es un nuevo proceso que se abre a los biomecánicos deportivos, cuerpo técnico, metodólogos y otros profesionales de apoyo científico, con el fin de avanzar en la interpretación de que no existen patrones ideales sino patrones resultantes producto de adaptaciones individuales a los requerimientos del movimiento deportivo.

La aplicabilidad de este concepto no lineal de la variabilidad a través de los sistemas dinámicos en el entrenamiento y control de la técnica, se basa en que cada deportista, teniendo en cuenta su individualidad, hace que sus movimientos dependan de la adaptación funcional a nuevos y diferentes esquemas de restrictores que se presentan en el momento de la ejecución de un mismo patrón de movimiento y emergen de un comportamiento cooperativo de múltiples grados de libertad que posee su cuerpo y el ambiente externo. Entre más riqueza en el repertorio del gesto deportivo se encuentre en el estado del deportista, mayores serán las posibilidades de éxito y de adaptación.

La nueva propuesta de BIOMIN-VAR, creada como fruto de la experiencia del autor y de la inmensa riqueza de la literatura científica reportada, facilita los procesos de interpretación e intervención de los análisis biomecánicos para los deportistas en sus etapas de entrenamiento, enfatizando en un seguimiento de la adquisición, optimización y mantenimiento de los estados de variabilidad del gesto deportivo.

## REFERENCIAS

- Acero, J. (2002). *Bases biomecánicas para la actividad física y deportiva*. Faid Editores. Universidad de Pamplona, Pamplona ISBN 958-97105-2-2.
- Acero, J. (2006). The BIOMIN model in biomechanical analysis of athletes. First International Congress on Sports Biomechanics. Venezuelan National Institute of Sports. Proceedings. Valencia Venezuela. September
- Acero, J. (2007). A 2D Geometry System to Measure Static and Dynamic Footprints. Proceedings in the 16<sup>th</sup> Annual Meeting of European Society for Movement in Adults and Children (ESMAC). Athens. September
- Acero, J. (2009). Análisis biomecánico integral de golfistas- Club farallones de Cali. Instituto de Investigaciones & Soluciones Biomecánicas. Cali.

- Ae, M. Murak, Y. Koyama, H. & Fujii, N. (2008). A Biomechanical Method to Establish a Standard Motion and Identify Critical Motion by Motion Variability: With Examples of High Jump and Sprint Running. Proceedings from XXVIII ISBS Symposium 2008. Seoul, Korea. July.
- Anderson, R. Breen, S. and Tucker, C. (2008). Movement variability: a comparison between novice, experienced and elite performers ISBS Conference 2008. Seoul, Korea. July pg 542 -544.
- Barlett. R. (2008) How I Learned to Stop Worrying and to Love Movement Variability. **Inaugural Professorial Lectures**. University of Otago
- Bartlett, R. M. Wheat, J. S. and Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics*, 6, 224-243
- Bennett, I. B. (2008). Dynamical Systems: It's about Time! In Data Analytic Techniques for Dynamical Systems, S. M. Boker & M. J. Wenger (Eds). Mahwah: Erlbaum.
- Best, R. J. Bartlett, R. M. Sawyer, R. A. (1995). Optimal javelin release. *Journal of Applied Biomechanics*, 11, 371-394.
- Bootsma Reinoud, J. and Van Wieringen Piet C. W. (1990). Timing an Attacking Forehand Drive in Table Tennis. *Journal of Experimental Psychology*: Copyright 1990 by the American Psychological Association, Inc, *Human Perception and Performance*, Vol. 16, No. 1, 21-29
- Bradshaw, E.J. Maulder, P. S. & Keogh J. (2006). Biological movement variability during the sprint start. Proceedings from XXIV ISBS Symposium 2006, Salzburg, Austria. TUG1-3
- Carlota, M. (2005). La teoría de los sistemas dinámicos y el entrenamiento deportivo. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. Institut Nacional d' Educació Física de Catalunya. Centre de Barcelona
- Crossman, E. R. F. & Goodeve P. J. (1963/1983). Feedback control of hand-movement and Fitts' law. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 35A:251-278, 1983. Original work presented at the Meeting of Experimental Psychology Society Oxford, England, July 1963.
- Davids, K. Glazier, P. Araújo, D. et al. (2003b). Movement systems as dynamical systems: the role of functional variability and its implications for sports medicine. *Sports Med*, 33, 245-60.
- Davids, K. Shuttleworth, R. Button, C. Renshaw & Glazier, P. (2003a) "Essential noise" – enhancing variability of informational constraints benefits movement control: a comment on Waddington and Adams. *Br J Sports Med*, 38, 601-605.
- De Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Selyunov's Segment Inertia Parameters. *Journal of Biomechanics* 29, 9, 1223-1230.

- Ferber, R. McClay Davis, I. & Williams III, D.S. (2005). Effect of foot orthotics on rearfoot and tibia joint coupling patterns and variability. *Journal of Biomechanics*, 38,477-483.
- Ferrario, V. F. Sforza, C. Michielon, G. Mauro, F. & Miani, A. (1995). Morphological variation analysis: a new method to quantify the repeatability of sprint actions. *Coaching and Sport Science Journal*, 1:29-36.
- Field-Fote, E.C. & Tepavac, D. (2002). Improved intralimb coordination in people with incomplete spinal cord injury following training with body weight support and electrical stimulation. *Physical Therapy*, 82,707-715.
- Gareth, I. David, G. Kerwin & Matthew, R. (2008). Co-ordination analysis of landing strategies in beam dismounts. *Coaching and Sports performance ISBS*, 705
- Glazier, P.S. Davids K. Bartlett, R. (2003). Dynamical systems theory: a relevant framework for performance-oriented sports biomechanics research. *Sportscience 7*, sportsci.org/jour/03/psg.htm
- Glazier, P. & David, K. (2007). Is there such a thing as a 'perfect' golf swing? *Coachesinfo.com*
- Gowitzke, B. & Milner, M. (1981). *Understanding the Scientific Bases of Human Movement*. Baltimore, USA: Williams & Wilkins
- Grabiner, M. (1993). *Current issues in Biomechanics*. Human Kinetics Publishers, Champaign USA.
- Hamill, J. van Emmerick, R. E. A. & Heiderscheit, B. C. (1999). A Dynamical Systems Approach to lower Extremity Running Injuries. *Clinical Biomechanics*, 14, 297-308.
- Handford, C. Davids, K. Bennett, S. & Button, C. (1997). Skill acquisition in sport: some implications of an evolving practice ecology. *Journal of Sports Sciences*, 15, 621-640
- Harbourne, R. T. & Stergiou, N. (2003). Nonlinear analysis of the development of sitting postural control. *Develop Psychobiol*, 42, 368-377.
- Hate, H. (1995). The extended transentropy function as a useful quantifier of human motion variability. *Med. Sci.Sports Exerc*, 27, 751-759.
- Hay, J. (1993). *The Biomechanics of Sports Techniques* (4th Ed.). Englewood Cliff, NJ: Prentice-Hall. p. 398.
- Keele, S. W. (1968). Motor control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387-403
- Kelso J. A. S. (1995). *Dynamic Patterns: The Self-organization of Brain and Behavior*. Cambridge, Mass: MIT Press.

- Kudo, K. & Ohtsuki, T. (2008). Adaptive variability in skilled human movements. *Japanese Society of Artificial intelligence*, 23: (3) 151-162
- Langolf, G.D. Chaffin, D. B. & Foulke, J. A. (1976). An investigation of Fitts' law using a wide range of movement amplitudes. *Journal of Motor Behavior*, 8(2), 13-128.
- Latash, M. & Gutman, S. (1993). Variability and fast single-joint movements and the equilibrium-Point Hipotesis in Variability and Motor Control. Champaign, Ill: *Human Kinetics Publishers*. Ed. Newell K & Corcos D. Chapter 8<sup>th</sup> : pp. 157-182.
- Meyer, D. E. Smith, J. E. K. Kornblum, S. Abrams, R. A. & Wright, C. E. (1990). Speed accuracy tradeoffs in aimed movements: Toward a theory of rapid voluntary action. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 173-226.
- Meyer, D. Abrams, R. Kornblum, S. Wright, C. & Smith, J. (1988). Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements. *Psychological Review*, 95:3, 340-370.
- Miller, S. A. (2002). Variability in basketball shooting: Practical implications. In Y. Hong (ed.), *International Research in Sports Biomechanics* (pp. 27-34). London: Routledge.
- Mpitsos, G. & Soinila, S. (1993). In search of a unified theory of Biological Organization: What does the motor system of a sea slug tell us about human motor integration? In K.M. Newell & D.M. Corcos (Eds.), *Variability and Motor Control*, 225-290. Champaign, IL: Human Kinetics
- Murata, K. Ae, M. Uchiyama, H. (2008). A biomechanical approach to the evaluation of sports techniques. Proceedings XXV ISB Congress, Taipei, Taiwan, July
- Newell, KM, Slifkin, AB. (1998). The nature of movement variability. In: Piek JP, ed. *Motor behavior and human skill: a multidisciplinary perspective*. Champaign, IL: Human Kinetics, 143-60
- Riley MA, Turvey MT. (2002). Variability and determinism in motor behavior. *J Motor Behav*; 34:99-125.
- Stergiou, N, Buzzi, UH. Kurz, MJ. Heidel, J. (2004). Nonlinear Tools in Human Movement. In: Stergiou N: *Innovative Analyses for Human Movement*. Champaign, Ill: Human Kinetics Publishers; 63-90.
- Stergiou, N. Harbourne, R. y Cavanaugh, J. (2006). Optimal Movement Variability: A New Theoretical Perspective for Neurologic Physical Therapy. *Journal of Neurologic Physical Therapy*. Vol. 30 • No. 3 : 120-130
- Slifkin & Newell, K. (2000). Variability and noise in continuous force production. *J Motor Behav*. 32: 141-150.

- Langolf, G.D. Chaffin, D.B. & Foulke, J.A. (1976). An investigation of Fitts' law using a wide range of movement amplitudes. *Journal of Motor Behavior* 8(2):113-128.
- Latash, M, Gutman, S. (1993). Variability and fast single-joint movements and the equilibrium-Point Hipotesis in Variability and Motor Control. Champaign, Ill: Human Kinetics Publishers. Ed.Newell K & Corcos D. Chapter 8th : Pg 157-182
- Nelson, R. (1993). Beyond Research-Solutions to Human Problems The American Academy Of Physical Education. USA.
- Newell, K. M. & Corcos, D. M. (1993). Issues in variability and motor control. In K.M. Newell & D.M. Corcos (Eds.) *Variability and Motor Control*, 1-12. Champaign, IL: Human Kinetics
- Newell, K. M. & Slifkin, A. B. (1998). The nature of movement variability. In: Piek JP, ed. *Motor behavior and human skill: a multidisciplinary perspective*, 143–60. Champaign, IL: Human Kinetics
- Rojas J. Sicilia A. y Gutiérrez M (1998) Valoración de la variabilidad inter e intraindividual en el lanzamiento en salto en baloncesto a través del análisis biomecánico. *Biomecánica*, VI, 11 (88-97), 1998
- Schmidt, R. A. (2003). Motor schema theory after 27 years: Reflections and implications for a new theory. *Res Quart Exer Spor*, 74, 366-375.
- Schmidt R. A. & Lee T. D. (2005). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. 4th ed. Champaign, Ill: Human Kinetics Publishers
- Schmidt, R. Zelanik, H. Hawkins, B. Frank, J. & Quinn, J. (1979). Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86(5), 415-451.
- Slifkin & Newell, K. (2000). Variability and noise in continuous force production. *J Motor Behav*, 32, 141-150.
- Thelen, E. & Smith, L. B. (1994). *Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*. Cambridge: Mass, MIT Press
- Wheat J. Mullineaux D. R. Barlett R. & Milner C. (2002). Quantifying variability in coordination during running. Cáceres, Extremadura, Spain: Proceedings ISBS 2002. pp. 519-522
- Woo, B. H. Kim, C. W. & Lim Y K. (2008). Variability of basketball free throw. Seoul, S. Korea: Proceedings ISBS 2008
- Zatsiorsky V. (1994). *Advanced Sport Biomechanics*. USA: The Pennsylvania State University, Biomechanics Laboratory, PA
- Zatsiorsky, V. Seluyanov, V. & Chugunova, L. (1990). Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments. *Contemporary problems in Biomechanics*, pp. 272-291, CRC press.



# Temáticas actuales en análisis del movimiento y sus aplicaciones en el deporte

Young-Hoo Kwon, Ph.D.\*

Traducción: Gustavo Ramón S.\* y Dr. José A. Acero J.\*\*

## Introducción

Una de las técnicas de análisis más comúnmente usadas en biomecánica deportiva es “el análisis de movimiento”. Ésta implica la cuantificación (medición) del movimiento específico y el análisis del mismo basado en variables cinemáticas y cinéticas. El análisis de movimiento permite un análisis cuantitativo profundo del movimiento, lo cual es imposible con la sola observación visual o a través de una simple grabación del movimiento (Figura 1). Las ventajas adicionales incluyen la visualización del movimiento en varios formatos tales como la animación computarizada, cuadros y gráficos, kinegramas y comparaciones cuantitativas entre individuos y/o grupos de individuos.

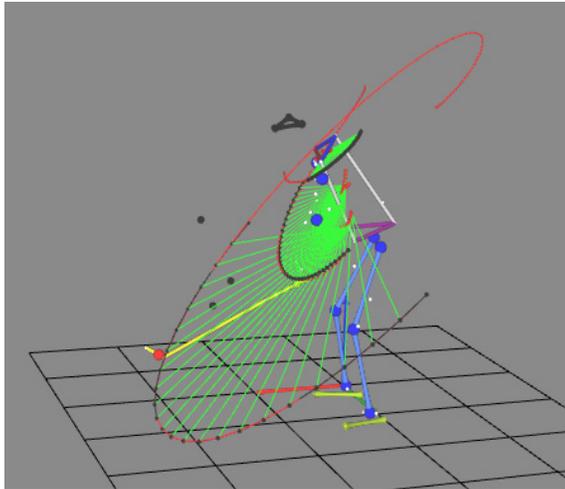
---

\*Texas Woman’s University, Denton, Texas, USA.

