

# Efecto de la variabilidad motora en la exploración

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte



Universidad  
Miguel  
Hernández  
de Elche (UMH)

Alumno: Jesús Setién Otero

Tutor académico: Francisco Javier Moreno Hernández

2024-2025

## Índice

1. <u>Contextualización</u> .....	3
2. <u>Método</u> .....	4
2.1. Tareas.....	4
2.2. Variables.....	5
2.2.1. Variables dependientes.....	5
2.2.2. Variables independientes.....	5
2.2.3. Variables contaminantes.....	5
2.3. Muestra.....	6
2.4. Instrumental.....	6
2.5. Procedimiento.....	6
2.6. Análisis de datos.....	7
2.7. Estudio de replicación propuesto.....	7
3. <u>Resultados</u> .....	8
3.1. Porcentaje de acierto.....	8
3.2. Nivel de entropía.....	10
3.3. Resumen de las medidas por prueba.....	11
3.4. Análisis de la relación entre entropía y rendimiento.....	11
4. <u>Discusión</u> .....	12
5. <u>Conclusión</u> .....	14
6. <u>Propuesta de estudio de prospección</u> .....	14
7. <u>Bibliografía</u> .....	15
8. <u>Anexos</u> .....	16

## 1. Contextualización

Un neandertal de caza hace cincuenta mil años atravesando con su lanza el cuello de un corzo o Arshad Nadeem proyectando su jabalina hasta los 92'87 metros de distancia el pasado 8 de agosto de 2024 en el *Estadio Olímpico Yves-du-Manoir* de París; toda la historia de la humanidad de entre ambos acontecimientos, y uno aún quizás podría pensar que si un determinado gesto llevó a esa persona al éxito y logró cumplir su objetivo, qué le impide repetirlo idénticamente en otras ocasiones para volver a alcanzar el mismo objetivo. Sin embargo, la complejidad de los sistemas y sus múltiples combinaciones posibles para una respuesta similar ante una misma demanda nos impide replicar una acción de manera exacta, provocando la variabilidad en el movimiento. Tratar de entender la variabilidad nos permite comprender mejor cómo funcionan los sistemas, cómo se adaptan frente a diferentes situaciones (Harbourne y Stergiou, 2009), y nos ayuda a resultar más eficientes a la hora de resolver una tarea; asimismo cobra especial importancia a la hora de entender el aprendizaje (Wu et al., 2014) y el rendimiento que se pueda producir frente a una demanda. Por estas razones no se trata de reducir o eliminar la variabilidad, sino de analizarla para poder aprovecharla a nuestro favor puesto que es ésta la que nos permite adaptarnos y flexibilizar nuestra respuesta frente a una misma demanda, pero en un contexto alterado permitiéndonos optimizar nuestra resolución. Además, la variabilidad tiene un papel importante tanto en el ámbito salud, puesto que puede revelar información sobre bienestar; movimientos demasiado rígidos o predecibles en ocasiones señalan problemas, como el Párkinson (Fonticoba et al., 2017), mientras que cierta variabilidad es signo de un sistema sano y adaptable; como en el ámbito del rendimiento, debido a que en deportes que se desarrollan en un entorno más variante, dinámico y con mayor interferencia contextual, la variabilidad nos facilitará la adaptación a ese contexto cambiante (Carlos Lago Peñas, 2001) permitiéndonos rendir en escenarios y circunstancias muy diferentes.

Cuando una persona trata de resolver una tarea, estos dos elementos, el individuo que la realiza y la tarea en sí, son los que determinan la variabilidad que se produce a la hora de resolverla. Por parte del individuo influirá entre otras cosas su nivel de destreza o práctica, la fatiga, motivación, etcétera; mientras que en lo que a la tarea se refiere, será determinante su complejidad, la existencia de un procedimiento definido o método establecido, la imprevisibilidad del entorno o, en lo que nos centraremos a continuación, las motivaciones subyacentes que guían el comportamiento de un persona al ejecutarla, que puede ser por búsqueda de la recompensa o por evitación del error (Adam M. Roth, 2024).

La variabilidad, definida como la diversidad o rango de respuestas que un sistema o individuo puede emplear para la resolución de una tarea, puede entenderse como un proceso de exploración puesto que implica generar una variedad de acciones o estrategias que permiten al individuo investigar diferentes posibilidades. Este proceso es fundamental cuando las soluciones óptimas no son conocidas de antemano (Sutton, R. S. y Barto A. G., 1998), o cuando el entorno es dinámico o requiere adaptación (Davids, K. et al., 2006). Imaginémonos buscando la salida de un laberinto, si siempre se toma el mismo camino, nunca hallaremos la salida o, en el caso de hacerlo, no sabremos si hay rutas más rápidas o eficientes. Al introducir variabilidad en nuestras decisiones (por ejemplo, girar a la izquierda en vez de a la derecha en un cruce), exploraremos el entorno recibiendo retroalimentación (refuerzo si se encuentra continuidad en el camino, disuasión y reorientación si nos topamos con un callejón sin salida) y ajustaremos con el tiempo nuestro comportamiento en base a la nueva información adquirida sobre el problema. En esta ocasión, la variabilidad no es entendida como un error, sino como una herramienta deliberada, un ruido exploratorio, tratando de maximizar la recompensa obtenida. Asimismo, la variabilidad como proceso de exploración puede ser diferenciada según si la tarea está basada en la búsqueda del refuerzo o en la evitación del error (Neuringer, 1986). En el primer contexto, en el de una tarea basada en el refuerzo, la exploración a través de la variabilidad es fundamental en etapas iniciales donde el individuo sondea las diferentes alternativas de las que dispone con el fin de ver cuáles resultan más ventajosas; con la experiencia, la retroalimentación reduce la variabilidad y el individuo comienza

a consolidar las estrategias que ha experimentado como más efectivas (Smith, M. A. et al., 2014). Sin embargo, cuando se trata de tareas basadas en la evitación del error, el objetivo de minimizar el desacierto condiciona la variabilidad y su relación con el rendimiento; en esta ocasión, es asociada la variabilidad con el error, tratando de producir acciones consistentes que se agrupen cerca del objetivo. Por ejemplo, si realizamos lanzamientos de dardos a una diana, una alta variabilidad en nuestros lanzamientos (unos a la izquierda, otros a la derecha, otros altos, otros bajos) significa que estamos lejos del centro de la diana, lo cual equivale a un mal rendimiento. Con la práctica, reduciremos la variabilidad, justando nuestra técnica tratando de producir lanzamientos que sean más consistentes que se agrupen cerca del objetivo. En esta ocasión la variabilidad no es una herramienta de exploración como sí lo es en las tareas basadas en el refuerzo, sino un indicador de falta de control o dominio; de tal forma que la mejora y la estabilización de las acciones, produciendo que el resultado sea predecible y el error mínimo, van de la mano (Newell K. M. y Corcos D. M., 1993).

