



AUTOR

LIC. PABLO CABAÑES

kinepablo55@gmail.com



Kinesiólogo y Biomecanicista de la Selección Argentina de Natación Paralímpica

Jefe de Trabajos Prácticos de Biomecánica y Anatomía Funcional- UBA

ANÁLISIS BIOMECÁNICO EN LA NATACIÓN PARALÍMPICA

RESUMEN

La Natación Paralímpica está dotada de una importante complejidad, ya que el atleta debe optimizar su funcionalidad en cada estilo de nado en busca de un gesto motor eficiente que le permita cumplir la prueba en el menor tiempo posible, siendo el análisis biomecánico cualitativo y cuantitativo resulta un pilar fundamental para lograrlo.

A principios del año 2019, se llevó a cabo el desarrollo de un esquema de análisis biomecánico y seguimiento de integrantes de la Selección Argentina de Natación Paralímpica. El objetivo fue implementar correcciones biomecánicas que llevaran al perfeccionamiento personalizado de los gestos motores, y con ello, a la mejora significativa de las marcas de cada atleta con vistas a su participación en los Juegos Parapanamericanos Lima 2019.

PALABRAS CLAVE

Fenómenos Biomecánicos, Cinemática, Variabilidad, Deporte

La Natación Paralímpica en el mundo:

La palabra "paralímpico" deriva de la preposición griega "para" (al lado) y la palabra "olímpico". Su significado es que los Paralímpicos son los Juegos paralelos a los Juegos Olímpicos e ilustran cómo los dos movimientos existen uno al lado del otro.

La Natación Paralímpica se rige por el Comité Paralímpico Internacional (IPC) y es coordinado por el Comité Técnico Mundial de Natación, utilizando las reglas modificadas de la Federación Internacional de Natación (FINA).¹

El análisis biomecánico permite observar en detalle las características individuales de los atletas paralímpicos, buscando mejorar la eficiencia en la ejecución de los gestos motores propios de cada estilo y prevenir futuras lesiones, es por eso que se la considera una herramienta fundamental en el alto rendimiento deportivo.²

Estudios de grandes potencias a nivel internacional, dan evidencia de la implicancia directa del análisis cinemático en el rendimiento de sus nadadores de elite.³ En nuestro país, hasta el momento, no existe información publicada sobre éste tema.

Ésto motivó el desarrollo de una observación sistemática basada en capturas de imágenes, videos y recolección de los datos para su posterior análisis, con el objetivo de realizar un seguimiento de los atletas con vistas a los Juegos Parapanamericanos de Lima 2019.

Mi experiencia:

El estudio se extendió durante los meses de Enero a Agosto de 2019, fué realizado en el Natatorio Jeanette Campbell ubicado en el Centro Nacio-

nal de Alto Rendimiento Deportivo (CENARD) de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, durante las sesiones de entrenamiento del plantel superior de la Selección Argentina de Natación Paralímpica. Debido a las características del mismo no fue necesaria la aprobación de un comité de ética y todos los participantes aceptaron participar voluntariamente.

Las capturas en superficie fueron adquiridas con una cámara digital fija Panasonic® Modelo Lumix DMC-FH5 Mega OIS (Optical Image Stabilizer) 16 Megapíxeles formato HD, montada sobre un trípode telescópico de alturas regulables Braun®. Las capturas subacuáticas fueron obtenidas con una cámara Go Pro® Hero 4®. Se estableció un sistema de referencias mediante elementos de orientación externos e internos con el fin de obtener una imagen de video calibrada con máxima precisión y en las futuras mediciones mantener las distancias del montaje (set-up) para evitar las variaciones. El procesamiento de los videos y el análisis cinemático fue realizado con el software libre Kinovea® versión 0.8.27. Los resultados obtenidos fueron volcados a una base de datos para su posterior cuantificación e interpretación.