- 1984, BS in Astronomy, Seoul National University, Seoul, Korea
- 1986, M.Ed. in Physical Education with specialization in Biomechanics, Seoul National University, Seoul, Korea.
- 1993, Ph.D. in Exercise & Sport Science with specialization in Biomechanics and minor in Mechanical Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA.
- 2007-present: Editor, Sports Biomechanics
- 2005-2007: Vice President of Publications, International Society of Biomechanics in Sports
- 2008-present: Professor, Dept. of Kinesiology & Director, Biomechanics Laboratory, Texas Woman’s University, Denton, TX. [ykwon@twu.edu](mailto:ykwon@twu.edu)

\*\*Lic. Educación Física. Médico Cirujano. Mg. Fisiología del ejercicio. Dr. Educación Física. Instituto Universitario de Educación Física. [gusramon2000@yahoo.es](mailto:gusramon2000@yahoo.es)

\*\*\* Lic. Educación Física. Ms. Sc. & Sci. Director científico, Instituto de Investigaciones & Soluciones Biomecánicas. Cali, Colombia. [jacero5@telmex.net.co](mailto:jacero5@telmex.net.co)



**Figura 1.** Ejemplo de un análisis de movimiento. Análisis de los planos del *swing* de golf: el análisis de movimiento permite un análisis cuantitativo en profundidad. Son visualizados tres planos: el plano de la cabeza del club, el plano de la mano derecha y el plano del hombro izquierdo. Todos los planos muestran orientaciones diferentes. Las líneas verdes muestran los instantes de la rotación de los brazos, lo cual permite asegurar la suavidad y progresión del movimiento.

El análisis de los movimientos en conjunto en los deportes, implica grabar el movimiento del atleta en un video, ya sea en el laboratorio o en el campo mismo. La reconstrucción del movimiento es conducida con base en las imágenes grabadas. Los datos biomecánicamente útiles son derivados de los movimientos reconstruidos a partir de marcadores anatómicos (colocados en las articulaciones, al final de los segmentos, etc.) o de marcadores colocados en el cuerpo. Los cálculos de las variables cinemáticas y cinéticas suponen el modelamiento del cuerpo humano como un sistema de segmentos articulados (un sistema de segmentos rígidos interconectados por medio de articulaciones). Un modelo mecánico del cuerpo humano para el análisis de movimiento incluye elementos tales como puntos (marcadores), segmentos, articulaciones y marcos de referencia local fijados a los segmentos (marcos de referencia segmental). Los aspectos más comúnmente encontrados en el análisis de movimiento pueden ser clasificados en dos categorías principales: aspectos procedimentales y aspectos orientados al modelamiento corporal. Los aspectos procedimentales están relacionados con la grabación del movimiento, la calibración de la cámara y la reconstrucción del movimiento,

mientras que los aspectos relacionados con el modelamiento se relacionan con la visión del movimiento en una perspectiva mecánica. En este trabajo, la discusión se centrará principalmente en los aspectos procedimentales.

Los pasos esenciales para el análisis de movimiento son la grabación, la calibración de la cámara y la reconstrucción del movimiento, los cuales contienen abundantes aspectos analíticos y experimentales que requieren atención. Es muy importante obtener imágenes grabadas claras, del movimiento que está siendo analizado, la localización de la(s) cámara(s) debe ser determinada estratégicamente de manera que el movimiento pueda ser observado desde las direcciones más útiles. Antes de la reconstrucción del movimiento, cada una debe ser calibrada pues la precisión de las variables cinemáticas y cinéticas dependen de ello, cualquier problema en su calibración puede introducir errores sobre los datos. En las aplicaciones deportivas, en situación diferente al laboratorio de análisis de movimiento, la calibración y la grabación son frecuentemente realizadas en el campo (gimnasio, piscina, etc.). El propósito del presente trabajo es destacar y dar luces acerca de las claves procedimentales y circunstanciales comúnmente encontradas en el análisis de los movimientos deportivos bajo la perspectiva de la precisión y la flexibilidad.

## **Calibración y algoritmos de reconstrucción**

La calibración de la cámara es esencialmente el proceso de calcular la posición y orientación de cada una de manera que se pueda relacionar lo grabado con lo que sucede realmente. Los aspectos claves en su calibración incluyen algoritmos de calibración, adaptación de los mismos a varias situaciones experimentales, evaluación de la precisión de la calibración, uso de la calibración de los fotogramas y corrección de los errores ópticos tales como la distorsión óptica y del foco (fuera de foco). Entre estos, entender la óptica básica de las cámaras y los algoritmos de calibración comúnmente utilizados es de crucial importancia, de tal forma que esto proveerá un fundamento firme para el entendimiento de los principios básicos de la calibración de la cámara y la reconstrucción del movimiento.

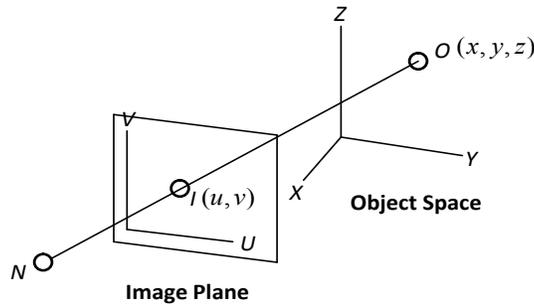
### *La TLD tridimensional*

La transformación lineal directa, TLD (*Direct Linear Transformation [DLT]*), fue un método introducido por Abdel-Aziz y Karara (1971), es el

más comúnmente usado para la calibración de cámaras en el análisis de movimientos de los gestos deportivos. Grabar los movimientos del deportista usando una cámara, es de hecho el proceso de mapear los puntos del objeto para convertirlos en puntos de imagen (figura 2). Allí, existe una relación funcional directa entre las coordenadas del objeto-espacio de los puntos del objeto y las coordenadas plano-imagen del punto de la imagen:

$$\begin{aligned} u &= \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \\ v &= \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \end{aligned} \quad [E-1]$$

Donde  $L_1 - L_{11}$  son los parámetros de la TLD. Los parámetros de la TLD son funciones de las condiciones organizacionales de diez cámaras. Las ecuaciones de la TLD (E-1) pueden ser usadas de dos maneras diferentes:



$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad [E-2]$$

**Figura 2.** Condición de colinealidad: el punto del objeto (O), el punto de la imagen (I) y la proyección central (N) forman una línea recta. Dos marcos de referencia pueden ser definidos: el marco de referencia del espacio del objeto (sistema XYZ) y el marco de referencia del plano de la imagen (Sistema U-V).  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas espaciales del punto del objeto mientras que  $u$  y  $v$  son las coordenadas del plano de la imagen del punto de la imagen. Cuando se graba, el sistema óptico de la cámara mapea el punto O al punto I.

$$\begin{bmatrix} L_1 - uL_9 & L_2 - uL_{10} & L_3 - uL_{11} \\ L_5 - vL_9 & L_6 - vL_{10} & L_7 - vL_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - L_4 \\ v - L_8 \end{bmatrix} \quad [\text{E-3}]$$

Los parámetros de la TLD son desconocidos en la ecuación 2 [E-2] mientras que las coordenadas espaciales del objeto son desconocidas en la ecuación 3 [E-3]. Las coordenadas planares de la imagen son siempre conocidas ya que ellas pueden ser obtenidas de las imágenes grabadas a través del proceso llamado *digitalización* (seguimiento de los marcadores). La ecuación 2 [E-2] es usada para la calibración de la cámara mientras que la ecuación 3 [E-3] es usada para la reconstrucción del movimiento.

Para la calibración de la cámara es utilizado un conjunto de puntos fijos de control sobre un marco rígido (sistema de referencia; Figura 3) cuyas coordenadas espaciales del objeto son previamente conocidas. Dado que un punto de control determina dos ecuaciones [E-2] y hay once parámetros desconocidos de la TLD, el sistema está menos determinado. La redundancia puede ser alcanzada incrementando el número de ecuaciones para una cámara determinada usando múltiples puntos de control y un mínimo de seis puntos de control (12 ecuaciones) son requeridos para una calibración tridimensional de la cámara. La calibración de las cámaras debe ser hecha cámara por cámara.

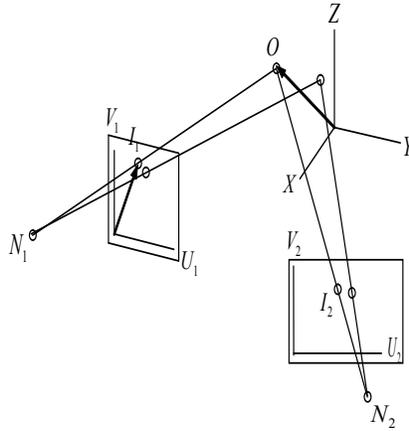


Figura 3. Sistema de referencia marcado con un sistema de puntos de control: las coordenadas espaciales de los puntos de control son conocidos.

Algunas propiedades importantes del sistema 3-D TLD son:

- Los puntos de control no deben ser coplanares y deben formar un volumen.
- Las coordenadas espaciales de los puntos de control deben ser medidos de manera muy precisa porque la precisión de la calibración de la cámara está determinada por las coordenadas del plano del objeto de los puntos de control.
- La digitalización de los puntos de control deben ser realizadas cuidadosamente ya que la precisión de las coordenadas imagen-plano también son afectadas por la agudeza de la calibración.
- La exactitud de la calibración puede ser mejorada incrementando el número de puntos de control usado (incrementando la redundancia del sistema), suministrando coordenadas espaciales de los objetos que sean suficientemente precisas y digitalizando cuidadosamente los puntos de control (Chen, Armstrong & Raftopoulos, 1994).
- El volumen de control (el volumen cubierto por los puntos de control) debe ser lo suficientemente amplio para cubrir el movimiento. Si el control de volumen no es lo suficientemente grande, pueden ocurrir errores de extrapolación cuando existan partes del cuerpo que estén por fuera del volumen de control.

Una vez la calibración de la cámara es llevada a cabo, los parámetros de la TLD pueden ser usados en la reconstrucción del movimiento. Debido a que un punto del objeto desconocido (marcador) provee dos ecuaciones [E-3] y existen tres desconocidos ( $x$ ,  $y$  y  $z$ ), el sistema está menos determinado. De nuevo la redundancia puede ser lograda incrementando el número de ecuaciones para un punto dado desconocido, mediante el empleo de múltiples cámaras. Un mínimo de dos cámaras son requeridas en una reconstrucción 3-D. (Figura 4). En este proceso, la exactitud de la reconstrucción puede ser mejorada por incremento del número de cámaras (incrementando la redundancia del sistema), asumiendo que los puntos marcadores son digitalizados cuidadosamente.



**Figura 4.** Reconstrucción del punto del objeto (O) basado en puntos de la imagen (I's) de múltiples cámaras: un mínimo de dos cámaras son requeridas para la reconstrucción 3-D.

### Corrección del error óptico

El sistema óptico de la cámara introduce errores para las coordenadas del plano de la imagen, tales como la distorsión óptica (*pin-cushion or barrel*) o alteración del centrado o pérdida de foco. Es posible corregir estos errores ópticos incorporando el modelo de error óptico dentro del método 3-D TLD (Marzan & Karara, 1975). Para incluir el error óptico, E-1 puede ser modificada a:

$$\begin{aligned}
 u - \Delta u &= \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \\
 v - \Delta v &= \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1}
 \end{aligned}
 \quad [\text{E-4}]$$

Donde,

$$\begin{aligned}
 \Delta u &= f(u, v, u_o, v_o, L_{12}, L_{13}, L_{14}, L_{15}, L_{16}) \\
 \Delta v &= g(u, v, u_o, v_o, L_{12}, L_{13}, L_{14}, L_{15}, L_{16})
 \end{aligned}
 \quad [\text{E-5}]$$

Las coordenadas de U ( $\Delta u, \Delta v$ ) son iguales a los errores ópticos incluidos en las coordenadas planas de la imagen;  $(u_o, v_o)$  = coordenadas planas de la imagen del punto principal de la cámara (pueden ser calculadas a partir de los parámetros de la TLD);  $L_{12} - L_{14}$  = parámetros adicionales para la distorsión óptica, y  $L_{15} - L_{16}$  los parámetros adicionales para la distorsión de centrado. Los errores ópticos son funciones lineales de los parámetros adicionales [E-5] y las ecuaciones de la TLD expandida [E-4] implican 16 parámetros, lo que requiere al menos ocho puntos de control. Para más detalles de las ecuaciones de error (E-5), ver Kwon (2003) donde se amplían términos adicionales y ecuaciones completas del sistema TLD expandido. El desarrollo completo de sus 16 parámetros depende de la calidad de las lentes usadas en la cámara y de la cantidad de error óptico introducido al sistema por las lentes.

*TLD Bi-dimensional (2-D)*

El método TLD puede ser usado en el análisis en dos dimensiones (2-D). Sus ecuaciones pueden ser derivadas directamente de las ecuaciones del TLD 3-D reemplazando z con 0 y reordenando los parámetros (Walton, 1981):

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{L_1x + L_2y + L_3}{L_7x + L_8y + 1} \\
 v &= \frac{L_4x + L_5y + L_6}{L_7x + L_8y + 1}
 \end{aligned}
 \tag{E-6}$$

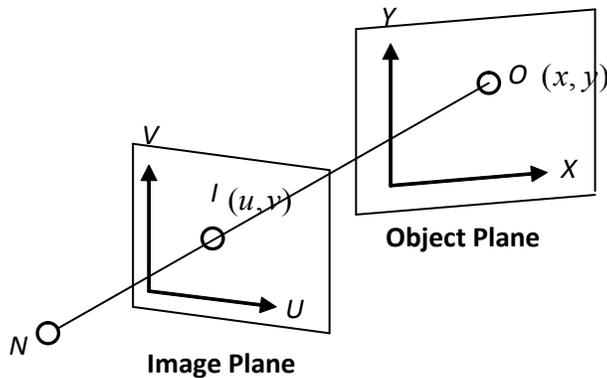
Donde, L1 – L8 son los parámetros TLD -2D. De nuevo, estos parámetros son funciones de condiciones inherentes a las cámaras. La ecuación 6 [E-6] puede ser reestructurada a:

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -vx & -vy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}
 \tag{E-7}$$

$$\begin{bmatrix} L_1 - uL_7 & L_2 - uL_8 \\ L_4 - vL_7 & L_5 - vL_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - L_3 \\ v - L_6 \end{bmatrix}
 \tag{E-8}$$

E-7 es la calibración de la cámara mientras que E-8 es para la reconstrucción. Debido a que un punto de control provee dos ecuaciones [E-7], un mínimo de cuatro puntos de control son requeridos para el TLD -2D. Los puntos de control no deben ser colineales pero ellos forman un sistema coplanar que delimita un área (área de control), ésta debe ser lo suficientemente grande para contener el movimiento analizado y así evitar los errores de extrapolación. Una cámara es suficiente para el análisis 2-D [E-8] pero más cámaras pueden ser agregadas para incrementar la redundancia del sistema.