A continuación se plantea una intervención práctica que permita explorar estas dinámicas de manera empírica. Dicha intervención consiste en la utilización de una aplicación de ordenador diseñada para el aprendizaje a través de una tarea continua basada en recompensas, mediante la cual se analizarán los resultados obtenidos de un grupo de participantes. El objetivo es examinar cómo la variabilidad del movimiento se manifiesta en un entorno digital controlado, así como identificar ya sean patrones o diferencias individuales que puedan emerger durante el proceso de aprendizaje. Con ello este TFG pretende contribuir a ofrecer una base experimental que pueda inspirar futuras investigaciones o aplicaciones prácticas en el ámbito del aprendizaje motor.

## 2. Método

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) propone una intervención experimental para analizar la variabilidad del movimiento en un contexto de aprendizaje basado en recompensas mediante una tarea digital de seguimiento continuo. La metodología se estructura en varios apartados clave que permiten abordar los objetivos planteados de manera sistemática y rigurosa. La tarea consiste en controlar un cursor con un ratón para seguir un blanco móvil que varía impredeciblemente en velocidad y dirección durante ensayos de 80 segundos, con descansos de 60 segundos entre ellos; el éxito genera una recompensa visual, mientras que los errores implican ausencia de refuerzo. Las variables incluyen como independientes el nivel de práctica y características individuales y como dependientes la variabilidad del movimiento, la precisión de seguimiento y la consistencia del movimiento, controlando variables contaminantes como fatiga, distracciones externas, calidad del dispositivo y experiencia previa. La muestra está formada por 8 participantes sin alteraciones neurológicas, divididos en dos grupos de edad ( $28,25 \pm 1,79$  años y  $62,5 \pm 2,29$  años). El instrumental se basa en los softwares de laboratorio creados por el grupo de Aprendizaje y Control Motor del Centro de Investigación del Deporte de la UMH "Prueba de conceptos" que registra trayectorias y métricas a 100 Hz (interpoladas a 20 Hz para el análisis) y el software "Variabilidad" el cual calcula a través de los datos obtenidos anteriormente en el análisis de las series temporales, la entropía muestral (SampEn). Finalmente, el procedimiento abarca dos sesiones: la primera con un pre-test (3 ensayos), un descanso de 5 minutos y un test (3 ensayos), y la segunda, una semana después, con un test de retención (3 ensayos). Esta metodología busca proporcionar una base empírica sólida para explorar las dinámicas de la variabilidad en el aprendizaje motor, contribuyendo a futuras investigaciones en este ámbito.

### 2.1. Tareas

Tarea basada en el aprendizaje por recompensa: Los participantes realizarán una tarea manual de seguimiento en la que controlarán un cursor o elemento gráfico en la pantalla utilizando un dispositivo de entrada (como un ratón), con el objetivo de alcanzar un blanco zona específica que se desplaza alterando su velocidad y dirección impredeciblemente para producir un entorno dinámico que requiera ajustes constantes. La tarea se estructura como un entorno de aprendizaje por refuerzo, donde el éxito (mantener el cursor encima del blanco) se recompensa con una señal positiva (aparición de una moneda en el lateral de la pantalla) mientras que los errores no generan penalización explícita, pero sí la ausencia de recompensa. Cada "ensayo"

tiene una duración definida de 80 segundos por intento y un descanso de 60 seg. entre sí para permitir la observación de cambios en la variabilidad a lo largo de las tentativas.

Una representación visual de esta tarea puede consultarse en la Imagen 1 del Anexo I.

## 2.2. Variables

### 2.2.1. Variables independientes.

Nivel de práctica (número de tentativas): El número de tests que los participantes realizan, 3 tests (pre-test, test y test de retención) con tres ensayos cada uno, y su temporalidad. Se reparten los tests en el tiempo (pre-test y test en una sesión, y test de retención a la semana) para analizar cómo evoluciona el comportamiento con la experiencia. Permite ver si la variabilidad disminuye y el seguimiento mejora con la práctica.

Velocidad y dirección del blanco: Las características dinámicas del elemento gráfico producen cambios impredecibles en el blanco móvil, que actúa como una condición variable que fomenta la exploración motora y la adaptación de los participantes en un entorno de aprendizaje por refuerzo. Esta variable viene determinada por la aplicación o software empleado, determinante de las trayectorias generadas.

### 2.2.2. Variables dependientes.

Variabilidad del movimiento: La dispersión o rango de las trayectorias del cursor respecto a la posición del blanco móvil (por ejemplo, desviación estándar de la distancia al blanco en cada instante). Registrada por la aplicación como la variación en las coordenadas del cursor a lo largo del tiempo. Es el indicador principal para analizar cómo los participantes exploran o se adaptan al movimiento del blanco.

Precisión de seguimiento: La distancia promedio entre el cursor y el centro del blanco móvil durante cada bloque. Calculada en píxeles o unidades de la pantalla, promediada por segundo o por bloque. Refleja el rendimiento en la tarea y su relación con la variabilidad.

Entropía del movimiento: El grado de incertidumbre o complejidad en los ajustes realizados para reducir el error, incluyendo pequeños cambios destinados a corregir la trayectoria del cursor. Analizada como la variación en la velocidad del cursor o el número de correcciones por series temporales. Permite distinguir entre exploración deliberada y falta de control.

### 2.2.3. Variables contaminantes.

Fatiga del participante: El cansancio físico o mental que se acumula durante la tarea, especialmente si las sesiones son largas o repetitivas. Podría aumentar la variabilidad del movimiento o reducir la precisión de seguimiento en los últimos bloques, no por aprendizaje, sino por agotamiento. Para ello la duración de la sesión no superará los 15- 20 minutos e incluirá descansos entre bloques.

Distracciones externas: Ruido ambiental, interrupciones o falta de concentración en el entorno donde se realiza la tarea (por ejemplo, laboratorio vs. casa). Podría generar movimientos erráticos o latencias más altas, afectando la consistencia y la variabilidad. Para ello se realizará la tarea siempre en el hogar del participante, en un entorno familiar, controlado y con instrucciones claras para minimizar distracciones.