Biomecánica Deportiva:

Es bien conocida en el ámbito de la kinesiología deportiva la importancia del análisis biomecánico, como un primer abordaje veamos cómo la define el Instituto de Biomecánica de Valencia: " Conjunto de conocimientos interdisciplinarios generados a partir de utilizar, con el apoyo de otras ciencias biomédicas, los conocimientos de la mecánica y distintas tecnologías en el estudio del comportamiento de los sistemas biológicos (en particular del cuerpo humano) y resolver los problemas que le provocan las distintas condiciones a las que puede verse sometido".⁴

Así es cómo la Biomecánica Deportiva relaciona la anatomía funcional con la energía necesaria para la ejecución del gesto motor, analizando al cuerpo humano en movimiento por las leyes físicas en busca de optimizar su rendimiento. Recordemos entonces las tres condiciones para la existencia de movimiento:⁴

- Que haya un *objeto* en movimiento: cuerpo del deportista
- Que se lleve a cabo en un *medio*: suelo, aire, agua/ condiciones climáticas
- Enmarcado en un sistema de referencias: espacio y tiempo

También consideraremos al desempeño físico como la posibilidad de acción mecánica del sistema y diremos que el gesto motor analizado será *efectivo* cuando logra cumplir con el fin que se propone, será *eficaz* cuando lo realice en el menor tiempo y será *eficiente* cuando lo ejecute con el menor consumo energético posible.

Una rama de la Mecánica es la Cinemática, quien estudia el movimiento sin importar las fuerzas que lo generan y para ello se observan variables:^{4,5}

- Temporales: tiempo, frecuencia y período
- Espaciales: distancia y desplazamiento

“

El análisis biomecánico permite observar en detalle las características individuales de los atletas paralímpicos, buscando mejorar la eficiencia en la ejecución de los gestos motores propios de cada estilo. ”

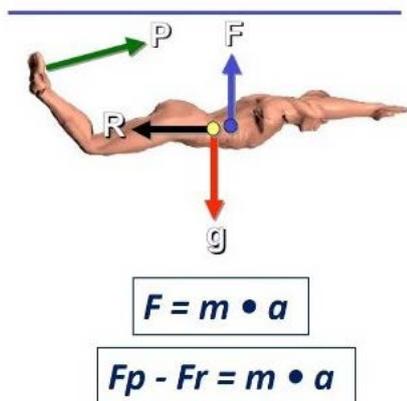


FIGURA 1: Sistema multifactorial

“
 La variabilidad en el movimiento humano no debe ser concebida como un factor negativo sino como un factor funcional que aporta al rendimiento deportivo.”

- Espacio-temporales: velocidad, rapidez y aceleración

Como veremos más adelante, el análisis cinemático fué dividido en dos instancias:

*Análisis Cualitativo: durante el cual se establecieron variables relevantes relacionadas a la calidad de ejecución del gesto y su impacto en la eficiencia de nado.

- Partidas altas y bajas
- Fase de nado
- Giros/vueltas

*Análisis Cuantitativo: se realizaron tomas de tiempos parciales y totales durante entrenamientos y competiciones nacionales e internacionales. Su posterior análisis e interpretación de resultados brindó un panorama detallado del rendimiento de los atletas.

- Análisis de carrera/prueba

Figura 1. Sistema multifactorial:

El siguiente paso fué realizar un diagrama de cuerpo libre para determinar la incidencia de distintos factores en la eficiencia del gesto motor:

- Fuerza de gravedad
- Fuerza de flotación
- Fuerza de propulsión
- Fuerzas de resistencia hidrodinámica al avance

“La interacción entre la fuerza propulsiva (Fp) y la de resistencia (Fr) se produce porque la propulsión provoca el desplazamiento del cuerpo y cuando hay desplazamiento aparece la resistencia hidrodinámica. A más resistencia, más propulsión es necesaria para mantener la velocidad corporal o aumentarla.

Por tanto, bien sea el desplazamiento generado por autopropulsión o por el impulso en la pared de la piscina, la relación entre la propulsión y la resistencia se puede expresar por la siguiente ecuación: $F_p - F_r = m \cdot a$

Dónde Fp es el impulso obtenido por las extremidades o el cuerpo, y Fr es la suma de los diferentes tipos de resistencia que ofrece el nadador, m es la masa corporal y a la aceleración producida por las fuerzas aplicadas. Durante el ciclo motor de cualquiera de los estilos de competición existen momentos en que el cuerpo es acelerado o es desacelerado, en función de la mayor o menor aplicación de las fuerzas propulsivas y la posición del cuerpo que puede reducir o aumentar la resistencia, como así también la forma corporal.”⁵

Debido a esto y dependiendo de las características de la patología de base y la capacidad funcional de cada atleta, veremos por ejemplo que aquellos con lesiones medulares, Mielomeningocele, Parálisis Braquial Obstétrica, amputaciones o agenesias, tendrán que vencer una mayor resistencia al avance por forma.

(Aclaración: para un análisis integral del gesto motor deportivo, deberán considerarse además de los aspectos biomecánicos, los neurofisiológicos y psicomotrices que exceden a los objetivos de ésta revisión narrativa.)