Las ecuaciones del TLD -2D mapean el plano del objeto (plano de movimiento) hacia el plano de la imagen y estos planos no tienen que ser paralelos el uno al otro (Figura 5) lo cual es una ventaja importante sobre el método convencional multiplicador (método de la escala). Se asume que en el método multiplicador donde el plano del objeto es paralelo al plano de la imagen, puede implicar serios problemas si los dos planos no son paralelos. A menudo no es posible, en situaciones de competencia, alinear el eje de la cámara perpendicularmente al plano del movimiento, el TLD-2D es también más flexible en términos de la colocación de la cámara que el método multiplicador convencional (Kwak, Kwon, Kim, Lee & Sung, 1996; Kwon, 1995; Shim, Kwon & Newton, 2001). La localización estratégica y el uso de varias cámaras basadas en el algoritmo del TLD-2D pueden reducir el error de perspectiva.



**Figura 5.** La colinealidad en el método TLD -2D: el marco de referencia del objeto (Sistema  $XY$ ) y el marco de referencia de la imagen (Sistema  $UV$ ) no son necesariamente paralelos entre ellos. El TLD -2D suministra el mapeo plano a plano.

## Valoración de la exactitud de la calibración de la cámara

### Error de calibración

Una vez que la calibración de la cámara se ha realizado, es importante evaluar la exactitud de la calibración. Este procedimiento puede ser evaluado esencialmente por los errores de medición: errores de calibración inteligente de las cámaras individualmente y error de calibración global. Las coordenadas del plano de la imagen de un punto de control pueden ser recalculadas a partir de las coordenadas espaciales del objeto y los parámetros de la TLD obtenidos a través del proceso de calibración (ecuaciones 2-5 y 7-8):

$$\begin{aligned}\hat{u}_{ij} &= \frac{L_{i1}x_{ij} + L_{i2}y_{ij} + L_{i3}z_{ij} + L_{i4}}{L_{i9}x_{ij} + L_{i10}y_{ij} + L_{i11}z_{ij} + 1} \\ \hat{v}_{ij} &= \frac{L_{i5}x_{ij} + L_{i6}y_{ij} + L_{i7}z_{ij} + L_{i8}}{L_{i9}x_{ij} + L_{i10}y_{ij} + L_{i11}z_{ij} + 1}\end{aligned}\quad [\text{E-9}]$$

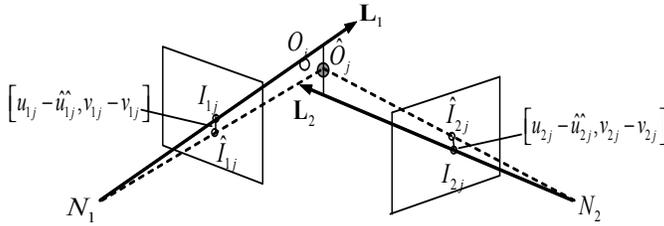
Donde  $i =$  cámara,  $j =$  punto control,  $(\hat{u}_{ij}, \hat{v}_{ij}) =$  coordenadas del plano proyectado de la imagen y recalculada a partir de la calibración;  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) =$  coordenadas espaciales del objeto; y  $L_{i1} - L_{i11} =$  parámetros del TLD (Figura 6). El error de calibración inteligente de la cámara es definido entonces como:

$$C_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left[ (u_{ij} - \hat{u}_{ij})^2 + (v_{ij} - \hat{v}_{ij})^2 \right]}{n}}\quad [\text{E-10}]$$

Donde  $C_i =$  error de calibración inteligente de la cámara y  $n =$  conteo del punto control. El error de calibración inteligente de la cámara es esencialmente la raíz cuadrada del error de medición. Este error puede ser también obtenido como:

$$C_{iMax} = \text{Max} \left( \sqrt{(u_{ij} - \hat{u}_{ij})^2 + (v_{ij} - \hat{v}_{ij})^2} \right) \quad [\text{E-11}]$$

Las ecuaciones 10 y 11 básicamente muestran estrechamente que tanto coinciden las coordenadas de la imagen calculada con aquellas obtenidas a través de la digitalización para una cámara dada. El error de calibración inteligente se da en pixeles o en unidades del digitalizador.



**Figura 6.** Errores implicados en la reconstrucción de un punto: debido a los errores experimentales contenidos en el plano de la imagen y las coordenadas espaciales, las líneas de proyección (L) trazadas desde los centros de proyección (N) hacia los puntos de la imagen respectiva (I) no se interceptan necesariamente entre ellos. La reconstrucción del punto  $j$  genera un punto del objeto reconstruido ( $\hat{O}$ ) localizado entre las dos líneas de proyección. La proyección del punto reconstruido hacia atrás de los planos de la imagen establece los puntos estimados de ésta. La desviación del punto estimado de la imagen tomado desde el punto original digitalizado, es utilizado para computar el error de calibración inteligente de la cámara, mientras que el punto del espacio reconstruido del objeto desde el punto del espacio del objeto original, es utilizado en el cómputo del error de calibración global.

El error global de calibración es calculado desde las coordenadas espaciales de los puntos de control del objeto medido y reconstruido:

$$C = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [(x_j - \hat{x}_j)^2 + (y_j - \hat{y}_j)^2 + (z_j - \hat{z}_j)^2]}{n}} \quad [\text{E-12}]$$

Donde  $(X_j, Y_j, Z_j) =$  coordenadas  $j$  del punto control del objeto medido,  $(\hat{x}_j, \hat{y}_j, \hat{z}_j) =$  coordenadas espaciales del objeto reconstruido y  $n =$  cantidad de puntos control. El error global de calibración [E-12] es una raíz cuadrada y refleja la precisión global de la calibración de la cámara con unidades reales de medición tales como centímetros o milímetros.

Un aspecto importante aquí es que el error global de calibración no es necesariamente una medida precisa de la deformación espacial del objeto. El método TLD está basado en el método de los cuadrados mínimos y tiende a reconstruir las coordenadas espaciales del objeto de los puntos control usados en la calibración. Usando una barra de longitud conocida, que rota en varias condiciones diferentes de puntos control, Kwon (1989) mostró que las deformaciones espaciales del objeto (desviación estándar de la longitud de la barra calculada a partir de las coordenadas reconstruidas) no se correlacionaron muy bien con el error global de calibración y la así llamada extrapolación por sí misma, mejoró la concordancia entre los dos errores de medición. En la estrategia de extrapolación por sí misma, cada punto de control de por medio fue usado en la calibración mientras que todos los puntos de control fueron usados en el cálculo del error global de calibración (Kwon, 1989). Dicha estrategia incrementa el número mínimo de puntos control requeridos, llegando a ser once puntos en el 3-D y ocho en el 2-D.

### *Error de reconstrucción*

La precisión de reconstrucción de un punto del objeto (marcador) puede ser valorada de una forma similar a la valoración de la precisión de la calibración (Figura 6). La discrepancia entre las coordenadas de la imagen proyectada y la digitalizada, de un marcador, puede ser combinada a través de todas las cámaras:

$$R_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [(u_{ij} - \hat{u}_{ij})^2 + (v_{ij} - \hat{v}_{ij})^2]}{m}} \quad \text{[E-13]}$$

Donde  $i =$  cámara,  $j =$  punto,  $R_j =$  error de reconstrucción de un punto dado, y  $m =$  cantidad de cámaras. El error de reconstrucción es una raíz cuadrada medida en pixeles (unidades de video) o en unidades del digitalizador.

El error de reconstrucción permite evaluar el error implicado en la reconstrucción de un punto simple del objeto. El error global de reconstrucción de un punto puede ser valorado por la combinación de los errores de reconstrucción de todos los cuadros de las imágenes grabadas:

$$R_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^f \sum_{i=1}^m \left[ (u_{ijk} - \hat{u}_{ijk})^2 + (v_{ijk} - \hat{v}_{ijk})^2 \right]}{nc}} \quad [\text{E-14}]$$

La ecuación E-14 es particularmente útil en la sincronización de varias cámaras a través de optimización numérica (Christopher, Yoon & Kwon, 2008).

### Calibración del marco de referencia

Los puntos de control son normalmente marcados sobre un marco rígido (Figura 3). El sistema de referencia debe ser lo suficientemente grande como para poder abarcar todo el volumen/área del movimiento que va a ser analizado. El error de deformación del espacio del objeto es mayor en el volumen-control externo que para el interno por dos razones, primero, el algoritmo TLD está basado en el método de cuadrados mínimos y la extrapolación ocurre cuando el punto del objeto de interés está localizado por fuera del volumen-control (Hinrichs & McLean, 1995; Wood & Marshall, 1986); segundo, el espacio del objeto reconstruido no es ortogonal (los ejes no son perpendiculares entre sí) ya que los parámetros del TLD son mutuamente dependientes, pero calculados por medio del procedimiento de cuadrados mínimos, sin considerar sus interdependencias (Hatze, 1988). Por estas razones, un volumen-control grande es requerido en los escenarios deportivos.

Los marcos de referencia pueden ser clasificados en dos tipos: de forma fija y de forma variable. Aunque los de forma fija (Figura 3) son más comunes, los de forma variable permiten mayor flexibilidad en los escenarios deportivos. Los puntos de control son marcados en el marco y fijados de tal manera que su posición no cambie. Los de forma fija consisten en partes que pueden ser ensambladas (Figura 3).

Los postes de rango son un ejemplo típico de sistemas de referencia de forma variable (Figura 7). Dependiendo del volumen de control que se requiera,

los postes pueden ser localizados de diferente manera para formar las áreas de control de diferentes formas y tamaños. Los sistemas de calibración de forma variable son útiles cuando se requiere un volumen de control muy amplio o grande, una desventaja de este sistema es que las coordenadas espaciales del objeto de los puntos de control, requieren necesariamente ser medidos (calculados) en cada sesión de calibración. Existen dos modos de generar las coordenadas espaciales del objeto o de los planos en los puntos de control marcados sobre los postes: a) colocando las barras en posiciones predeterminadas y organizar las coordenadas basados en las dimensiones conocidas de los espacios deportivos o de líneas dibujadas sobre el piso (Woo, Shin & Brown, 1999), o b) colocando los postes en cualquier posición sin restricciones y usar el método de levantar un plano para calcular las coordenadas. En el método de levantar un plano, un grupo de postes son colocados verticalmente y las posiciones angulares tanto como los puntos marcados sobre los postes, son medidos con un teodolito para el computo de las coordenadas espaciales del objeto de los puntos de control (Kwon, 1996; Kwon, Fortney & Shin, 1990).

Una forma de tomar ventaja de las fortalezas de ambos tipos de sistemas de referencia es construir un sistema de referencia polimórfico (Figura 3) el cual está conformado por partes que pueden ser ensambladas de manera diferente. Debido a que las coordenadas espaciales del objeto son fácilmente medibles, un sistema polimórfico puede ser extremadamente útil en escenarios deportivos, pues la forma y la dimensión del sistema de referencia pueden ser adaptadas de acuerdo a las demandas de la situación (Figura 8).



(a)

(b)

**Figura 7.** Grupo de postes (a) y un teodolito usado en la medición de las posiciones angulares de las barras en los puntos de control (b): Como quiera que los puntos de control sean marcados sobre un grupo de barras colocadas verticalmente en el diseño variable, las posiciones relativas de los puntos de control cambian de una sesión a otra. La forma del volumen-control, definidos por el grupo de postes, puede ser incrementada separando los postes o agregándole más. Postes más altos pueden ser utilizados para incrementar la dimensión vertical.



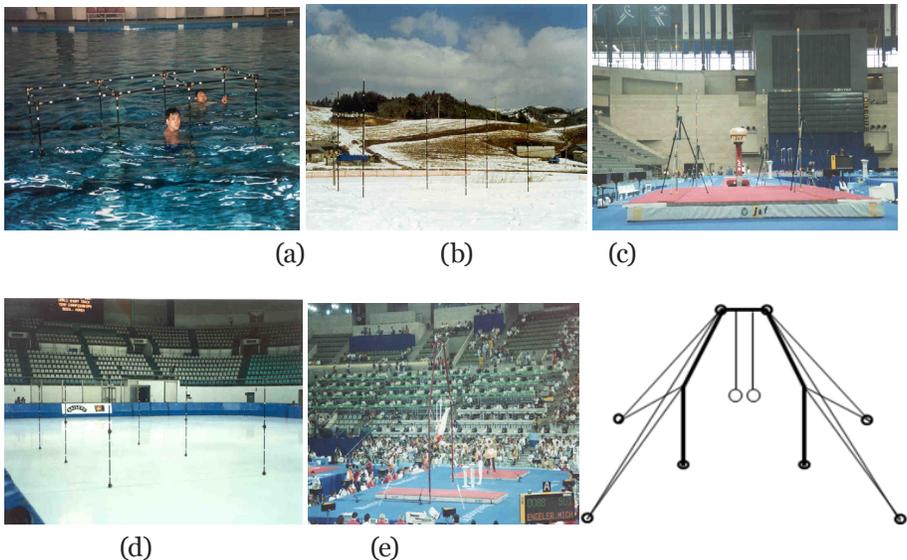
**Figura 8.** Polimorfismo: dependiendo del tamaño y la forma del volumen-control requerido y de lo que las circunstancias requieran, la forma del marco de calibración puede ser cambiada. Una vez que el marco es ensamblado, éste, llega a convertirse en un marco fijo y las coordenadas espaciales de los puntos de control pueden ser fácilmente obtenidas.

El tipo óptimo del marco de calibración es a menudo dictado por la configuración del campo (Figura 9). Por ejemplo, un marco de calibración fijo o rígido es requerido en el análisis del movimiento subacuático de tal manera que éste sea lo suficientemente fuerte para resistir el movimiento del agua (Figura 9a). Los postes de rango son más apropiados sobre una pista de nieve, dado que el piso es desnivelado (Figura 9b) y el volumen control requerido es grande (Figura 9c), éstos pueden estar situados en los marcajes de las líneas de comienzo debajo del hielo en una pista de patinaje de velocidad (Figura 9d). En algunos casos, los aparatos deportivos pueden ser utilizados como marcos de calibración (Figura 9e) y sus dimensiones pueden servir para generar las coordenadas de los puntos de control.