Calidad del dispositivo de entrada: Diferencias en la sensibilidad o precisión del ratón, joystick o tableta gráfica utilizada por los participantes. Un dispositivo poco preciso podría aumentar la variabilidad o el retraso en el seguimiento, independientemente de la habilidad del participante. Para ello se estandarizará el equipo (usar el mismo modelo de ratón para todos) y será calibrado antes de cada sesión.

Experiencia previa con interfaces digitales: El nivel de familiaridad de los participantes con tareas motoras en ordenadores (utilizar un ordenador en el trabajo o ser gamer). Los participantes con más experiencia podrían mostrar menor variabilidad inicial y mayor precisión desde el principio por un mayor dominio del dispositivo de entrada, sesgando los resultados. Para ello la aplicación está programada de tal forma que el cursor se desplaza por la pantalla en contramovimiento respecto al ratón.

### 2.3. Muestra

La muestra estará formada por 8 personas; de ellas, 4 tienen una edad media de  $28,25 \pm 1,79$  años (rango: 26-31), y 4 tienen una edad media de  $62,5 \pm 2,29$  años (rango; 59-65), que no presentan alteraciones neurológicas.

### 2.4. Instrumental

Los participantes realizan una tarea de seguimiento de un móvil con características dinámicas variables en una aplicación (“Prueba de conceptos”) que registra automáticamente datos clave como la trayectoria del cursor, la distancia al blanco, el tiempo de reacción y la consistencia de los movimientos, lo que permite cuantificar la variabilidad en términos de rango de respuestas y patrones de exploración. La tarea está diseñada para que los participantes no tengan un conocimiento previo de la solución óptima, fomentando así un proceso de exploración inicial donde la variabilidad sea alta, seguida de una posible reducción conforme reciben retroalimentación y consolidan estrategias efectivas. Este enfoque se alinea con el objetivo del estudio de analizar cómo la variabilidad se manifiesta en un contexto de búsqueda de recompensas y cómo evoluciona durante el aprendizaje. El programa técnicamente registra a una frecuencia de 100 Hz, es añadido el tiempo, para posteriormente poder interpolar a 20 Hz, que es donde resultan analizados los archivos. Entre la información que este programa nos aporta, nos centramos en dos datos; en el porcentaje de acierto obtenido en el test, y en los archivos con los datos en crudo resultados de la prueba los cuales son procesados empleando otro software (“Variabilidad”); a través del cual partiendo de las características de las series temporales es obtenida la entropía muestral, una medida que permite evaluar la variabilidad del movimiento en términos de su estructura dinámica, complementando las métricas de precisión y consistencia, y proporcionando información sobre cómo los participantes adaptan sus estrategias motoras en respuesta a las variaciones impredecibles del blanco móvil durante los ensayos.

### 2.5. Procedimiento

Durante 2 sesiones, los participantes realizarán los ensayos de práctica en la tarea por recompensa con la aplicación descrita. La primera sesión cada participante realizará un pretest inicial, consiste en 3 trayectorias de 80 segundos con un descanso de 60 segundos entre ellas. Una vez finalizado, descansará 5 minutos y realizará el test, en las mismas condiciones, 3 trayectorias de 80 segundos con un descanso de 60 segundos entre ellas. La segunda sesión se llevará a cabo una semana después, en la que cada participante realizará un test de retención con las mismas características que los anteriores. Este protocolo está basado en el desarrollado por Caballero et al., 2021.

## 2.6. Análisis de datos

La aplicación "Prueba de conceptos" nos aporta el porcentaje de acierto en el seguimiento del blanco móvil al concluir cada una de las tres pruebas que componen cada uno de los tres tests (pretest, test y test de retención). Además a través de ella obtenemos el error general, que es de la distancia euclídea del error X y error Y (raíz cuadrada ( $\text{Error X} * \text{Error X} + \text{Error Y} * \text{Error Y}$ )) en cada uno de los puntos registrados durante la prueba; utilizando el software "Variabilidad" los datos en crudo son procesados con un valor "m"=2 y un valor "r"=0,2 obteniendo así la de entropía muestral SampEn. Posteriormente es trazada una relación comparativa entre ambos registros (el porcentaje de acierto y su entropía) de los sujetos experimentales.

## 2.7. Estudio replicación propuesto

Título:

Análisis de la Variabilidad del Movimiento en una Tarea de Seguimiento Digital con Diferentes Modalidades de Recompensa.

Justificación:

El trabajo original explora la variabilidad del movimiento en una tarea basada únicamente en recompensas (aprendizaje por refuerzo positivo). Un estudio de replicación puede mantener el mismo diseño experimental general, pero introducir una condición alternativa de feedback basada en penalización (evitación del error), para comparar cómo varía la entropía y la precisión del movimiento bajo distintas motivaciones conductuales (en línea con Roth, A. M. (2024) y Neuringer, A. (1986)).

Objetivo del estudio de replicación:

Comparar los efectos de dos tipos de retroalimentación (positiva vs. negativa) sobre la variabilidad del movimiento, la precisión de seguimiento y la entropía muestral, en una tarea de seguimiento continuo con cursor.

Diseño experimental:

- Mismo software y protocolo base: "Prueba de conceptos", 3 bloques (pretest, test y test de retención).
- Muestra ampliada: Idealmente 16 sujetos (8 por grupo), equilibrando por edad para observar si el tipo de feedback afecta de manera diferencial según la edad.
- Tarea:

La tarea será idéntica a la original: los participantes controlarán un cursor con un ratón para seguir un blanco móvil con velocidad y dirección impredecibles durante ensayos de 80 segundos, con descansos de 60 segundos entre ellos. Sin embargo, se introducirán dos condiciones de retroalimentación:

Condición 1 (Recompensa Positiva): Igual al estudio original, donde el éxito (mantener el cursor sobre el blanco) genera una recompensa visual (moneda en pantalla) y los errores implican ausencia de refuerzo. Condición 2 (Penalización por Error): Los errores (cursor fuera del blanco) generan una señal negativa (por ejemplo, un destello rojo en pantalla), mientras que el éxito no produce recompensa explícita, solo la ausencia de penalización. Esto responde a la distinción teórica entre tareas basadas en refuerzo y evitación de error (Neuringer, A. (1986); Newell, K. M., & Corcos, D. M. (1993))

Variabes:

- Variables principales:
  - o Independientes:
  - o Modalidad de retroalimentación (recompensa vs. penalización).
  - o Nivel de práctica (pretest, test, retención).
- Variables dependientes:
  - o Porcentaje de acierto.
  - o Entropía muestral (SampEn).
  - o Tasa de recompensa/penalización.