Variabilidad:

Para desarrollar el análisis biomecánico de cada gesto, se tomaron como referencia las bases técnicas de los estilos de nado convencional. En éste punto quiero resaltar un concepto a tener muy presente, en 1967, el gran científico del comportamiento motor, Nikolai A. Bernstein, quien pretendía explicar cómo los animales encuentran y optimizan las soluciones a los problemas motores afirmó que "la práctica es un tipo particular de repetición sin repetición".⁶ Así decía que: "El proceso de práctica hacia el logro de nuevos hábitos motores consiste esencialmente en el éxito gradual de una búsqueda de soluciones motoras óptimas a los problemas apropiados".⁶ Además, "La práctica, cuando se lleva a cabo correctamente, no consiste en repetir los medios de solución de un problema motor una y otra vez, sino en el proceso de resolver este problema una y otra vez mediante técnicas que cambiamos y perfeccionamos de repetición en repetición".⁶ Asimismo, el Dr. Suarez G.R (2009),⁷ profundiza éste importante enfoque, explicando que "la variabilidad en el movimiento humano puede ser conceptualizada como las variaciones normales que ocurren en la ejecución motora a través de múltiples repeticiones de un gesto. Desde ésta 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, 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."⁷

Entonces, si el control motor durante la ejecución de un gesto de nado convencional estará sujeto a ésta variabilidad, no tendrá sentido buscar un "patrón unificado" de movimientos en el análisis de los nadadores paralímpicos y no deberemos esperar que dos nadadores con la misma clasificación funcional y/o patología de base ejecuten ciclos de nado similares. Esta mirada resultó muy importante para entender el carácter individual del análisis personalizado de cada atleta y la imposibilidad de establecer "estándares ideales" aplicables según categoría o discapacidad.

ANÁLISIS CUALITATIVO

Partidas

Resulta de gran importancia analizarlas debido a que representan el 25% del total del tiempo en carreras de 25 m, el 10% en las de 50 m y el 5% en las de 100 m.

Se realizan desde plataformas o partidores homologados a partir de los

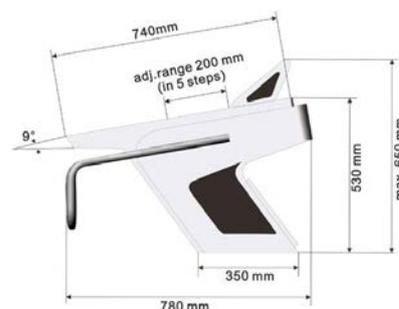


FIGURA 2: dimensiones homologadas



FIGURA 3: plataforma utilizada en el Cenard



FIGURA 4 Y 5:
Trabajo de propiocepción apoyos en nadador ciego sobre plataforma de partida alta

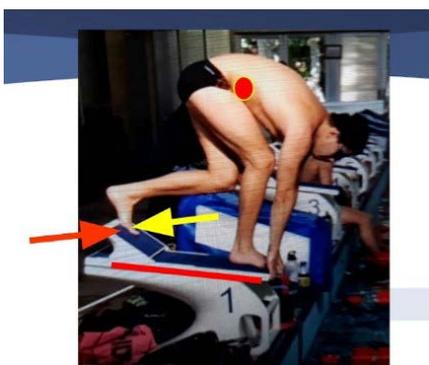


FIGURA 6:
Leyes de Newton aplicadas a la partida alta

Figuras 2 y 3

Juegos Olímpicos de Beijing 2008, " la Federación Internacional de Natación (FINA) introdujo un nuevo bloque de salida (OSB11, Corgémont, Suiza) caracterizado por tener agregado en la parte trasera de la superficie de la plataforma un apoyo inclinado ajustable, con el objetivo de que el nadador se impulsara más explosivamente".⁸

Las partidas fueron divididas para su análisis:

- Según prueba:
 - Altas: desde arriba de la plataforma. Para estilos de Crol, Pecho y Mariposa.
 - Bajas: desde el agua con un partidador como accesorio para apoyar los pies, de altura regulable.
 - Según categoría:
 - Visuales: disminuídos visuales y ciegos
 - Motores
- Para un minucioso análisis, el gesto motor fue dividido en cuatro fases y en cada una de ellas, se establecieron variables relevantes:
- Impulso: comienza con la señal de partida
 - Despegue: hasta que finaliza el contacto pies/plataforma
 - Vuelo: nadador en fase aérea
 - Entrada al agua: contacto de la punta de los dedos de la mano con la superficie del agua

a) Partidas altas en visuales

La principal dificultad a la que se enfrenta el nadador ciego o disminuido visual, es lograr una óptima posición corporal sobre la plataforma de partida. **Figura 4 y 5**

Para superarla resulta fundamental implementar trabajos de estímulos propioceptivos progresivos, en distintas posiciones (sentado, apoyo monopodal, bipedestación) y en última instancia sobre la misma plataforma.