La distribución de los puntos de control dentro del área o del volumen-control, puede también afectar la precisión global de la reconstrucción espacial del objeto. Las fluctuaciones del error de deformación del espacio del objeto, pueden ocurrir si el marco de referencia no tiene una asignación homogénea en la distribución de los puntos de control. En general, distribuir los puntos de control a lo largo del volumen de control es recomendable de manera que los puntos más específicos se coloquen estratégicamente en el volumen de control, resultando en una, relativamente, reconstrucción local más precisa en esa área.

## Análisis del movimiento subacuático y el TLD localizado (TLDL)

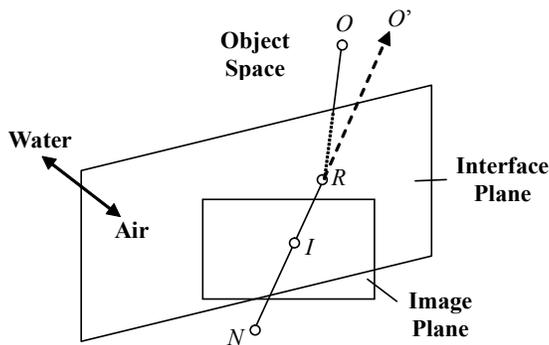
El TLD localizado (Kwon & Lindley, 2000) es una variación del algoritmo del TLD, específicamente diseñado para aplicaciones en análisis de movimientos subacuáticos. Uno de los principales obstáculos en los movimientos subacuáticos es la refracción de la luz en la interface agua-lente-aire (Figura 10). A pesar de los sistemas de grabación empleados (ventanas subacuáticas, periscopios o ensamblajes a prueba de agua), la grabación subacuática siempre implica la interfase agua-aire (agua-lente-aire para ser precisos) y la deformación no lineal (efecto almohadilla de alfileres) de la imagen es el resultado inmediato. Raíces cuadradas mayores y errores de calibración máximos, e inclusive grandes errores de extrapolación, son las características típicas de la calibración de cámaras subacuáticas. Los errores de calibración siempre ocurren al límite del volumen de control debido a la naturaleza no lineal de la refracción, por lo tanto, el error de calibración máximo, es una mejor medida de la precisión de la calibración de la cámara que el error por raíz cuadrada en el análisis de movimiento subacuático (Kwon, 1999a, 1999b).



**Figura 9.** Diferentes escenarios experimentales: a) natación, b) *ski cross-country*, c) garrocha (pértiga), d) patinaje de velocidad en pista corta, e) anillos en gimnasia artística.

El método TLD ha sido predominantemente usado en calibraciones de cámaras subacuáticas (Cappaert, Pease & Troup, 1995; Drenk, Hildebrand, Kindler & Kliche, 1999; Kwon & Sung, 1995; Yanai, 1999). Para reducir el error de calibración máximo usando el método TLD, se encuentran las siguientes alternativas:

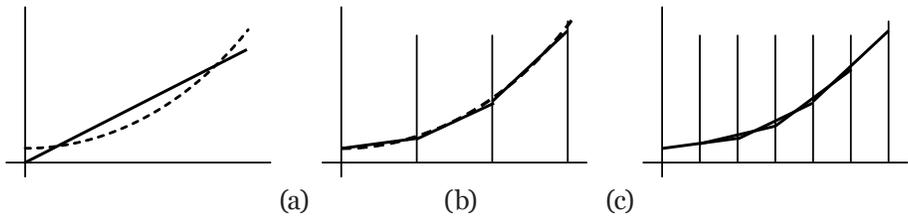
- Poner más puntos de control en los límites del volumen-control y menos en el centro.
- Incrementar la distancia entre el volumen-control y la interfase agua-aire.
- Incrementar la distancia entre la interfase agua-aire y la cámara.
- Agregar mas cámaras para reducir el tamaño del volumen de control, cubierto por cada cámara (Kwon, 1999b).



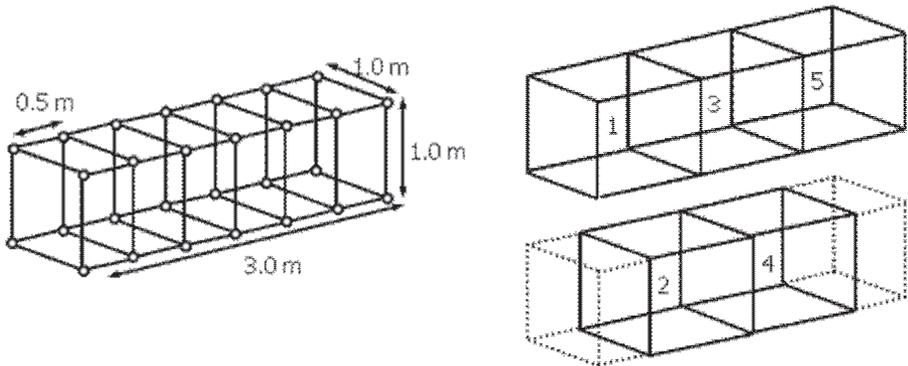
**Figura 10.** Refracción de la luz en la interfase (agua-lente-aire) agua-aire: el punto del objeto (O), el punto de la imagen (I) y el centro de proyección (N) no son colineales debido a la refracción en R. El punto O aparece colocado en la dirección  $O'$  y como resultado la imagen se deforma no linealmente. Las coordenadas de los puntos de control de la imagen deformada, deben ser emparejadas a las coordenadas espaciales del objeto y los errores de coincidencia deben ser distribuidos a lo largo del volumen-control. Esto causa errores de calibración relativamente grandes y los errores de extrapolación incrementan rápidamente cuando la distancia desde el límite del volumen de control incrementa.

El método TLDL propuesto por Kwon y Lindley (2000) puede mejorar la calibración con exactitud para el análisis de movimiento bajo el agua, en el cual el control de volumen está dividido en volúmenes más pequeños

localizados. Durante la calibración, los parámetros TLD se calculan para cada volumen localizado, el más cercano al punto de interés es identificado durante la reconstrucción y los parámetros TLD de estos volúmenes más cercanos localizados se utilizan como objeto en el cálculo del espacio de coordenadas del marcador. El mismo planteamiento se puede aplicar al método 2-D TLD, así como a 2-D TLDL. Los métodos de TLDL (2-D y 3-D) proporcionan una calibración y reconstrucción más precisa, puesto que manejan menores controles de volumen a la vez (Figura 11), ambos volúmenes discretos localizados y la superposición de volúmenes, pueden ser utilizados en el método TLDL (Figura 12).



**Figura 11.** El método TLDL: la regresión lineal de tendencia no lineal (a), a la regresión lineal con intervalos localizados (b) y a la regresión lineal con intervalos superpuestos localizados (c). Una simple línea lineal no representa eficazmente toda la tendencia lineal de la misma. Las líneas lineales obtenidas a partir de múltiples intervalos localizados, representan mejor la tendencia no lineal, lo que se observa es la discontinuidad entre las líneas de tendencia lineal. La discontinuidad disminuye con los intervalos superpuestos localizados. El TLDL se basa en el mismo principio.



**Figura 12.** Los sub-volumenes de un marco de calibración definidos por grupos de puntos de control: el volumen de control puede ser dividido en volúmenes sub-discretos (a) o volúmenes de sub-superposición. Los parámetros de la cámara (parámetros TLD) se calculan para cada sub-volumen en vez calcular todo el volumen de control en el método de LDT.

Drenk y colaboradores (1999) introdujeron un método de reconstrucción 3-D para análisis de movimientos subacuáticos que fue generalizado por Kwon y Lindley (2000) como el método del doble plano. Las condiciones de localización tales como el tamaño de los volúmenes localizados y el grado de superposición entre ellos, afecta la precisión de la calibración de la cámara subacuática (Kwon, Ables & Pope, 2002; Kwon & Lindley, 2000). El método del paneo fue también aplicado para la calibración de este tipo de cámaras (Yanai, Hay & Gerot, 1996) y nuevas estrategias de paneo con potencial para reducir las discontinuidad espacial del objeto, fueron propuestas por Kwon (2001 b).

## Temáticas de las cámaras

Aunque el método TLD requiere dos cámaras para los estudios 3-D y una para los 2-D, a menudo es necesario utilizar más cámaras (para incrementar la redundancia del sistema y asegurar una reconstrucción precisa), minimizar la opción de que los marcadores se pierdan y acomodar los requerimientos experimentales espaciales.

En general, cuando el número de cámaras se incrementa, la redundancia del sistema y la precisión de la reconstrucción mejoran proporcionalmente. La desventaja de esta estrategia es la sobrecarga en la digitalización y el seguimiento de los marcadores. La combinación de dos cámaras cualesquiera, cuyo ángulo inter-cámara esté cercano a  $0^\circ$  ó  $180^\circ$ , debe ser evitado sin considerar el número de cámaras, para prevenir errores de reconstrucción más grandes.

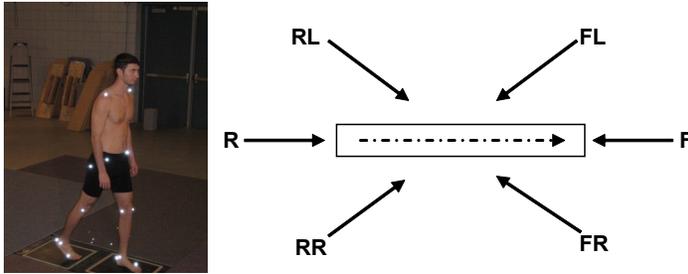
Los marcadores corporales pueden llegar a quedar ocultos cuando otras partes del cuerpo se interponen en el movimiento. Estos problemas pueden ser resueltos de diferentes maneras: a) haciendo conjeturas y digitalizando manualmente los puntos, b) omitiendo la digitalización de los puntos ocultos y generando las coordenadas, más tarde, a través de interpolación numérica (por ejemplo interpolación cúbica y/o de suavizado (*spline*) de quinto grado) y c) agregando más cámaras para incrementar la oportunidad de observar los puntos desde al menos dos cámaras en 3-D y de una en 2-D.

La opción *a* no es recomendada; la opción *b* es posible solamente cuando el intervalo perdido es relativamente corto. Generar coordenadas numéricas cuando se oculta o se pierde un intervalo, es parcialmente dispendioso y

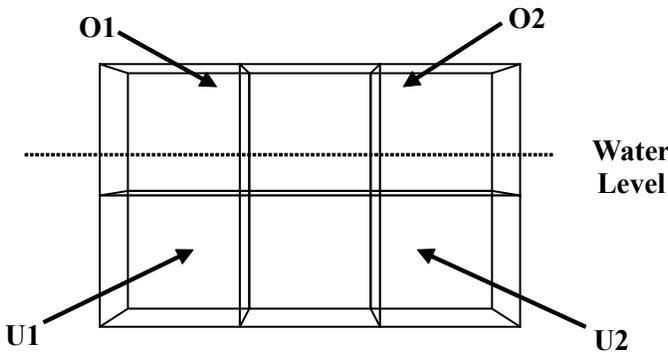
riesgoso. Agregar más cámaras es la solución más fuerte. Las opciones *a* y *b* pueden ser combinadas (Kwon, 1999b, 2001a).

Cuando un gran número de cámaras son usadas, es importante ser conscientes de que la combinación de éstas en la reconstrucción de un punto dado, puede cambiar en la medida en que el movimiento progresa. Pueden producirse como resultado unas discontinuidades en las coordenadas espaciales del objeto, en los cuadros (*frames*) donde la combinación de cámaras cambia. Esto es especialmente cierto cuando la digitalización manual se utiliza sistemáticamente introduciendo errores durante el proceso de digitalización. En algunas situaciones especiales es necesario usar una gran cantidad de cámaras comparada con la cantidad mínima requerida. Por ejemplo, los marcadores retroreflectivos pegados a la superficie del cuerpo pueden solamente ser observados desde ciertas condiciones y es necesario incrementar el número de cámaras para cubrir todos los marcadores (Figura 13). En el análisis de movimiento bajo el agua, no se pueden combinar cámaras submarinas con cámaras sobre el agua, debido a la refracción de la luz en la interfase agua-aire, por lo tanto, debe ser utilizado un número suficiente de cámaras submarinas y cámaras sobre el agua (Figura 14). Los movimientos como el salto de longitud, con un amplio rango de movimiento, requieren varios grupos de cámaras a fin de cubrir todo el desplazamiento con una razonable resolución de imagen y tamaño (Figura 15).

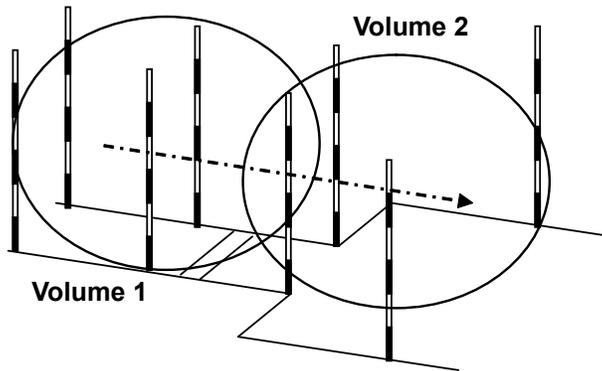
El supuesto fundamental en la reconstrucción del espacio de coordenadas del objeto de uno de sus puntos, es que las coordenadas del plano de la imagen son observadas en todas las vistas de cámara en el mismo instante. Las cámaras con Genlock (dispositivo electrónico-mecánico de sincronización de cámaras) posibilitan simplificar la tarea de obligarlas a todas a activarse y desactivarse al mismo tiempo cuando están conectados correctamente. Sin embargo, sistemas de cámaras de consumo tales como las de vídeo digitales, no tienen la capacidad de Genlock y deben ejecutarse de forma independiente. El sistema ICTO (sigla inglesa para *Inter-Camera Time Offsets*), es un sistema que incluye en la imagen de diferentes cámaras el tiempo empleado y se introduce cuando éstas no están sincronizadas y funcionando de forma individual.



**Figura 13.** Una configuración típica de las cámaras para un análisis de la marcha: un mínimo de seis cámaras son necesarias para cubrir todos los marcadores de superficie pegados al cuerpo. Cámaras F (frontal) y FR (frontal derecho) pueden ser usadas en la reconstrucción de las marcas anteriores en la pierna derecha, mientras que las cámaras FR y RR (parte trasera derecha) lo son para los marcadores secundarios en la pierna derecha. Todos los marcadores posteriores derechos son controlados por la combinación de la cámara de la pierna de RR y R (trasera).