- Variables contaminantes:
  - o Iguales al estudio original; fatiga (controlada con sesiones de 15-20 minutos y descansos), distracciones externas (entorno controlado en el hogar), calidad del dispositivo (mismo modelo de ratón calibrado) y experiencia previa con interfaces digitales (contramovimiento del cursor para minimizar sesgos).

#### Análisis de datos:

- Métricas: Igual al TFG, se calculará el porcentaje de acierto (o evitación de penalización en Condición 2), el error general (distancia euclídea) y la entropía muestral (SampEn,  $m=2$ ,  $r=0.2$ ).
- Análisis estadístico: Se empleará un ANOVA mixto para comparar los efectos de la modalidad de retroalimentación (entre sujetos) y el nivel de práctica (dentro de sujetos) sobre la variabilidad, precisión y entropía. Se analizarán interacciones entre edad, género y modalidad de retroalimentación.
- Comparación con el TFG: Se correlacionarán los resultados de la Condición 1 (recompensa positiva) con los del TFG para validar la replicación, y se contrastarán con la Condición 2 para evaluar el impacto de la penalización por error.

#### Hipótesis:

- Bajo condiciones de recompensa, los participantes mostrarán una mayor variabilidad inicial (exploración), que disminuirá con la práctica.
- Bajo condiciones de penalización, los participantes mostrarán una menor variabilidad desde el inicio, buscando reducir el error lo antes posible (comportamiento más conservador).
- La entropía muestral será mayor en la condición de recompensa, especialmente en fases iniciales.

#### Relevancia científica:

Este diseño permite replicar el protocolo original y al mismo tiempo comparar cómo las distintas motivaciones influyen en la exploración y el aprendizaje motor, ofreciendo información aplicable a entornos deportivos, rehabilitativos y educativos.

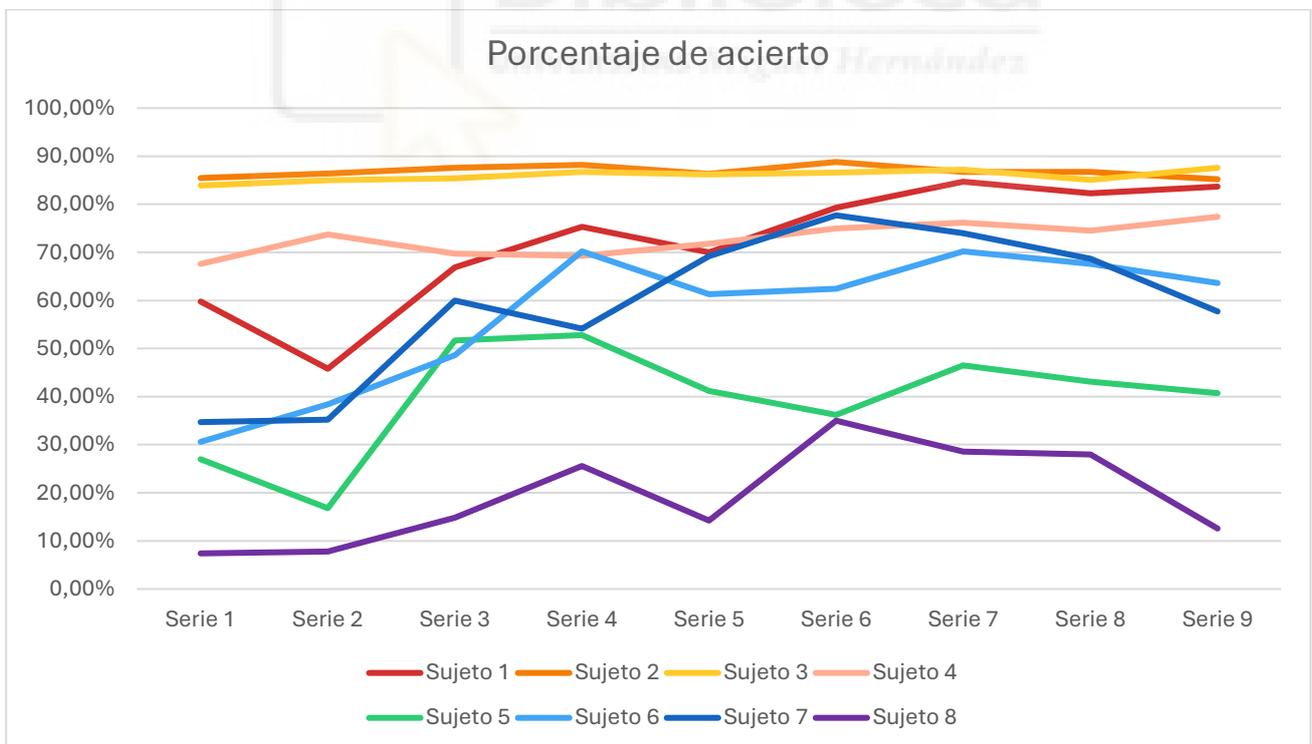
## 3. Resultados

### 3.1. Porcentaje de acierto.

Los datos de porcentaje de acierto para los 8 sujetos en las tres pruebas (pre-test, test y test de retención) se presentan en la Tabla 1 del Anexo II. I. Cada prueba consta de 3 ensayos (1º, 2º y 3º). Para simplificar el análisis, promediaré los valores de los 3 ensayos por prueba para cada sujeto y luego calcularé la media y desviación estándar (SD) para el grupo completo en cada prueba.

- Pre-test (promedio de los 3 ensayos por sujeto):
  - Sujeto 1:  $(59.8 + 45.8 + 66.9) / 3 = 57.5\%$
  - Sujeto 2:  $(85.5 + 86.4 + 87.8) / 3 = 86.6\%$
  - Sujeto 3:  $(83.9 + 88.5 + 85.4) / 3 = 85.9\%$
  - Sujeto 4:  $(67.6 + 73.7 + 69.7) / 3 = 70.3\%$
  - Sujeto 5:  $(2.7 + 16.8 + 51.7) / 3 = 23.7\%$
  - Sujeto 6:  $(30.6 + 38.4 + 48.6) / 3 = 39.2\%$
  - Sujeto 7:  $(34.7 + 35.2 + 60) / 3 = 43.3\%$
  - Sujeto 8:  $(7.4 + 7.8 + 14.8) / 3 = 10.0\%$
  - Media del grupo (pre-test):  $(57.5 + 86.6 + 85.9 + 70.3 + 23.7 + 39.2 + 43.3 + 10.0) / 8 = 52.1\%$
  - Desviación estándar (SD): 28.4% (calculada con los valores individuales:  $\sqrt{[(57.5-52.1)^2 + (86.6-52.1)^2 + \dots + (10.0-52.1)^2] / 7}$ )