Podemos analizar aquí la interacción de las tres leyes de Newton:

- La alineación segmentaria del atleta buscará posicionar su Centro de Gravedad (punto rojo) lo más anteriorizado posible respecto a la base de sustentación (línea roja), para de ésta manera generar un equilibrio inestable, el cuál requerirá de una fuerza de menor intensidad para modificar su estado físico de reposo a movimiento (1ra Ley- Inercia).
- El pié trasero imprimirá al movimiento una aceleración directamente proporcional a la fuerza ($F=m.a$) e inversamente proporcional a la masa (2da Ley).
- Debido a esa fuerza aplicada sobre el taco trasero de la plataforma (flecha amarilla) , ésta le devolverá otra con igual magnitud y sentido contrario (flecha roja) (3ra Ley - Acción y reacción).

b) Partidas altas en amputados de Miembros Inferiores

El desafío en el análisis cinemático de éste gesto fué identificar las fuerzas propulsoras ante la ausencia del pié trasero:



FIGURA 7

- Vemos como durante la fase de impulso, la pierna del nadador realiza un movimiento osteocinemático de balanceo, la Unidad Biomecánica (UBM) del Tobillo describe una artrocinemática en cadena cerrada durante la cual la mortaja Tibioiperónea rueda y desliza en sentido anterior sobre la polea astragalina (Ley del Convexo-Cóncavo).
- Por su parte, los Miembros Superiores actuarán como cadenas cinemáticas cerradas por la toma de ambas manos en la plataforma, permitiendo que los extensores de la UBM Hombro principalmente el músculo Dorsal Ancho (flecha roja) se active de manera concéntrica tomando punto fijo en su inserción distal, logrando de ésta manera impulsar el tronco del nadador hacia adelante. (Figura 8)

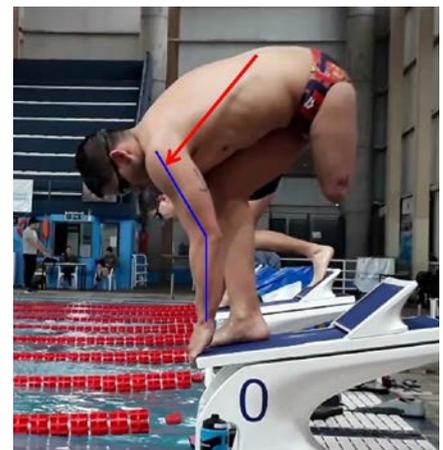


FIGURA 8

Complementando nuestro análisis, nos enfocamos en la relación Estructura-Función: ¿Cómo impactará la alteración morfológica articular en la función?

Se realizaron evaluaciones analíticas como los test de movilidad articular activa (ROM) :

Como sabemos, en condiciones normales la Tróclea Astragalina tiene forma de un segmento de cilindro de alrededor de 105° y la mortaja Tibioiperónea tiene forma de un semicilindro de 65° cubriendo más de la mitad de