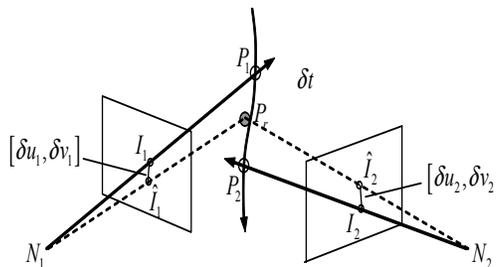


**Figura 14.** Una configuración típica de cámaras para el análisis de movimiento bajo el agua: debido a la refracción de la luz en la interfase agua-aire, cámaras submarinas (U1 y U2) no pueden ser combinadas con las cámaras sobre el agua (O1 y O2) para la reconstrucción. Al menos dos cámaras submarinas y dos sobre el agua son necesarias en 3-D.



**Figura 15.** Una configuración típica de cámaras para el salto de longitud: un tamaño razonable de la imagen puede lograrse mediante el uso de grupos de cámaras múltiples. Un grupo de cámaras del volumen 1 pretenden analizar el enfoque de ejecución, mientras que otro grupo se centran en el volumen 2, para analizar el movimiento de salto. Un marco común de referencia global se utiliza para ambos grupos de cámaras, por lo que la continuidad en el espacio objeto es asegurado automáticamente.

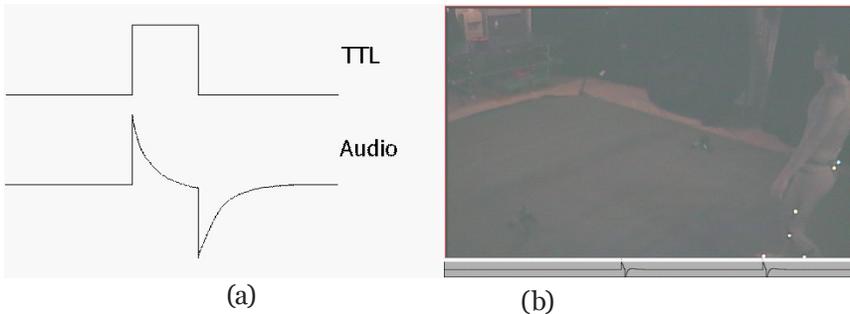
La figura 16 muestra la relación entre el ICTO y el error de reconstrucción. Debido al ICTO, un punto en movimiento en el espacio del objeto será observado por las cámaras en dos lugares diferentes:  $P_1$  en el tiempo  $t$ , y  $P_2$  en el tiempo  $t + \delta t$ . La reconstrucción del punto sobre la base de las coordenadas de la imagen y los parámetros de la TLD genera un punto reformado, situado en algún lugar entre las dos posiciones y el error de reconstrucción resultante puede ser evaluado utilizando E-14. El error de la reconstrucción es básicamente una función de la ICTO, pero la velocidad del punto, un mayor ICTO y un movimiento más rápido, aumenta la separación entre las dos posiciones  $P_1$  y  $P_2$ , haciendo que el punto reconstruido sea más erróneo.



**Figura 16.** Tiempo incluido entre cámaras (ICTO en Inglés) y la exactitud de reconstrucción.

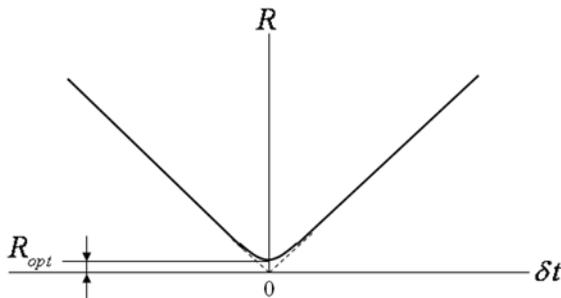
ción: un punto del objeto se mueve en el espacio del objeto. Debido al ICTO, este punto es observado por dos cámaras en diferentes puntos temporales ( $P_1$  en el tiempo  $t$ , y  $P_2$  en el tiempo  $t + \Delta t$ ). Como resultado, se obtienen las coordenadas de la imagen de los puntos  $I_1$  y  $I_2$  y se utilizan en la reconstrucción y el  $P_1$  reformado, situado entre  $P_1$  y  $P_2$ .

Cuando las cámaras no están equipadas con la posibilidad de Genlock, la sincronización exacta de la cámara se puede lograr de dos maneras diferentes: el método de señal de audio (De Barros, Russomanno, Brenzikofer & Figueroa, 2006) y el método de optimización numérica (Christopher, Yoon & Kwon, 2008; Pourcelot, Audigié, Degueurce, Geiger & Denoix, 2000; Yeadon & King, 1999). Dado que durante la captura de vídeo de la señal de audio, se muestrea a una frecuencia mucho mayor (32 kHz o mayor) que la señal de vídeo (50-60 Hz para las cámaras de vídeo digital), la grabación de una señal de audio de forma simultánea en todas las cámaras, durante la captura de vídeo e identificación del momento relativo de la señal de audio entre las cámaras mediante la lectura de sus datos, puede proporcionar una medida precisa de la ICTO (el método de la señal de audio) (Figura 17). La sincronización de los subcampos de cámara es posible con el método de señal de audio. El método de optimización numérica, en cambio, utiliza el error de una reconstrucción basada en el supuesto de que el error de reconstrucción se convierte en mínimo cuando las cámaras están correctamente sincronizadas (Figura 18) (Yeadon & King, 1999).



**Figura 17.** El método de señal de audio: una señal TTL que alimenta a la pista de audio de una videocámara digital y la señal de audio resultante registrada en la pista (a), y la señal de audio extraídos de un campo de vídeo que muestra a dos señales (b). El momento exacto de las firmas de audio dentro del marco de vídeo dado puede ser determinado por la cámara.

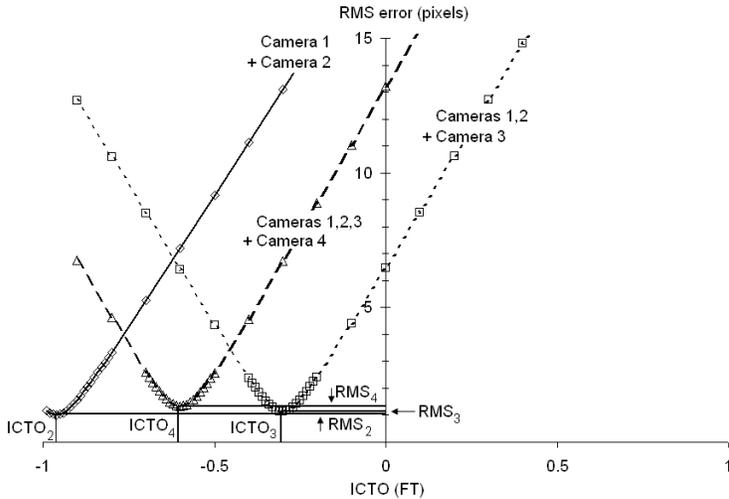
El ICTO entre las dos cámaras puede ser encontrado numéricamente mediante la introducción sistemática y la manipulación de la misma así como con la generación de nuevas series temporales de la imagen de coordenadas de la segunda cámara (Christopher, Yoon & Kwon, 2008; Kwon, Yoon & Sung, 2004; Pourcelot, Audigié, Degueurce, Geiger & Denoix, 2000; Yeadon, 1993). El ICTO que minimiza el error de reconstrucción [E-14] es el ICTO óptimo. La hipótesis principal es que los errores involucrados en la digitalización de las coordenadas de la imagen son insignificantes y la generación de nuevas series temporales de las coordenadas de la imagen no alteran el movimiento investigado.



**Figura 18.** La relación entre el ICTO ( $\delta t$ ) y el error de reconstrucción ( $R$ ): cuando la magnitud de los de ICTO (tanto direcciones positivas como negativas) aumenta, la reconstrucción de error aumenta linealmente. La pendiente de la curva de error de reconstrucción está determinado por la velocidad del punto objeto. El error de reconstrucción se convierte en su mínimo ( $R_{opt}$ ) cuando el ICTO es 0. El mínimo error de reconstrucción se debe a los errores experimentales incluidos en el plano de la imagen y el espacio coordenadas del objeto. Por manipular intencionalmente el ICTO y de forma sistemática, el ICTO real puede encontrarse entre dos cámaras.

Un tema que requiere atención en el método de optimización numérica, es el número de cámaras. Si se utilizan más de dos cámaras, la optimización del ICTO entre todas las cámaras a la vez (la estrategia **de grupo o en masa**) puede tomar una cantidad considerable de tiempo y la estrategia secuencial puede ser usada como una alternativa (Christopher, Yoon & Kwon, 2008). En la estrategia secuencial, sólo el ICTO de una cámara se manipula a la vez para reducir el número de interacciones totales: es decir, en la primera ronda sólo el ICTO de la cámara 2 está optimizado contra la cámara 1. Una vez completada la primera ronda, sólo el ICTO de la cámara 3 es sistemáticamente manipulado

en la próxima ronda contra todas las cámaras sincronizadas (cámaras 1 y 2), y así sucesivamente (Figura 19).

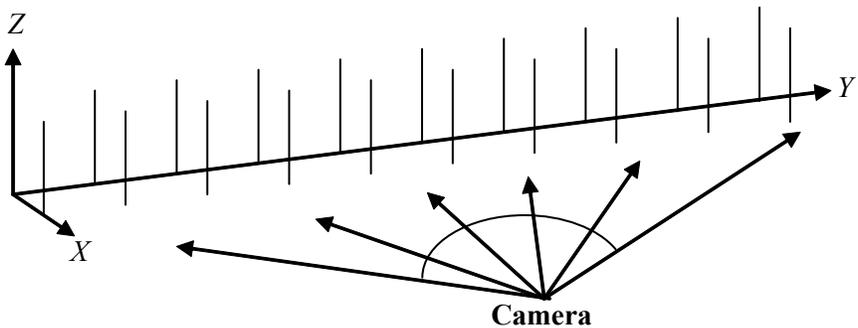


**Figura 19.** La estrategia secuencial de sincronización de la cámara: el ICTO de la cámara 2 está optimizado contra la cámara 1 primeramente, para sincronizar las cámaras 1 y 2. La ICTO de la cámara 3 es entonces optimizada contra las cámaras 1 y 2 que ya están sincronizadas. En cada ronda de optimización, la reconstrucción de error (error RMS) aumenta linealmente a medida que la ICTO se aleja de la ICTO verdadera. El error de reconstrucción optimizado aumenta a medida que se agregan cámaras. FT = tiempo de campo (1 / 60 s).

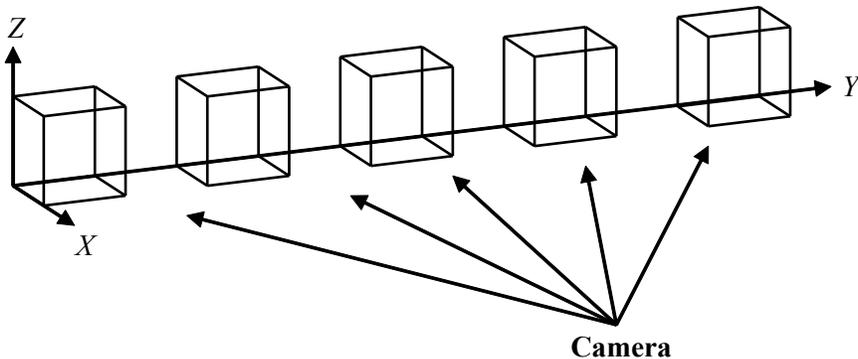
### *Paneo e inclinación de la cámara*

Una forma de aumentar el tamaño de la imagen sin necesidad de añadir cámaras adicionales es el método de encuadre y de inclinación. Dado que las cámaras siguen (por paneo e inclinación) el atleta que se está grabando, un tamaño de imagen relativamente grande puede ser mantenido. Han sido reportados métodos de paneo basados en el método TLD (Yanai, Hay & Gerot, 1996; Yu, Koh & Hay, 1993), en los cuales los parámetros TLD se describen en función del ángulo del paneo, éste se puede medir directamente con trípodes instrumentados o calculados indirectamente desde coordenadas espaciales de un conjunto de puntos de referencia colocados en el volumen-control. Con codificadores de ángulo especialmente diseñados, es posible grabar información del paneo/inclinación sobre la imagen de vídeo y decodificar más tarde el ángulo paneo/inclinación durante el proceso de digitalización.

El aspecto clave del método de paneo basado en TLD (tanto en 3-D como 2-D) es describir los parámetros TLD como funciones del ángulo de paneo. Para ello, se requiere una serie de calibraciones con distintos ángulos de éstos. Hay dos estrategias para llevar a cabo las calibraciones: la estrategia de marco grande y de la estrategia marco pequeño (Kwon, 2001b). La de marco grande se basa en un único marco de calibración de gran tamaño (Figura 20a), mientras que en la de marco pequeño, el marco de calibración debe ser trasladado a varios lugares diferentes y se deben realizar calibraciones separadas en estas posiciones (Figura 20b).



(a)



(b)

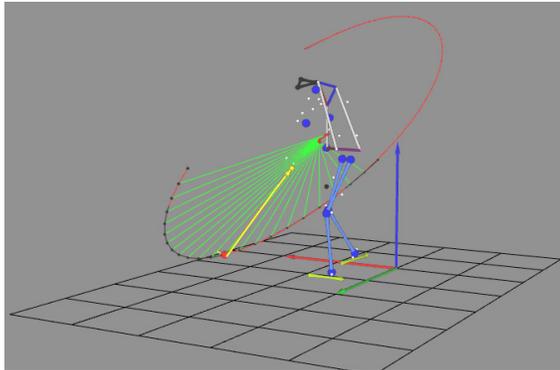
**Figura 20.** Estrategias de paneo con cámara: la estrategia marco grande (a) y la estrategia de marco pequeño (b). Un solo marco de calibración de gran tamaño (barras intercaladas) se utiliza en el marco

de la estrategia general. Los ajustes se repiten en diferentes ángulos de paneo dentro de la variación de éste. Un marco de calibración pequeño, por otro lado, se utiliza en el marco de la estrategia de los pequeños. El marco debe ser colocado en diferentes lugares repitiendo la calibración en cada lugar. Los volúmenes-control definidos por el marco pequeño en diferentes lugares, deben ser intercalados. El marco debe colocarse cuidadosamente para que los pequeños volúmenes-control, en última instancia, formen un único control de volumen grande.