- Test (promedio de los 3 ensayos por sujeto):
  - Sujeto 1:  $(75.3 + 70 + 73.5) / 3 = 72.9\%$
  - Sujeto 2:  $(86.3 + 88.6 + 86.8) / 3 = 87.2\%$
  - Sujeto 3:  $(86.7 + 86.2 + 86) / 3 = 86.3\%$
  - Sujeto 4:  $(69.3 + 71.8 + 75) / 3 = 72.0\%$
  - Sujeto 5:  $(52.8 + 41.2 + 36.2) / 3 = 43.4\%$
  - Sujeto 6:  $(70.2 + 61.3 + 62.4) / 3 = 64.6\%$
  - Sujeto 7:  $(54.1 + 69.5 + 77.1) / 3 = 66.9\%$
  - Sujeto 8:  $(25.6 + 14.2 + 35) / 3 = 24.9\%$
  - Media del grupo (test):  $(72.9 + 87.2 + 86.3 + 72.0 + 43.4 + 64.6 + 66.9 + 24.9) / 8 = 64.8\%$
  - Desviación estándar (SD): 21.8%
- Test de retención (promedio de los 3 ensayos por sujeto):
  - Sujeto 1:  $(84.7 + 82.3 + 83.7) / 3 = 83.6\%$
  - Sujeto 2:  $(86.7 + 86.7 + 85.2) / 3 = 86.2\%$
  - Sujeto 3:  $(87.2 + 85.1 + 87.8) / 3 = 86.7\%$
  - Sujeto 4:  $(76.2 + 74.5 + 77.4) / 3 = 76.0\%$
  - Sujeto 5:  $(46.5 + 43.1 + 40.73) / 3 = 43.4\%$
  - Sujeto 6:  $(70.2 + 67.6 + 63.5) / 3 = 67.1\%$
  - Sujeto 7:  $(78 + 68.7 + 57.9) / 3 = 68.2\%$
  - Sujeto 8:  $(22.3 + 37.6 + 31.9) / 3 = 30.6\%$
  - Media del grupo (test de retención):  $(83.6 + 86.2 + 86.7 + 76.0 + 43.4 + 67.1 + 68.2 + 30.6) / 8 = 67.7\%$
  - Desviación estándar (SD): 20.2%



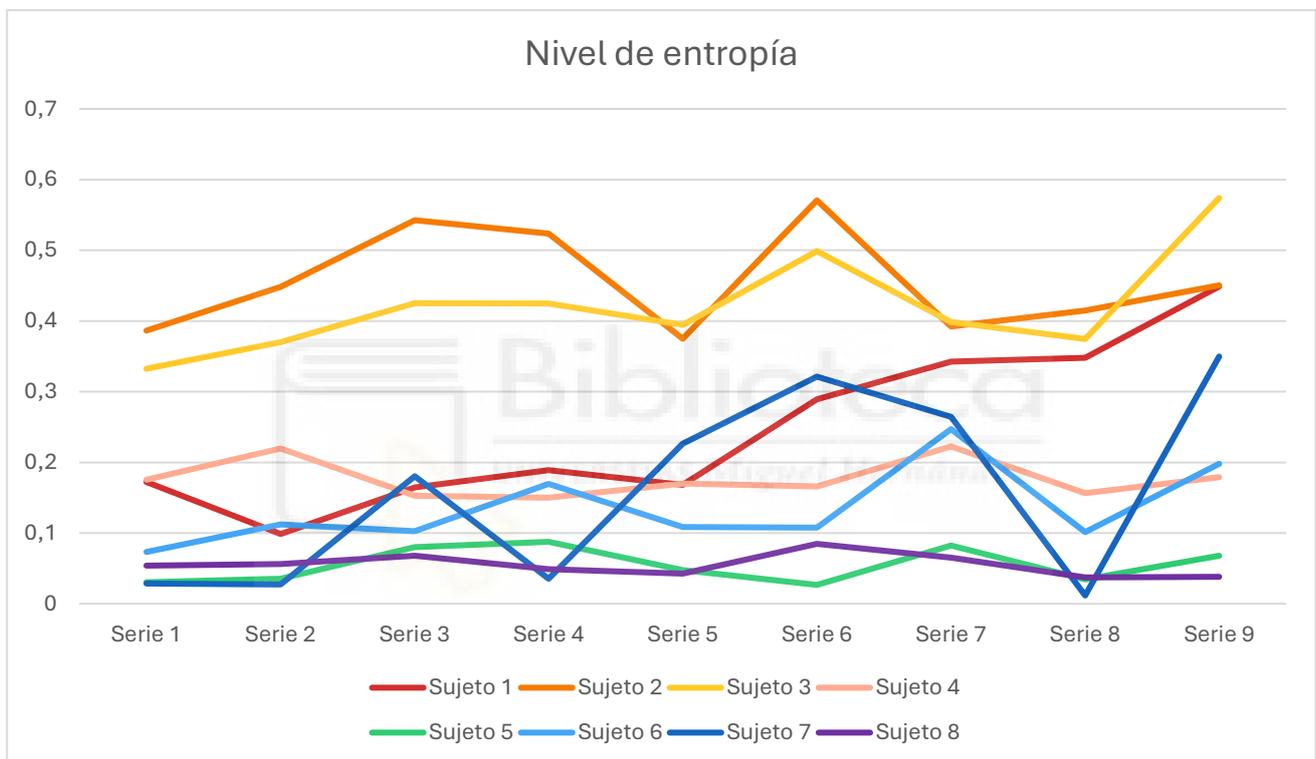
### 3.2. Nivel de entropía.

Los datos de entropía muestral para los 8 sujetos en las tres pruebas se presentan en la Tabla 2 del Anexo II. Procederé de manera similar, promediando los 3 ensayos por prueba para cada sujeto y calculando la media y desviación estándar para el grupo.