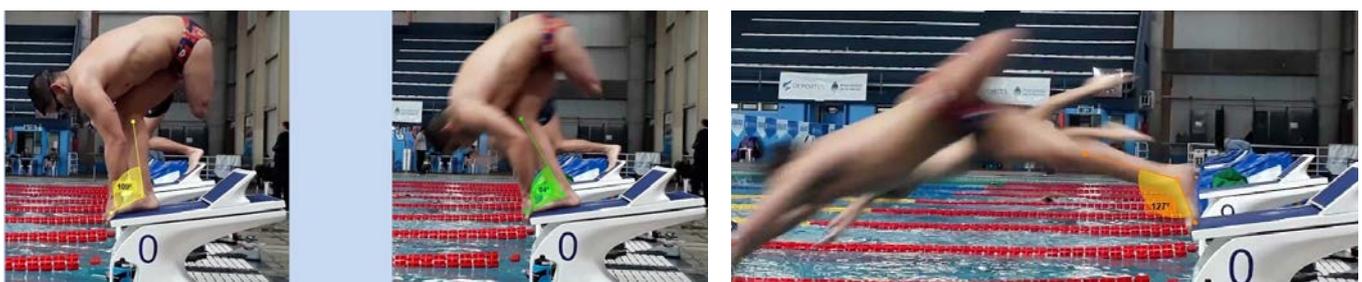
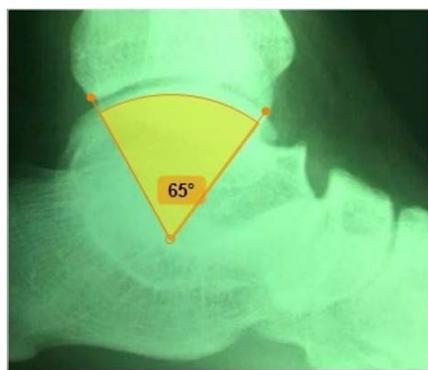
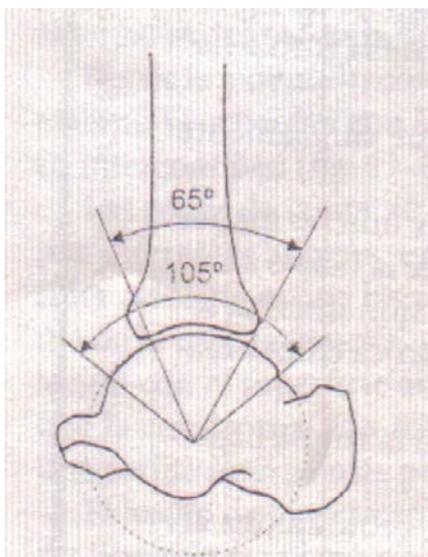


FIGURA 9 Y 10

la superficie troclear lo que le confiere gran estabilidad.⁹ Recordamos la Ley de Sappey, que dice que "la extensión y el grosor del cartílago dependen de la amplitud de los movimientos articulares y de la magnitud de las presiones que sufre la articulación".⁹ Las mediciones surgidas en las radiografías del nadador, nos muestran que en éste caso, los grados de recubrimiento de cartílago hialino son menores, teniendo implicancia directa en la amplitud de movimiento. Si analizamos la Artrocinemática del Tobillo durante la fase de despegue, veremos que desde posición anatómica progresa hacia una flexión dorsal de tobillo en cadena cerrada, cumpliendo con la Ley Convexo-Concavo, rodando y deslizando hacia adelante. Lo que amerita evaluar funcionalmente el rango óptimo de movimiento (ROM) del tobillo con el Test de Lunge.¹⁰

c) Partidas de espalda en visuales:

Se realizan con el agregado de un accesorio a la plataforma, así el nadador puede apoyar sus pies regulando la altura del apoyo a su conveniencia. Buscará así, la alineación segmentaria que le proporcione ventaja mecánica al momento del empuje y despegue.



FIGURAS 12 Y 13



FIGURA 11

El análisis cinemático en plano sagital, no se aleja al de un atleta convencional.^{11, 12} Es muy frecuente observar cómo un déficit ROM de flexión dorsal de tobillo podrá ser compensado en el mismo plano por un segmento vecino como Rodilla, Cadera o Columna pudiendo generar sobrecargas por efectos acumulativos e incluso interferir en la eficiencia del gesto. El foco estará puesto en:

- Potencia en el empuje para el despegue
- Lograr altura en fase de vuelo, evitando que los pies rocen la superficie del agua
- Ángulo óptimo de entrada al agua

Nado:

Dependiendo de la clasificación funcional del atleta, se observó de cada estilo:



FIGURA 14: Test Lunge con goniómetro

“
El análisis individual
del patrón de
movimiento adoptado
por el nadador
paralímpico.”



FIGURA 15: Test Lunge con aplicación Clinometer®

- Posición del cuerpo: asimetrías, compensaciones. Minimizar fuerzas de arrastre por forma
- Brazada: coordinación intra e intersegmentaria para generar la mayor fuerza propulsiva
- Patada: teniendo un rol estabilizador más que propulsor

El análisis individual del patrón de movimiento adoptado por el nadador paralímpico nos enfrentó con tres grupos de dificultades:

- Relación estabilidad-flotación
- Respiración: según cada estilo de nado
- Desplazamientos en relación al agua y mecánica de las trayectorias de las extremidades, Respecto a éste último punto veremos como ejemplo el análisis cinemático de la brazada de crol en un nadador ciego:

a) En las fases de entrada de la mano al agua (Fig.18) y agarre (Fig.19), ubica el codo bajo respecto a la mano, disminuyendo la eficiencia propulsiva y sobrecargando a la UBM Hombro.

b) En las fases de agarre (Fig.20) y comienzo del empuje (Fig.21) ubica a la muñeca en extensión, lo que influye negativamente en el apoyo y propulsión.