En el proceso de reconstrucción, la posición de paneo de la cámara se determina para cada marco de imagen y los parámetros TLD se calculan sobre la base de sus funciones de parámetro y el ángulo de paneo. Los parámetros calculados TLD se utilizan en el cálculo de coordenadas espaciales/plano del objeto, de los puntos del cuerpo desconocido.

### Temas en la alineación del eje

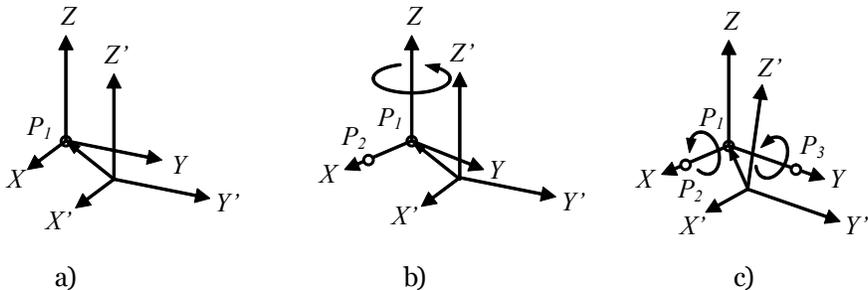
Colocar el origen del sistema de referencia global en la ubicación deseada y/o de alineación de los ejes con la dirección del movimiento, es una estrategia ventajosa ya que puede simplificar considerablemente la presentación de datos y estos pueden ser utilizados para el análisis de la propuesta, sin ulterior transformación o manipulación (Figura 21). En el método TLD, el sistema de referencia utilizado en la descripción de las coordenadas espaciales de los puntos de control marcados en el marco de calibración, es utilizado inicialmente como marco de referencia global. Por esta razón, es importante situar el marco de calibración en las direcciones adecuadas en el volumen de movimiento.



**Figura 21.** El sistema de referencia global en el análisis del plano del *swing* de golf: dado que el eje Y está alineado con la dirección de la meta, los ángulos de orientación (pendiente y ángulo de impacto) del plano de oscilación formado por la cabeza del palo, que se describe en el marco de referencia, llegan a ser muy significativos.

En las situaciones experimentales, sin embargo, la colocación precisa del sistema de calibración es a menudo difícil, debido a problemas prácticos tales como la ubicación física, diseño del marco de la calibración y los límites temporales; por lo tanto, deben ser empleadas estrategias alternativas. El sistema de referencia global puede ser redefinido a través de un procedimiento simple, basado en un conjunto de puntos de referencia utilizados para los fines de alineación del eje: los puntos de eje (Figura 22). Los puntos de eje deben ser colocados estratégicamente en el campo y reconstruidos. Las coordenadas reconstruidas de los puntos del eje pueden ser utilizadas para redefinir la posición y orientación del marco de referencia.

La alineación del eje es especialmente importante cuando los datos de la fuerza de reacción del suelo deben ser combinados con los datos de movimiento para los cálculos de datos más avanzados, como la resultante de los momentos articulares (la dinámica inversa). Ambos conjuntos de datos deben utilizar un marco común de referencia global pudiéndose emplear en este caso la estrategia de dos o de tres puntos (Figura 22) para alinear los puntos de eje colocados en las esquinas de una plataforma de fuerza. Los ejes del nuevo marco de referencia definidos con base en los puntos de eje, situados en las esquinas de la plataforma de fuerza, son paralelos a los de la fuerza de marco de referencia de la plataforma. Translaciones adicionales unificarán los marcos de referencia de ambos conjuntos de datos.



**Figura 22.** Estrategias para la alineación de los ejes: método de un punto (a), método de dos puntos (b), y método de tres puntos (c).  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  son los puntos de eje. El sistema  $X'Y'Z'$  es el marco de referencia definido por el marco de calibración, mientras que el sistema  $XYZ$  es el marco de referencia que se acaba de definir. El método de un punto es sólo para traslación, mientras que el método de dos puntos supone que el eje vertical está alineado correctamente. El método de tres puntos es útil cuando ninguno de los ejes definidos por el marco de calibración está alineado correctamente.

## REFERENCIAS

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1-18. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Cappaert, J. M. Pease, D. L. & Troup, J. P. (1995). Three-dimensional analysis of the men's 100 m freestyle during the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics*, 11(1), 103-112.
- Chen, L. Armstrong, C. W. & Raftopoulos, D. D. (1994). An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *J. Biomechanics*, 27, 493-500.
- Christopher, G. A. Yoon, S. & Kwon, Y. H. (2008). Accuracy of sequential sub-field synchronization of multiple digital camcorders through numerical optimization. *Sports Biomechanics*, 7, 288-295.
- De Barros, R. M. L. Russomanno, T. G. Brenzikofer, R. & Figueroa, P. J. (2006). A method to synchronise video cameras using the audio band. *Journal of Biomechanics*, 39, 776-780.
- Drenk, V. Hildebrand, F. Kindler, M. & Kliche, D. (1999). A 3D video technique for analysis of swimming in a flume. In Sanders, R. H. & Gibson, B. J. (Eds.), *Scientific Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports*, pp. 361-364. Perth, Australia: Edith-Cowan University.
- Hatze, H. (1988). High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *J. Biomechanics*, 21, 533-538.
- Hinrichs, R. N. & McLean, S. P. (1995). NLT and extrapolated DLT: 3-D cinematography alternatives for enlarging the volume of calibration. *J. Biomechanics*, 28, 1219-1224.
- Kwak, C. S. Kwon, Y. H. Kim, E. H. Lee, D. W. & Sung, R. J. (1996). A biomechanical analysis of the run-up paths of selected Korean national high jumpers. *Korean Journal of Sport Science*, 8, 39-51.
- Kwon, Y. H. (1989). *The effects of different control point conditions on the DLT calibration accuracy* (Unpublished class project report): Pennsylvania State University.
- Kwon, Y. H. (1995). *Application of the 2-D DLT method in the underwater motion analysis: a theoretical approach*. Paper presented at the 1995 KNUPE International Sport Science Symposium, Seoul, Korea.
- Kwon, Y. H. (1996). Effects of the method of body segment parameter estimation on airborne angular momentum. *Journal of Applied Biomechanics*, 12(4), 413-430.

- Kwon, Y. H. (1999a). *A camera calibration algorithm for underwater motion analysis*. Paper presented at the XVIIIth International Symposium on Biomechanics in Sports, Perth, Australia.
- Kwon, Y. H. (1999b). Object plane deformation due to refraction in two-dimensional underwater motion analysis. *Journal of Applied Biomechanics*, 15(4), 396-403.
- Kwon, Y. H. (2001a). Experimental simulation of an airborne movement: applicability of the body segment parameter estimation methods. *Journal of Applied Biomechanics*, 17(3), 232-240.
- Kwon, Y. H. (2001b). *New panning-videography strategies for the underwater motion analysis*. Paper presented at the XIX International Symposium on Biomechanics in Sports, Swim Session, San Francisco.
- Kwon, Y. H. (2003). Camera calibration [Electronic Version]. Retrieved May 15, 2009 from <http://kwon3d.com/theory/calib.html>.
- Kwon, Y. H. Ables, A. M. & Pope, P. G. (2002). Examination of different double-plane camera calibration strategies for underwater motion analysis. In Gianikellis, K. E. (Ed.), *Proceedings of XXth International Symposium on Biomechanics in Sports*, pp. 329-332. Caceres, Spain: Universidad de Extremadura.
- Kwon, Y. H. Fortney, V. L. & Shin, I. S. (1990). 3-D analysis of Yurchenko vaults performed by female gymnasts during the 1988 Seoul Olympic Games. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6(2), 157-176.
- Kwon, Y. H. & Lindley, S. L. (2000). Applicability of four localized-calibration methods in underwater motion analysis. In Sanders, R. & Hong, Y. (Eds.), *Proceedings of XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports. Applied program: Application of Biomechanical Study in Swimming*, pp. 48-55. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong.
- Kwon, Y. H. & Sung, R. J. (1995). A comparative biomechanical evaluation of the start techniques of selected Korean national swimmers. *Korean Journal of Sport Science*, 7, 22-34.
- Kwon, Y. H. Yoon, S. & Sung, R. J. (2004). Accuracy of the software genlock with digital camcorders. In *Scientific Proceedings of the XXIIth International Symposium on Biomechanics in Sports*, pp. 64. Ottawa, Canada: University of Ottawa.
- Marzan, G. T. & Karara, H. M. (1975). *A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition, and some applications of it*. Paper presented at the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems, Falls Church, VA.
- Pourcelot, P. Audigié, F. Degueurce, C. Geiger, D. & Denoix, J. M. (2000). A method to synchronise cameras using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 33, 1751-1754.

- Shim, J. Kwon, Y. H. & Newton, R. U. (2001). *Biomechanical analysis of Meridian Elyte shoe in walking and running*. Paper presented at the 2001 Midwest Graduate Biomechanics Symposium, Milwaukee, WI.
- Walton, J. S. (1981). *Close-range cine-photogrammetry: a generalized technique for quantifying gross human motion*. Unpublished Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University, University Park.
- Woo, S. Y. Shin, I. S. & Brown, E. W. (1999). *Evaluation of athletic performance through game analysis of tennis*. Paper presented at the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports, Perth, Australia.
- Wood, G. A. & Marshall, R. N. (1986). The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. *J. Biomechanics*, 19, 781-185.
- Yanai, T. (1999). A method to determine the moment of buoyant force acting on front-crawl swimmers. In Sanders, R. H. & Gibson, B. J. (Eds.), *Scientific Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports* pp. 253-256. Perth, Australia: Edith Cowan University.
- Yanai, T. Hay, J. G. & Gerot, J. T. (1996). Three-dimensional videography of swimming with panning periscopes. *Journal of Biomechanics*, 29(5), 673-678.
- Yeadon, M. R. (1993). The biomechanics of twisting somersaults Part III: aerial twist. *Journal of Sports Sciences*, 11(3), 209-218.
- Yeadon, M. R. & King, M. A. (1999). A method for synchronizing digitized video data. *J Biomech*, 32, 983-986.
- Yu, B. Koh, T. J. & Hay, J. G. (1993). A panning DLT procedure for three-dimensional videography. *Journal of Biomechanics*, 26, 741-751.



# Técnicas de captura óptica para la valoración del desempeño deportivo

Gerald L. Scheirman / Dustin Hatfield\*

Traducción: Gustavo Ramón Suárez\*\* / Dr. José A. Acero J.\*\*\*

## Introducción

Hoy en día hay muchas tecnologías disponibles que se utilizan para cuantificar el movimiento de los deportistas. Sin embargo, las recientes innovaciones en sistemas de captura óptica de movimiento han añadido capacidades sin precedentes, permitiendo que el mismo programa sea utilizado por los entrenadores para dar retroalimentaciones a su técnica, por los médicos para evaluar la recuperación de la lesión de sus atletas, los ingenieros para evaluar cómo interactúan los atletas con los implementos, y por investigadores para estudiar la biomecánica de los movimientos complejos, así como acciones de fuerza de alta velocidad.

## Metodología de captura óptica tridimensional (3D)

Muchos sistemas de captura de movimiento miden el movimiento global humano, incluyendo la fotogrametría (Bergemann, 1974; Marzan & Karara, 1975; Miller & Petak, 1973; Shapiro, 1978), los sistemas optoeléctricos (Greaves, 1983; Scheirman, 1992), el campo magnético (Luo, Niebur & An, 1996), acelerometría (Frisch, 1989; Breniere & Dietrich, 1992; Lafortune, Henning & el Valiant, 1995) o la goniometría (Chao, Laughman, Schneider & Stauffer, 1983; Strathy, Chao & Laughman, 1983). Cada uno de estos diferentes métodos tiene sus propios beneficios y deficiencias. Sin embargo, en la última década, los métodos de optoeléctricos emergieron como la herramienta

---

\* Motion Analysis Corporation, 3617 Westwind Blvd, Santa Rosa, California, USA

\*\* Lic. Educación Física. Médico Cirujano. Mg. Fisiología del ejercicio. Dr. Educación Física. Insituto Universitario de Educación Física. [gusramon2000@yahoo.es](mailto:gusramon2000@yahoo.es)

\*\*\* Lic. Educación Física. Ms. Sc. & Sci. Director científico, Instituto de Investigaciones & Soluciones Biomecánicas. Cali, Colombia. [jacero5@telmex.net.co](mailto:jacero5@telmex.net.co)

preferida para medir el movimiento humano. Los factores responsables de esta preferencia han sido, en gran medida, la excepcional exactitud de la medida y una amplia gama aceptable de equipos de captura de imagen. En la actualidad, las tecnologías optoelectricas capturan el movimiento con chips especializados de alta resolución y usan los procesadores dentro de la cámara para identificar los marcadores reflectivos y calcular sus posiciones en la imagen. Estos marcadores pueden ser discos, hemisferios o esferas que están cubiertas con retro-revestimientos reflectivos. LED infrarrojos registrados por cámaras contrastan con el fondo, permitiéndole al sistema detectar sus posiciones en tiempo real. Las aplicaciones típicas implican cuatro o más cámaras que cubren todo el espacio en el que la acción va a llevarse a cabo, desde uno a cientos de retro-marcadores reflectivos se colocan sobre el sujeto en los sitios de interés para ser rastreados. Las coordenadas 2D se pasan a la computadora, normalmente a través de un Gigabit Ethernet, donde el software del ordenador determina en tiempo real las coordenadas 3D de los marcadores de datos de dos o más cámaras.

Hay una rica historia de la utilización de métodos ópticos para cuantificar el movimiento humano. El método de cámara fija que ha sido más comúnmente utilizado es la transformación lineal directa (TLD o DLT en inglés), que ha sido descrita por Abdel-Aziz & Karara (1971), Van Gheluwe (1978) y Walton (1981). El método se basa en la condición de que existe una relación colineal entre el punto en el espacio, el centro de la perspectiva de la lente de la cámara y la posición de la imagen. Esto se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \\ -c \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}$$

Donde:

- x, y** son las coordenadas de imagen de un punto
- x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>** son las coordenadas de calibrado del punto principal
- c** es la distancia principal de la cámara
- m<sub>ij</sub>** son los elementos de la matriz de rotación
- X, Y, Z** son las coordenadas espaciales del objeto de un punto
- X<sub>o</sub>, Y<sub>o</sub>, Z<sub>o</sub>** son las coordenadas espaciales del objeto del centro de perspectiva

El método consiste en medir el uso de coordenadas tridimensionales y bidimensionales de la pantalla de seis o más puntos no planares en el campo de visión, para calcular los parámetros internos y externos de la cámara, desde dos o más cámaras. Entonces, las coordenadas tridimensionales de puntos desconocidos se calculan con estos parámetros junto con datos de coordenadas de pantalla de al menos dos cámaras. Este método ha sido bien aceptado en el ámbito de biomecánica porque no requiere de equipos costosos o calibrados, permite la flexibilidad de ubicación de la cámara y ha demostrado ser suficientemente preciso. Sin embargo, para algunos volúmenes el método ha demostrado tener limitaciones. Wood & Marshall (1986) demostraron que el método TLD es exacto si el espacio calibrado cubre al menos el 70% del volumen de movimiento. En lugar de utilizar un objeto de calibración fija, los sistemas comerciales emplean ahora una “varilla de calibración” donde una varilla, (que contiene tres o más marcadores cuyas distancias entre ellos son conocidas), es movida durante un período de tiempo a través del espacio de captura. Luego el sistema, interactivamente vuelve a calcular los parámetros internos y externos de la cámara hasta que la media residual de las intersecciones de los rayos disminuya a un valor deseado.