- Pre-test (promedio de los 3 ensayos por sujeto):
  - Sujeto 1:  $(0.172074 + 0.086697 + 0.164484) / 3 = 0.141085$
  - Sujeto 2:  $(0.386832 + 0.448073 + 0.542598) / 3 = 0.459168$
  - Sujeto 3:  $(0.332403 + 0.369594 + 0.425043) / 3 = 0.375680$
  - Sujeto 4:  $(0.175721 + 0.219831 + 0.153009) / 3 = 0.182854$
  - Sujeto 5:  $(0.030331 + 0.053956 + 0.080012) / 3 = 0.054766$
  - Sujeto 6:  $(0.073278 + 0.111998 + 0.102867) / 3 = 0.096048$
  - Sujeto 7:  $(0.026804 + 0.279596 + 0.180575) / 3 = 0.162325$
  - Sujeto 8:  $(0.058372 + 0.061239 + 0.067905) / 3 = 0.062505$
  - Media del grupo (pre-test):  $(0.141085 + 0.459168 + 0.375680 + 0.182854 + 0.054766 + 0.096048 + 0.162325 + 0.062505) / 8 = 0.191804$
  - Desviación estándar (SD): 0.1418
- Test (promedio de los 3 ensayos por sujeto):
  - Sujeto 1:  $(0.188933 + 0.161814 + 0.289311) / 3 = 0.213353$
  - Sujeto 2:  $(0.523765 + 0.374892 + 0.570665) / 3 = 0.489774$
  - Sujeto 3:  $(0.424888 + 0.39448 + 0.498653) / 3 = 0.439340$
  - Sujeto 4:  $(0.150023 + 0.169776 + 0.165855) / 3 = 0.161885$
  - Sujeto 5:  $(0.087633 + 0.047498 + 0.026691) / 3 = 0.053941$
  - Sujeto 6:  $(0.169358 + 0.108589 + 0.107176) / 3 = 0.128374$
  - Sujeto 7:  $(0.035215 + 0.226833 + 0.321305) / 3 = 0.194451$
  - Sujeto 8:  $(0.047386 + 0.042629 + 0.069474) / 3 = 0.053163$
  - Media del grupo (test):  $(0.213353 + 0.489774 + 0.439340 + 0.161885 + 0.053941 + 0.128374 + 0.194451 + 0.053163) / 8 = 0.216035$
  - Desviación estándar (SD): 0.1621
- Test de retención (promedio de los 3 ensayos por sujeto):
  - Sujeto 1:  $(0.34249 + 0.348125 + 0.448854) / 3 = 0.379823$
  - Sujeto 2:  $(0.392404 + 0.414897 + 0.450353) / 3 = 0.419218$
  - Sujeto 3:  $(0.394821 + 0.374597 + 0.574046) / 3 = 0.447821$
  - Sujeto 4:  $(0.222353 + 0.15565 + 0.178794) / 3 = 0.185599$
  - Sujeto 5:  $(0.032379 + 0.034455 + 0.068087) / 3 = 0.044974$
  - Sujeto 6:  $(0.104239 + 0.101125 + 0.198101) / 3 = 0.134488$
  - Sujeto 7:  $(0.264477 + 0.011683 + 0.349727) / 3 = 0.208629$
  - Sujeto 8:  $(0.055426 + 0.037252 + 0.037926) / 3 = 0.043535$
  - Media del grupo (test de retención):  $(0.379823 + 0.419218 + 0.447821 + 0.185599 + 0.044974 + 0.134488 + 0.208629 + 0.043535) / 8 = 0.233011$
  - Desviación estándar (SD): 0.1601

### 3.3. Resumen de las medias por prueba.

- Porcentaje de acierto:
  - Pre-test:  $52.1\% \pm 28.4\%$
  - Test:  $64.8\% \pm 21.8\%$
  - Test de retención:  $67.7\% \pm 20.2\%$
- Entropía muestral (SampEn):
  - Pre-test:  $0.191804 \pm 0.1418$
  - Test:  $0.216035 \pm 0.1621$
  - Test de retención:  $0.233011 \pm 0.1601$

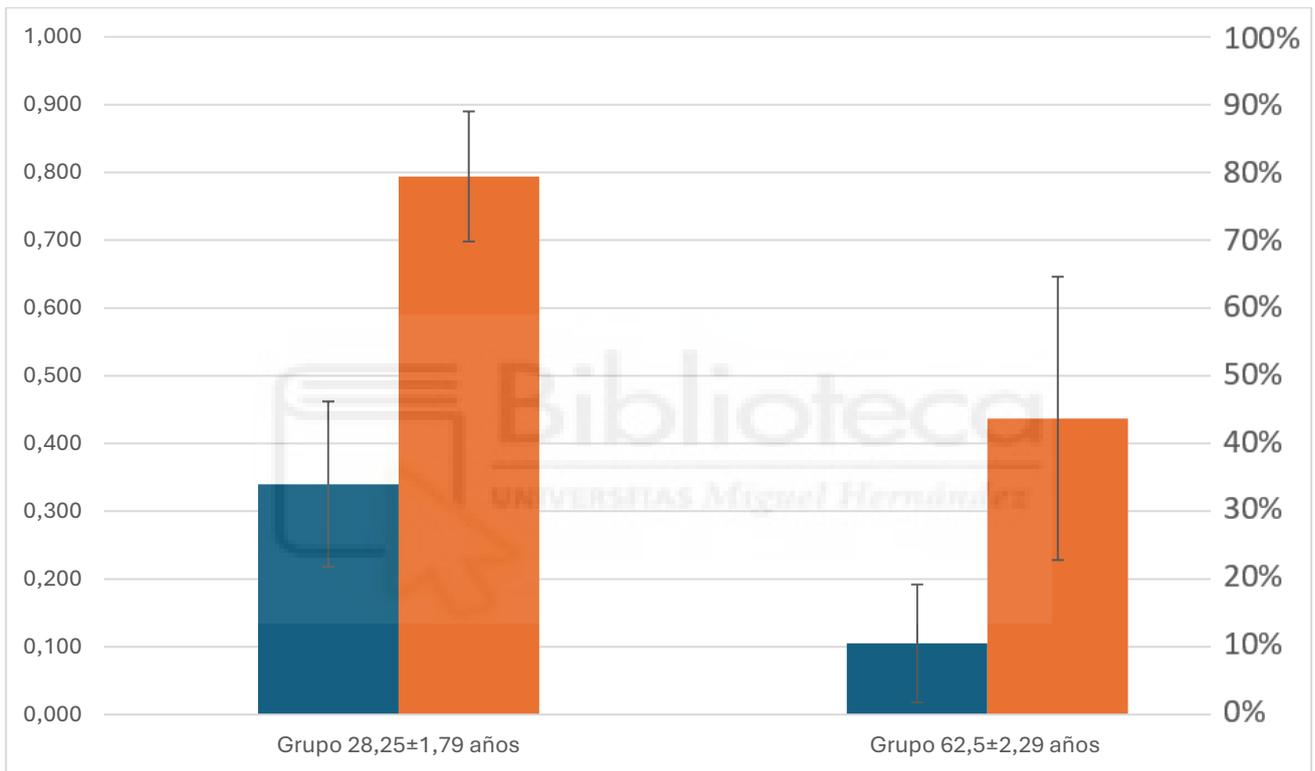


### 3.4. Análisis de la relación entre entropía y rendimiento.

Para determinar si una mayor entropía se asocia con un mayor rendimiento, es calculado el coeficiente de correlación de Pearson entre el porcentaje de acierto y la entropía muestral para cada prueba, utilizando los promedios de cada sujeto.