Giros / Vueltas:



FIGURA 16
Accesorio partidor espalda



FIGURA 18

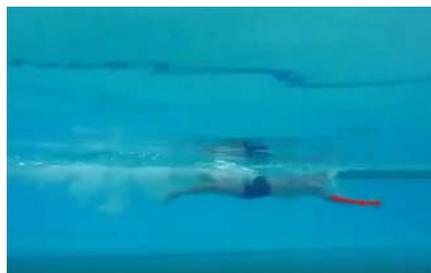


FIGURA 19

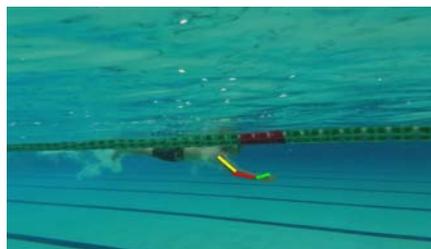


FIGURA 20

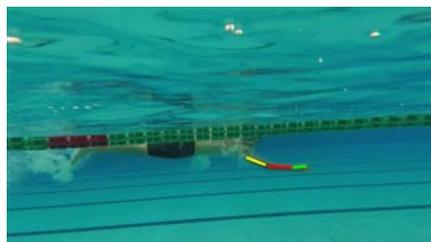
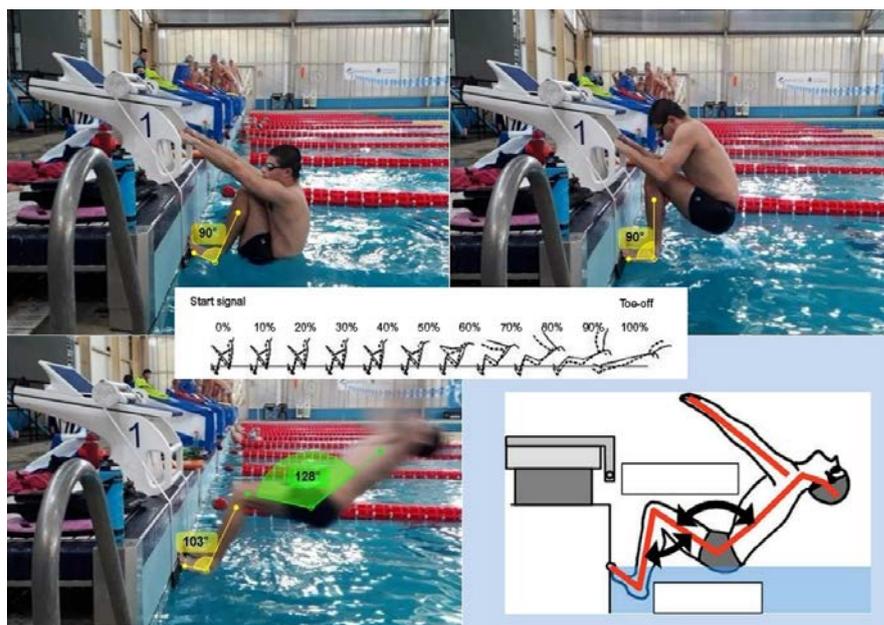


FIGURA 21



FIGURAS 17: Cinemática en plano sagital de una partida espalda.

Análisis cualitativo en visuales:

Lo que distingue a las vueltas en atletas visuales es la presencia del asistente, quien desde la superficie con un elemento blando sujeto en el extremo de una vara (dimensiones según comodidad del ejecutor, no homologadas) realiza un toque en la cabeza o espalda del nadador cuando éste se aproxima a la pared, quien al sentirlo inicia la fase de viraje. Ahí radica la importancia del análisis simultáneo con la mirada en superficie y subacuática.

La Sincronización de capturas de video en superficie y subacuáticas fue realizada con el software Kinovea para su posterior análisis.