## **Captura del movimiento**

Una vez que se calibran las cámaras, el sistema está listo para capturar los datos de los marcadores colocados en el deportista. Sofisticadas rutinas o plantillas son utilizadas para crear trayectorias de los marcadores en un sistema de referencia cuadro a cuadro en el tiempo y resolver las oclusiones posibles.

Los software ópticos pueden trabajar en tiempo real, permitiendo la visualización inmediata de los datos, o en modo diferido, grabando el movimiento para su posterior análisis. Los datos se pueden mostrar de acuerdo a como se recolecten: marcador de datos en 3D, los datos analógicos y las imágenes de vídeo de referencia, así como el estado actual del sistema. El operador puede ver los datos reconstruidos en un área de trabajo 3D tal como se produce el movimiento, o ver movimientos almacenados con fines de revisión. El sistema Nexus está diseñado para ser fácil de integrar tanto en entornos grandes como pequeños. El diseño modular de los componentes le da una arquitectura totalmente graduable, hecho que permite agregar más capacidad cuando sea necesario. Por ejemplo, un sistema de captura óptica con tres cámaras ha sido utilizado para rastrear los movimientos de las

extremidades durante un salto vertical. Por el contrario, los biomecánicos normalmente utilizan ocho cámaras en el análisis del pateo, o hasta 20 cámaras para evaluar el rendimiento de los deportistas durante maniobras de cambio de dirección o cuando realizan movimientos de velocidad.

También es posible la integración de vídeo digital de referencia para los propósitos cualitativos. Cuando una cámara de vídeo está conectada al PC, ésta puede ser reconocida automáticamente y está disponible de inmediato para la captura de vídeo. Además, la información 3D puede ser superpuesta a la imagen de vídeo, por ejemplo, el vector fuerza de reacción de tierra de una plataforma de fuerza o las posiciones calculadas de un marcador 3D. Este dispositivo es especialmente útil para la visualización de las variables no cinemáticas (por ejemplo, las fuerzas y presiones), de los deportistas, junto con su vídeo.

### **Opciones de cálculo**

Otros componentes de software suministran los cálculos para establecer los puntos virtuales, que son como los centros articulares que se calculan a partir de dos a cuatro marcadores de seguimiento. Estos puntos pueden ser calculados como una distancia fija de los marcadores de seguimiento o como una proporción. Por ejemplo, el centro de la articulación de la rodilla puede ser calculado como una distancia fija de una tríada de marcadores situado en la pierna o en el punto medio entre los marcadores en los cóndilos medial y lateral. Una vez localizadas las articulaciones, se pueden hacer cálculos segmentarios que pueden incluir ángulos simples, velocidades y aceleraciones. Usando estos de una manera más compleja, se pueden calcular completamente, los movimientos en seis grados de libertad, tales como la energía mecánica y el momento angular.

### **Retroalimentación en tiempo real**

Muchas aplicaciones requieren información en tiempo real con una demora muy mínima. Los entrenadores usan retroalimentaciones en tiempo real con los atletas para ayudarles a recuperar más rápidamente su ritmo de marcha. Se utilizan las retroalimentaciones para analizar si ciertas posiciones corporales y los ángulos se han alcanzado y para crear una imagen digital espejo en 3D con el objeto de verla. Los sistemas ópticos pueden generar automáticamente las instrucciones verbales o el estímulo, dependiendo de

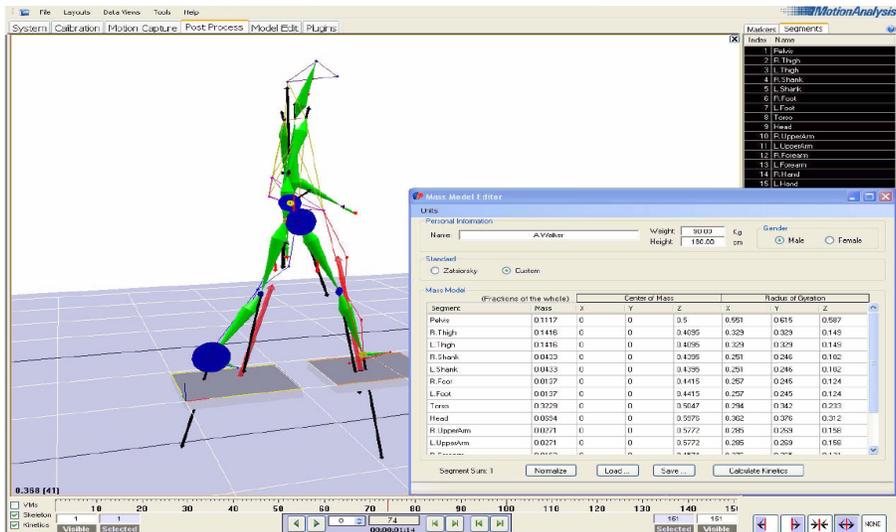
cómo el operador establece los criterios de la retroalimentación. Además, la pantalla se puede configurar para que el deportista pueda ver sus movimientos como una animación en 3D destacando las partes del cuerpo de su interés y así fomentar su foco de atención. Una ventaja distintiva es que la objetividad de la retroalimentación permite al entrenador y al científico del deporte concentrarse en el deportista y no en la calidad de la actividad. Normalmente, el sistema de análisis del movimiento Cortex puede determinar las posiciones 3D del marcador y aplicar los cálculos de modelos biomecánicos con la demora de una muestra.

### **Sincronización con otros sensores**

Las coordenadas tridimensionales de datos a menudo no son suficientes para proporcionar una evaluación completa del movimiento. En consecuencia, los sistemas de captura de movimiento pueden, sincronizadamente, recopilar datos de terceros dispositivos, incluyendo plataformas de fuerza, sensores de presión, guantes de datos, localizadores ópticos, electromiografía (EMG) y otros dispositivos analógicos o digitales, para hacer más mediciones. Por ejemplo, las cámaras de captura de movimiento y plataformas de fuerza, se utilizan a menudo juntas para estudiar la técnica de carrera y los cambios de dirección. Usando un proceso de dinámica inversa con estos datos, las ecuaciones pueden ser desarrolladas para calcular las fuerzas, momentos, y potencia en el tobillo, la rodilla y la cadera. Los biomecánicos pueden utilizar estos datos para determinar el potencial de una lesión, la asimetría y la debilidad muscular.

### **Evaluación de fuerza sin plataformas de fuerza**

La plataforma de fuerza es un instrumento común que se encuentra en los laboratorios de biomecánica. Sirven para medir la fuerza de reacción de la tierra, la cual representa la fuerza aplicada contra el suelo para cambiar la dirección del movimiento del centro de gravedad del cuerpo. Los datos cinéticos obtenidos a partir de las plataformas de fuerza, junto con los datos de captura de movimiento cinemático, permiten a los investigadores llevar a cabo en sus deportistas el análisis de movimiento de todo el cuerpo en tres dimensiones. Actualmente hay pocas oportunidades para estudiar el movimiento humano fuera de un ambiente de laboratorio, debido a las restricciones establecidas por los mismos equipos (plataformas de fuerza). Proporcionar una metodología que permita a los investigadores estudiar el movimiento humano integral en

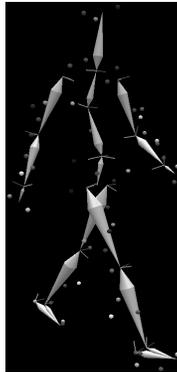


**Figura 1:** Pantalla de Informática de un kinegrama articulado con vectores de fuerza de reacción del suelo (en rojo), las fuerzas conjuntas (vectores negro) y momentos de articulación (discos azules).

condiciones de laboratorio permitiría estudiar de manera comprensiva en condiciones de campo (fuera del laboratorio) temas que sólo se pueden realizar en entornos reales y posiblemente, ampliar el tipo de investigación que se realiza. La dinámica prospectiva es un método de cálculo de la fuerza y de momento articular, la cual emplea datos calculados a partir de la cinemática, que podrían ofrecer a los investigadores, las herramientas necesarias para realizar este tipo de análisis complejos en cualquier ambiente.

Algunos estudios han utilizado parámetros cinemáticos para estimar la fuerza de reacción del suelo (FRS o GRF en inglés) (Delooze et al. 1992; Kingma et al. 1996; Koopman et al. 1995, Ren et al. 2008; van den Bogert & Su, 2008), pero sólo uno (Ren et al. 2008) ha analizado datos triaxiales de fuerza de reacción sobre el terreno, de ambas extremidades en apoyo doble en la marcha. Los datos GRF calculados, utilizando el método descrito por Ren et al. (Ren et al. 2008), se encontraron en estrecha relación con los datos reales GRF medidos. El propósito de este trabajo es presentar un método novedoso para el cálculo de datos triaxiales de la GRF en posición de doble apoyo, a partir de datos cinemáticos, sin usar los datos de la plataforma de fuerza. Este método estará comercialmente disponible para ser utilizado en conjunción con un sistema tridimensional de captura de movimiento.

Ocho sujetos fueron instruidos para caminar a  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , similar a la velocidad normal de la marcha de adultos sanos (Finley & Cody, 1970), hasta que se completaron cinco ensayos con éxito. Datos cinemáticos fueron capturados utilizando ocho cámaras digitales Eagle (Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, EE.UU. 60 Hz) y recolectados utilizando Software Cortex v. 1.1.4.368 (Motion Analysis Corporation). Los datos de fuerza de reacción de la tierra fueron recogidos mediante dos plataformas de fuerza con sensores tipo *strain gauge* (AMTI, Watertown, MA, EE.UU.; 960 Hz).

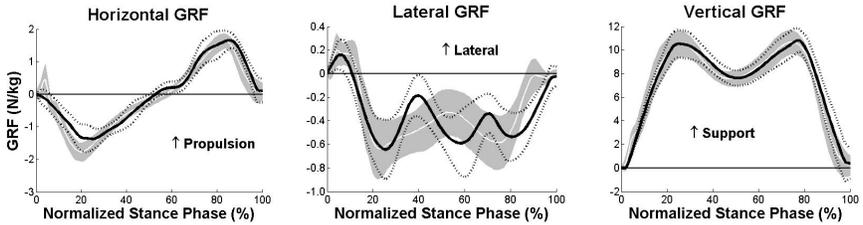


**Figura 2:** Configuración de marcadores y definición de segmentos usados en el estudio.

Un conjunto de marcadores modificados de Cleveland Clinic fueron usados para rastrear el movimiento del cuerpo en tres dimensiones, mediante un conjunto de 65 esferas retro-reflectivas de 9 mm. Un modelo tridimensional completo del cuerpo de 18 segmentos, fue definido usando segmentos rígidos que contenían grupos de cuatro marcadores, colocados en cada extremo del segmento (Cappozzo et al. 1997).

Los eventos del impacto del talón y despegue del pie, fueron determinados a partir de los cuadros que presentaron la mayor aceleración vertical para el respectivo marcador del talón. Después de que los acontecimientos fueron identificados, se midieron los datos GRF a través del sistema Cortex y fueron analizados utilizando el software KinTools RT (Motion Analysis Corporation). Se realizó un análisis dinámico prospectivo, similar al método utilizado en el análisis cinético de la extremidad superior en el pitcheo (Fleisig et al. 2006; Loftice et al. 2004).

En la Figura 3 se muestran los datos calculados de GRF mediante el método de dinámica prospectiva, junto con los datos de GRF medidos directamente por plataformas de fuerza. Los datos GRF (Newtons) fueron normalizados con el peso corporal (kg).



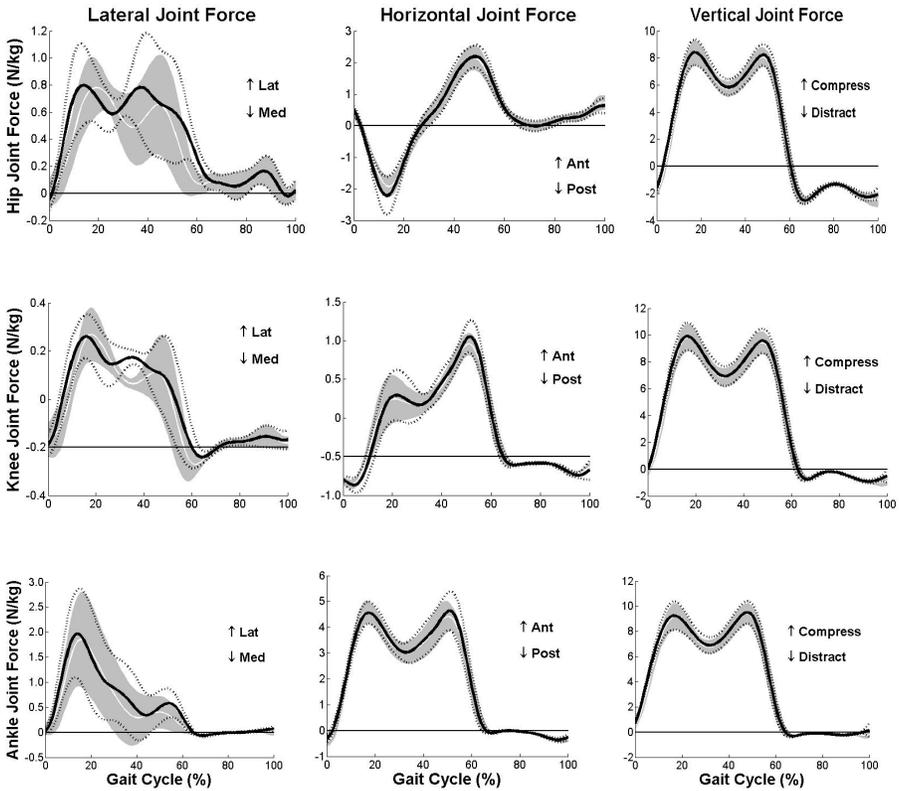
**Figura 3:** Media de datos calculada de GRF (línea de color negro sólido)  $\pm 1$  desviación estándar (línea negro de puntos) vs media de datos medidos de GRF (línea blanca)  $\pm 1$  desviación estándar (área gris) para los sujetos caminando a  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Los datos de GRF están normalizados con el peso corporal y presentados durante la fase de apoyo.