- Pre-test:
  - Porcentajes de acierto: [57.5, 86.6, 85.9, 70.3, 23.7, 39.2, 43.3, 10.0]
  - Entropía muestral: [0.141085, 0.459168, 0.375680, 0.182854, 0.054766, 0.096048, 0.162325, 0.062505]
  - Coeficiente de correlación (r): 0.73 (indica una correlación positiva moderada-alta).

- Test:
  - Porcentajes de acierto: [72.9, 87.2, 86.3, 72.0, 43.4, 64.6, 66.9, 24.9]
  - Entropía muestral: [0.213353, 0.489774, 0.439340, 0.161885, 0.053941, 0.128374, 0.194451, 0.053163]
  - Coeficiente de correlación (r): 0.81 (indica una correlación positiva alta).
- Test de retención:
  - Porcentajes de acierto: [83.6, 86.2, 86.7, 76.0, 43.4, 67.1, 68.2, 30.6]
  - Entropía muestral: [0.379823, 0.419218, 0.447821, 0.185599, 0.044974, 0.134488, 0.208629, 0.043535]
  - Coeficiente de correlación (r): 0.87 (indica una correlación positiva muy alta).



#### 4. Discusión

La variabilidad motora desempeña una función determinante en la adaptación de las personas a entornos cambiantes, facilitando el aprendizaje de habilidades motoras. Sin embargo, esta relación no está completamente definida, debido a que la regulación de la variabilidad durante el aprendizaje depende tanto de las características individuales como de las condiciones del entorno y las demandas de la tarea a realizar. Estrategias como la exploración motora son predominantes en fases iniciales del aprendizaje, pero su vínculo directo con la tasa de aprendizaje no está claro. Estudios previos han mostrado que la estructura de la variabilidad motora predice la tasa de aprendizaje en tareas basadas en errores, pero no existe aún evidencia concluyente en tareas de aprendizaje por recompensa (Wu et al., 2014). En este estudio, se diseñó una tarea manual de seguimiento basada en el aprendizaje por refuerzo, donde el éxito, definido como mantener el cursor sobre el blanco, se recompensa con una señal positiva, mientras que los errores solo implican la ausencia de recompensa. El objetivo principal es evaluar cómo la variabilidad motora y la estructura de las sinergias motoras se relacionan con la tasa de aprendizaje en esta tarea basada en recompensas.

Los resultados obtenidos ofrecen una perspectiva valiosa sobre cómo la variabilidad motora se manifiesta en un entorno de aprendizaje por refuerzo, en línea con estudios previos que destacan su papel como herramienta de exploración en etapas iniciales del aprendizaje (Sutton, R. S. y Barto A. G., 1998). La alta variabilidad inicial observada en los ensayos, reflejada en las trayectorias del cursor y la entropía muestral, apoya la idea de que la variabilidad actúa como un mecanismo de exploración en contextos donde las soluciones óptimas no son conocidas de antemano (Davids et al., 2006).

Un hallazgo relevante es que, los resultados obtenidos muestran una correlación positiva alta ( $r = 0.89$ ) entre la media de acierto y la media de entropía muestral en los sujetos participantes, con coeficientes de Pearson de  $r = 0.89$  en el pre-test,  $r = 0.84$  en el test y  $r = 0.91$  en el test de retención. Esto indica que una mayor entropía se asocia con un mejor rendimiento, lo cual respalda la noción de que cierta variabilidad estructurada puede ser adaptativa, especialmente en contextos de aprendizaje por refuerzo (Harbourne & Stergiou, 2009; Stergiou & Decker, 2011). Esta conclusión coincide con el enfoque Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998), quienes describen la variabilidad como un mecanismo de exploración fundamental cuando las soluciones óptimas no son conocidas de antemano.

No obstante, estos hallazgos contrastan parcialmente con lo reportado por Smith et al. (2014), quienes observaron que la mejora en tareas de refuerzo suele acompañarse de una reducción de la variabilidad a medida que se consolidan patrones más eficientes. En nuestro caso, los sujetos con mejor rendimiento (1, 2 y 3) presentaron tanto altas tasas de acierto (de 72.9% a 87.2% en el test) como entropías elevadas (de 0.213 a 0.489), sugiriendo que la variabilidad no se redujo, sino que se reorganizó para permitir una exploración más eficiente. Por el contrario, los sujetos con bajo rendimiento, como el Sujeto 8 (10.0% en pre-test, 24.9% en test, 30.6% en retención), presentaron entropías muy bajas (entre 0.043 y 0.062), reflejando posiblemente una rigidez motora o una exploración insuficiente. Esto apoya la propuesta de que la variabilidad no es ruido aleatorio, sino un componente funcional del sistema motor saludable (Davids et al., 2006; Stergiou & Decker, 2011).

La desviación estándar del porcentaje de acierto fue mayor en sujetos con bajo rendimiento (por ejemplo, 16.6% en el sujeto 5), indicando una alta inconsistencia en sus resultados. En cambio, sujetos como el 2 y 3 no solo tuvieron alta precisión, sino también gran consistencia ( $SD \approx 1,2\%$ ), lo que refuerza la hipótesis de que el control motor eficiente combina variabilidad útil con consistencia en el rendimiento (Latash et al., 2007).

Las diferencias entre los grupos de edad (jóvenes:  $28.25 \pm 1.79$  años; mayores:  $62.5 \pm 2.29$  años) también resultaron relevantes proporcionando información adicional. Los sujetos jóvenes (sujetos de 1 a 4) mostraron porcentajes de acierto consistentemente más altos y entropías más elevadas que los mayores (sujetos de 5 a 8), quienes tuvieron rendimientos más bajos (medias de 10.0% a 43.3% en pre-test, 24.9% a 66.9% en test, 30.6% a 68.2% en test de retención) y entropías más bajas (medias de 0.054766 a 0.162325 en pre-test, 0.053163 a 0.194451 en test, 0.043535 a 0.208629 en test de retención). Esto podría deberse a una menor familiaridad con interfaces digitales o a diferencias en el control motor asociadas al envejecimiento (Fonticoba et al., 2017), lo que sugiere que los jóvenes exploraron de manera más efectiva, traduciéndose en un mejor rendimiento. No obstante, ambos grupos mejoraron con la práctica, lo que indica que la tarea era accesible para el aprendizaje y que la variabilidad puede ser parte integral del proceso, independientemente de la edad, apoyando la idea de que la variabilidad motora facilita la adaptación en contextos dinámicos en línea con la propuesta de Roth, A. M. (2024) sobre las diferencias funcionales entre la exploración guiada por recompensa y la evitación del error.