“El viraje del estilo libre es esencialmente un mortal hacia delante con una pequeña rotación hacia el lado, seguido de un impulso desde la pared. El cuerpo rota la distancia que queda hasta conseguir la posición prona al dejar la pared.”⁹

Podremos dividir al gesto en las siguientes fases y sus variables relevantes:

- la aproximación: distancia a la que inicia el giro
- el viraje: sincronización con la brazada, distancia a la pared
- el impulso: posición paralela de los pies, grados de flexión de rodilla
- el deslizamiento: ángulo formado por el eje corporal y la línea de superficie
- la propulsión y la salida a la superficie

Otra fuerza que genera resistencia hidrodinámica al avance del nadador es la que surge del oleaje generado en la fase de aproximación de un viraje y que puede ser evitado en la fase de deslizamiento subacuático sumergiéndose suficientemente durante una distancia tal, que evite las olas reciente-

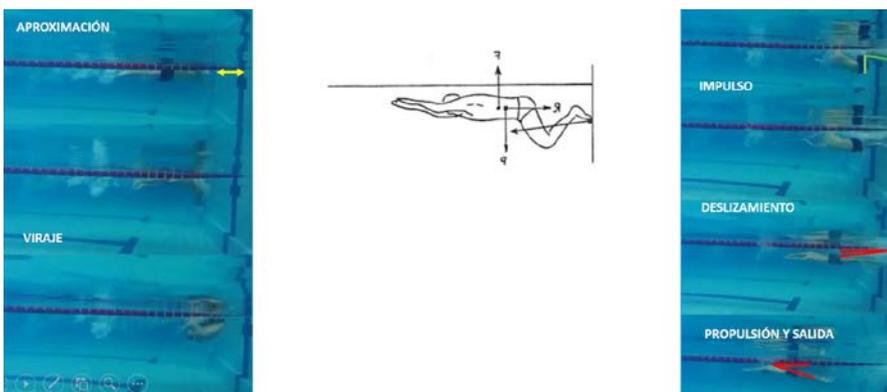
mente generadas por el propio nadador.

A mayor profundidad inicial del desplazamiento subacuático mejor se evita el efecto de las olas, por ello el nadador buscará salir a 30° hacia abajo buscando aguas quietas para mejor apoyo y evitar la turbulencia que generó al llegar a la pared.

Ésto resulta imposible para el nadador visual, ya que pierde la referencia del andarivel, razón por la cual buscará inmediatamente la superficie a pesar de la resistencia hidrodinámica al avance generada.



FIGURAS 23
Sincronización de capturas en superficie y subacuáticas con software Kinovea®



FIGURAS 24: fases del giro en crol

ANÁLISIS CUANTITATIVO

- Análisis de prueba:

Para llevarla a cabo, se realizaron capturas de video en los 25 metros (mitad del largo de la pileta olímpica) y a cierta altura que permita el seguimiento del atleta durante toda la competencia o entrenamiento (50m, 100m, 200m o 400m).

El posterior análisis consistió en realizar entre otras, las mediciones de:

- distancias parciales y totales
- tiempos parciales y total
- velocidades por tramo
- aceleraciones por tramo
- frecuencia y ciclos de brazada



FIGURA 22
Rol del asistente al realizar el toque

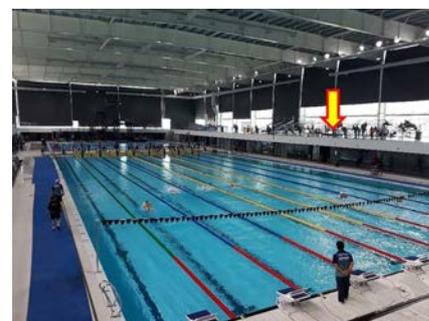


FIGURA 25: ubicación cámara a los 25m (Flecha amarilla) Natatorio Parque Olímpico de la Juventud

De ésta manera se obtuvo un detalle preciso acerca del rendimiento del atleta en cada tramo de la competencia. Los datos surgidos del análisis, fueron volcados a una matriz de seguimiento junto con cuadros y gráficos para llevar a cabo una valoración conjunta con el equipo técnico y planificar acciones a futuro.



FIGURA 26



FIGURA 27



FIGURA 28

- Cinemática lineal - Aceleraciones:

Mediante el seguimiento de las trayectorias con el software Kinovea®, se pudo observar variaciones en la aceleración en determinados tramos de la competencia.

En éste ejemplo se cuantificó la aceleración de un nadador ciego durante los últimos 15 metros de nado en estilo crol previos al giro. Vemos en la gráfica resultante de los ciclos de brazada, una clara asimetría en las fases de empuje.