En la tabla 1 se presentan el análisis RMSE de la media calculada y datos medidos de GRF.

GRF	RMSE ( $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
	Horizontal	Lateral	Vertical
	0.23 (0.166)	0.16 (0.062)	0.52 (0.843)

**Tabla 1:** Los valores RMSE (media (DE)) de GRF calculada vs datos GRF medidos para los sujetos a pie de  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Las fuerzas de reacción del suelo calculadas, fueron utilizadas junto con los datos de posición segmentaria para calcular las fuerzas articulares. La Figura 4 muestra las curvas de la media y la desviación estándar de las fuerzas conjuntas calculadas a partir de la reacción de las fuerzas de tierra, así como la media y desviación estándar de las curvas calculadas a partir de las fuerzas medidas de reacción de la tierra.



Lat = Lateral; Med = Medial; Ant = Anterior; Post = Posterior; Compress = Compresión; Distract = Descompresión; Gait = Marcha; Cycle = Ciclo; Joint = Articulación; Force = Fuerza; Hip = Cadera; Knee = Rodilla; Ankle = Tobillo.

**Figura 4:** Media de los datos de la fuerza conjunta calculada (línea de color negro sólido)  $\pm$  1 desviación estándar (línea negra de puntos) vs media de datos medidos de la fuerza conjunta (línea blanca)  $\pm$  1 desviación estándar (zona gris) para los sujetos que caminaron a  $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Los datos de la fuerza articular son normalizados con el peso corporal y se presentan en un ciclo de la marcha completa.

El análisis de RMSE de la media calculada y los datos la fuerza articular medida se presentan en la tabla 2.

Fuerzas articulares	RMSE (N·kg <sup>-1</sup> )		
	Hip	Knee	Ankle
Lateral	0.13 (0.026)	0.13 (0.024)	0.14 (0.031)
Horizontal	0.11 (0.029)	0.09 (0.014)	0.10 (0.015)
Vertical	0.24 (0.129)	0.24 (0.142)	0.24 (0.132)

**Tabla 2:** Los valores RMSE (media (DE)) para fuerzas articulares calculadas vs datos la fuerza articular medida de los sujetos caminando a 1,3 m•s<sup>-1</sup>.

Los resultados mostraron que los datos calculados de GRF presentaron una buena relación con los datos medidos y demostraron la capacidad de un modelo de dinámica prospectiva para reproducir la GRF en datos medidos durante la marcha normal. El método se aplica a la ejecución, el equilibrio, tacos de salida y otras actividades.

## Conclusión

Los sistemas ópticos de captura de movimiento proporcionan una base sólida para el análisis biomecánico de la técnica deportiva y para el entrenamiento. La adición de un software sofisticado con la capacidad de captura en tiempo real ha transformado estos sistemas de la mera coordinación de sistemas de adquisición a herramientas para el técnico y científico del deporte las cuales pueden utilizar regularmente para vigilar y mejorar las técnicas de los deportistas. Además, pueden determinar el potencial de una lesión y hacer modificaciones, incluso antes de ésta. Los sistemas ópticos proporcionan datos objetivos que pueden ser comparados con las actuaciones de otros atletas o con actuaciones anteriores propias, con el fin de asegurar que el programa de entrenamiento esté produciendo los resultados deseados. A menudo, el mejoramiento necesario es sutil y difícil de identificar con la simple visión o la observación de clips de vídeo grabados, no así para los sistemas ópticos que pueden proporcionar la opción de magnificar la técnica para que el entrenador y el científico del deporte puedan utilizarla como ayuda para cada uno de sus atletas.

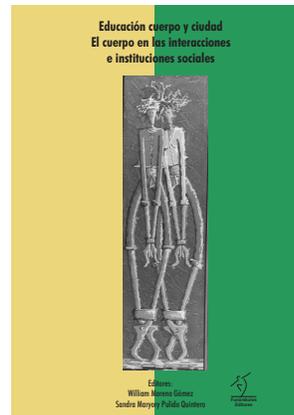
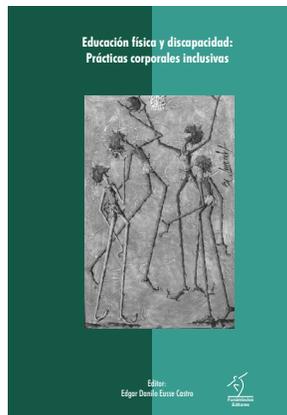
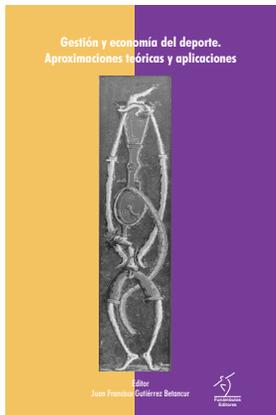
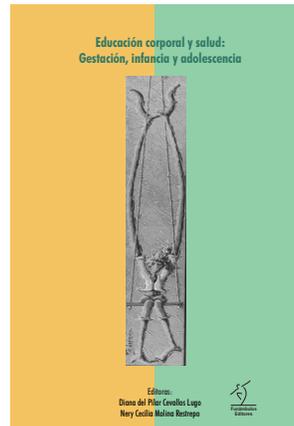
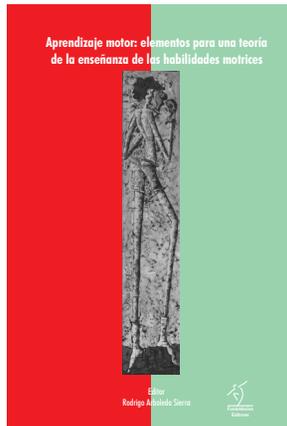
## REFERENCIAS

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In Proceedings of the ASP/UI Symposium. *Close-Range Photogrammetry*, 1-18. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Bergemann, B. W. (1974). Three-dimensional cinematography: A flexible approach. *Research Quarterly*, 45, 302-309.
- Cappozzo, A. Cappello A. DellaCroco U. & Pensalfini, F. (1997). Surface-marker cluster design criteria for 3D bone movement reconstruction. *IEEE Transactions Biomedical Engineering*, 44/12, 1165-1174.
- Chao, E. Y. Laughman, R. K. Schneider, E. & Stauffer, R. N. (1983). Normative data of knee joint motion and ground reaction forces in adult level walking. *J. of Biomechanics*, 16, 219-233.
- Deloof M. P. Kingma I. Bussmann J. B. J. & Toussaint H. M. (1992). Validation of a dynamic linked segment model to calculate joint moments in lifting. *Clinical Biomechanics*, 7/3, 161-169.
- Finley F. R. & Cody K. A. (1970). Locomotive characteristics of urban pedestrians. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 51/7, 423-426.
- Fleisig, G. S. Kingsley, D. S. Loftice, J. W. Dinnen, K.P. Ranganathan, R. Dun S. et al. (2006). Kinetic comparison among the fastball, curveball, change-up, and slider in collegiate baseball pitchers. *American Journal of Sports Medicine*, 34/3, 423-430.
- Frisch, P. H. (1989). Design of a fully instrumented human analog for the study of human biodynamic response to transitory acceleration. *SOMA: engineering for the human body*, 3, 37-44.
- Greaves, J.O.B. (1983). State of the Art in Automated Motion Tracking and Analysis Systems. *SPIE High Speed Photography, Videography, and Photonics IV*, 693, 277-279.
- Karara, H. M. & Abdel-Aziz, Y. I. (1974). Accuracy aspects of non-metric imageries. *Photogrammetric Engineering*, 40, 1107-1117.
- Kingma, I. de Looze, M. P. Toussaint, H. M. Klijnsma, H. G. & Bruijnen, T. B. M. (1996). Validation of a full body 3D dynamic linked segment model. *Human Movement Science*, 15/6, 833-860.
- Koopman, B. Grootenbour, H. J. & Dejongh, H. J. (1995). An inverse dynamics model for the analysis, reconstruction and prediction of bipedal walking. *Journal of Biomechanics*, 28/11, 1369-1376.
- Lafortune, M. A. Henning, E. & Valiant, G. A. (1995). Tibial shock measured with bone and skin mounted transducers. *J. of Biomechanics*, 28, 989-993.

- Loftice, J. Fleisig, G. S. Zheng, N. & Andrews, J. R. (2004). Biomechanics of the elbow in sports. *Clinics in Sports Medicine*, 23/4, 519-530.
- Luo, Z. Niebur, G. L. & An, K. (1996). Determination of the proximity tolerance for measurement of surface contact areas using a magnetic tracking device. *J. of Biomechanics*, 29, 367-372.
- Marzan, G. T. & Karara, H. M. (1975). A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition and some applications of it. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry. Urbana, Illinois, 420-476.
- Miller, D. I. & Petak, K. L. (1973). Three-dimensional cinematography. In *Kinesiology III 1973*, pp. 14-19. Edited by C.J. Widule. Washington, D.C.: American Association for Health, Physical Education, and Recreation.
- Ren, L. Jones, R. K. & Howard, D. (2008). Whole body inverse dynamics over a complete gait cycle based only on measured kinematics. *Journal of Biomechanics*, 41, 2750-2759.
- Shapiro, R. (1978). Direct linear transformation method for three-dimensional cinematography. *Research Quarterly*, 49, 197-205.
- Scheirman, G. L. (1992). Methods for analyzing biomechanics using video and personal computers. In Proceedings of volume 1757. The International Society for Optical Engineering. (chair/editor Snyder, D.R.) 298-304. 20-22. July 1992, San Diego, California.
- Strathy, G. M. Chao, E.Y. & Laughman, R. K. (1983). Changes in knee function associated with treadmill ambulation. *J. of Biomechanics*, 16, 517-522.
- van den Bogert, A. J. & Su, A. (2008). A weighted least squares method for inverse dynamic analysis. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 11/1, 3-9.
- van Gheluwe, B. (1978). Computerized three-dimensional cinematography for any arbitrary camera setup. In E. Asmussen & K. Jorgensen (Eds.), *Biomechanics VI*, 343-348. Baltimore: University Park Press.
- Walton, J. S. (1981). Close-range cine-photogrammetry: a generalized technique for quantifying gross human motion. Unpublished doctoral dissertation, Pennsylvania State University, University Park, PA.
- Wood, G. A. & Marshall, R. N. (1986). The accuracy of the DLT extrapolations in three-dimensional film analysis. *J. of Biomechanics*, 19, 781-785.



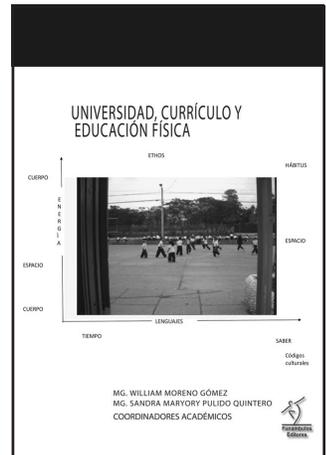
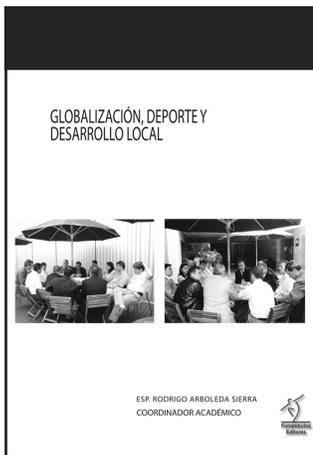
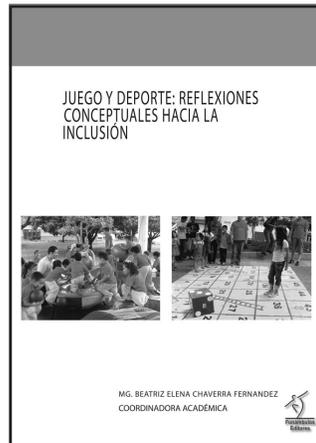
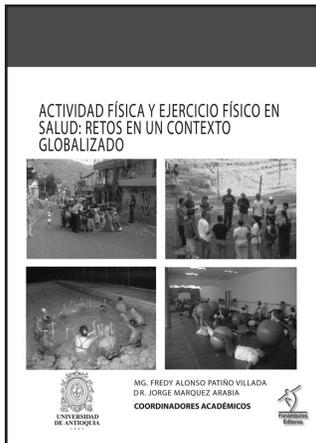
## Serie Expomotricidad 2007



Informes y ventas: [revista@edufisica.udea.edu.co](mailto:revista@edufisica.udea.edu.co)

Tel.: (57-4) 219 92 65

## Serie Expomotricidad 2009





## INDEPORTES ANTIOQUIA

Cada deportista al ejecutar sus correspondientes gestos deportivos, implícitamente quiere emular el patrón o "técnica ideal" que le fue enseñado y entrenado. Pero indudablemente, por las teorías modernas de control motor y su aplicabilidad en la biomecánica deportiva, este gesto perfecto no existe, dado el gran componente de variabilidad que tiene cada movimiento humano. La biomecánica revisa la importancia de la variabilidad en los gestos y el entrenamiento deportivo y propone, inicialmente, un modelo integral de análisis biomecánico que incluye ponderadamente los principios de la variabilidad moderna. En la última década de la investigación biomecánica se han establecido tendencias tradicionales de la variabilidad, entendiendo que la variación de un patrón de movimiento en el deporte es considerado como un error o un ruido que debe eliminarse. La teoría de los sistemas dinámicos (TSD) ha surgido como un marco viable para interpretar la variabilidad como una fuente de información que influye en las re-adaptaciones continuas del deportista, creándose así un gran repertorio de movimientos que resuelven los requerimientos actuales.

José Acero.

ISBN: 978-958-714-306-5



9 789587 143065



GRICAFDE

Grupo de Investigación en  
Ciencias Aplicadas a  
la Actividad Física  
y el Deporte

Asesoria y Consultoría