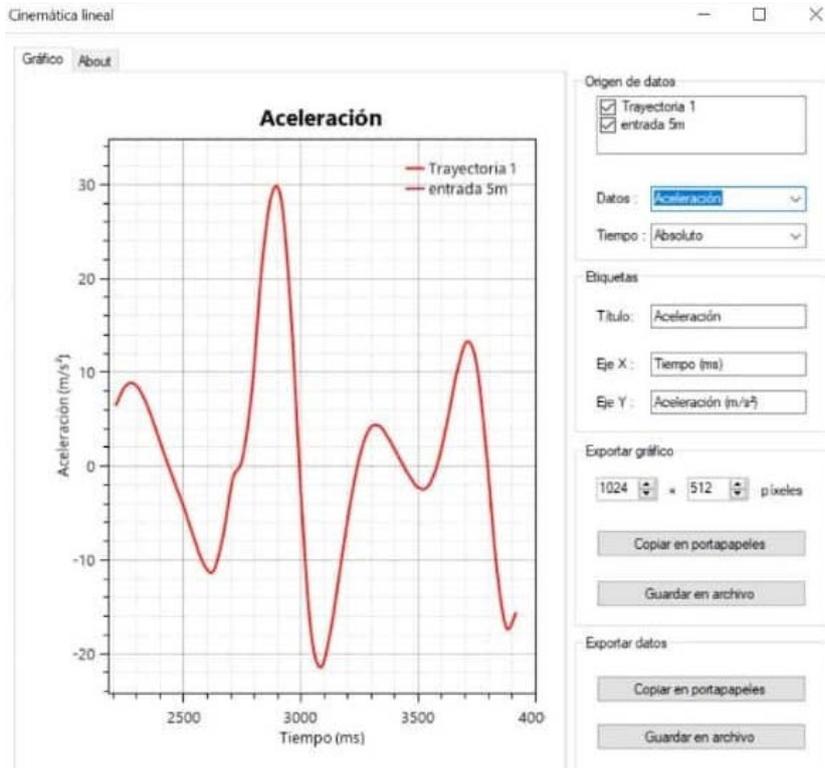


FIGURA 29: Cinemática lineal/Aceleraciones

CONCLUSION

La incorporación del análisis biomecánico en el equipo técnico de deportistas de alto rendimiento, permitió detectar y corregir déficits técnicos que afectaban la correcta ejecución del gesto motor, mejorando su performance y eficiencia de nado.

REFERENCIAS

1. Historia del movimiento paralímpico. <https://www.paralympic.org/es/ipc/history>
2. Puel, F. , Morlier, J. , Cid, M. , Chollet, D., Hellard, P. Biomechanical Factors Influencing Tumble Turn Performance of Elite Female Swimmers; Biomechanics and Medicine in Swimming XI, Oslo Norwegian School of Sport Sciences 2010, Editors P.-L. Kjendlie, R. K. Stallman, J. Cabri, pages 155-157
3. Nicol, Emily; Ball, Kevin; and Tor, Elaine (2018) "The characteristics of an elite swimming turn," ISBS Proceedings Archive: Vol. 36 : Iss. 1 , Article 210.
4. Comin, M; Prat J. Biomecánica del raquis y sistemas de reparación. Instituto de Biomecánica de Valencia 1995.
5. Arellano R, Terrés-Nicoli JM, Redondo JM. Contribution Fundamental Hydrodynamics of Swimming Propulsion.; 2006.
6. Bongaardt R, Meijer OG. Bernstein's theory of movement behavior: Historical development and contemporary relevance. *Journal Mot Behav.* 2000;32(1):57-71. doi:10.1080/00222890009601360
7. Suarez GR. Biomecánica Deportiva y Control Del Entrenamiento. Fenámbulos Editores; 2009.
8. Yang F. Kinematics research progress of swim-start on the new start block. *Phys Act Heal.* 2018;2(1):15-21. doi:10.5334/paah.7
9. Viladot Voegeli A. Lecciones Básicas de Biomecánica Del Aparato Locomotor. (Springer E, ed.); 2001.
10. Chisholm MD, Birmingham TB, Brown J, MacDermid J, Chesworth BM. Reliability and validity of a weight-bearing measure of ankle dorsiflexion range of motion. *Physiother Canada.* 2012;64(4):347-355. doi:10.3138/PTC.2011-41
11. Maglischo EW. Swimming Fastest. *Human Kinetics*; 2003.
12. Tsuyoshi Takeda, Osamu Itoi, Hideki Takagi & Shozo Tsubakimoto (2014) Kinematic analysis of the backstroke start: differences between backstroke specialists and non-specialists, *Journal of Sports Sciences*, 32:7, 635-641, DOI: 10.1080/02640414.2013.845678