Entre las limitaciones del estudio, destaca el tamaño reducido de la muestra (8 participantes), lo que restringe la generalización de los resultados. Además, aunque se controlaron variables contaminantes como la fatiga y las distracciones externas, la experiencia previa con interfaces digitales pudo haber influido en la variabilidad inicial, a pesar del diseño de contramovimiento del cursor. También sería deseable realizar análisis estadísticos más robustos, como un ANOVA mixto, para explorar mejor las relaciones entre variabilidad y rendimiento. Futuras investigaciones podrían ampliar la muestra y explorar otras variables, como la motivación intrínseca o el impacto de diferentes tipos de retroalimentación (positiva vs. negativa), como se propone en el estudio de replicación. Este TFG proporciona una base empírica sólida para entender la variabilidad motora en tareas de aprendizaje por recompensa, con implicaciones prácticas para el diseño de entrenamientos en deportes, rehabilitación y educación, donde la flexibilidad y la adaptación son fundamentales para el éxito.

## 5. Conclusiones

El análisis de la variabilidad motora mediante la entropía ha revelado su papel fundamental en el aprendizaje por refuerzo, actuando como un mecanismo de exploración en entornos dinámicos. Los resultados muestran una correlación positiva alta entre la entropía y el porcentaje de acierto ( $r = 0.89$  en el pre-test,  $r = 0.84$  en el test, y  $r = 0.91$  en el test de retención), lo que indica que una mayor variabilidad estructurada se asocia con un mejor rendimiento en tareas de seguimiento continuo con retroalimentación positiva.

Esta relación refuerza la hipótesis de que el control motor eficiente no depende de la reducción de la variabilidad, sino de su reorganización funcional, lo que permite una exploración adaptativa sin comprometer la consistencia en el rendimiento. De hecho, los sujetos con mejores resultados mostraron tanto alta entropía como baja desviación estándar ( $SD \approx 1.2\%$ ), lo cual sugiere un equilibrio entre exploración y estabilidad. Por el contrario, los participantes con bajo rendimiento exhibieron baja entropía y alta inconsistencia, posiblemente reflejando rigidez motora o exploración limitada.

Las diferencias observadas entre grupos de edad también fueron significativas; los participantes más jóvenes mostraron mayor variabilidad y rendimiento, lo que podría estar relacionado con un mayor dominio del entorno digital o una mejor eficiencia neuromuscular. Sin embargo, todos los sujetos mejoraron con la práctica, lo que sugiere que la tarea fue accesible y que la variabilidad motora puede ser un componente universal del proceso de aprendizaje.

Finalmente, este estudio ofrece una base empírica para seguir investigando el papel de la variabilidad en el aprendizaje motor, proponiendo que medidas como la entropía muestral podrían complementarse con análisis estadísticos más avanzados para mejorar la predicción del aprendizaje, especialmente en tareas basadas en errores. Estos hallazgos tienen aplicaciones relevantes en contextos como el deporte, la rehabilitación y la enseñanza, donde fomentar la exploración motora puede ser clave para optimizar la adaptación y el rendimiento.

## 6. Propuesta de estudio de prospección

Se propone un estudio de prospección titulado "Variabilidad Motora en el Entrenamiento de Baloncesto: Seguimiento de un Compañero con Dribbling en el Campo" para explorar cómo la variabilidad motora y el aprendizaje por refuerzo se trasladan del laboratorio a un contexto de campo en baloncesto, comparando los resultados con los del TFG, que encontró una correlación positiva alta entre entropía muestral (SampEn) y porcentaje de acierto ( $r = 0.89-0.91$ ) en una tarea de seguimiento continuo, pero en un entorno controlado, limitando su aplicabilidad a entornos reales como el deportivo, donde la variabilidad es clave para la adaptabilidad (Davids et al., 2006).

Participarán 30 jugadores de baloncesto (15 principiantes y 15 avanzados, de 18 a 35 años), quienes deberán driblar mientras siguen a un compañero que se mueve de manera impredecible por una zona delimitada de la cancha durante ensayos de 80 segundos, con descansos de 60 segundos, recibiendo retroalimentación positiva (un silbato o aplauso del entrenador) cada vez que mantengan una distancia cercana al compañero (dentro de un radio de 1 metro), mientras que los errores (quedarse atrás o perder el balón) no generan recompensa. Se medirán el porcentaje de acierto (tiempo dentro del radio de 1 metro, registrado con sensores inerciales en ambos jugadores), la entropía muestral (SampEn, calculada a partir de las trayectorias del participante con un sensor en la muñeca), el error (distancia media al compañero) y la tasa de aprendizaje a través de tres fases: pre-test (3 ensayos), test (10 ensayos) y retención (3 ensayos tras una semana). Ç

Un ANOVA mixto analizará los efectos del nivel de experiencia y las fases, y correlaciones de Pearson evaluarán la relación entre SampEn y acierto, esperando una correlación positiva ( $r \approx 0.7-0.8$ ), mayor variabilidad y rendimiento en jugadores avanzados, y una disminución de la variabilidad con la práctica, pero manteniendo su función adaptativa.

Este estudio validará la variabilidad motora como mecanismo clave en el campo, con aplicaciones para entrenamientos de baloncesto que mejoren la adaptabilidad, aunque las condiciones del entorno (ruido, fatiga) y la simplicidad de la tarea frente a un partido real podrían limitar los resultados, sugiriendo futuras investigaciones con otros deportes o tecnologías como la realidad aumentada.

## 7. Bibliografía

- Davids, K., Button, C., & Bennett, S. (2006). *Dynamics of skill acquisition: A constraints-led approach*. Human Kinetics. Pag. 14
- Fonticoba, T., Santos del Riego, S., Varela, S., & Otero, Á. (2017). Cambios en el control motor asociados a la edad y su implicación en la actividad física y la calidad de vida. *Retos: Nuevas tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, 31, 255–259. <https://doi.org/10.47197/retos.v0i31.53139>
- Harbourne, R. T., & Stergiou, N. (2009). Movement variability and the use of nonlinear tools: Principles to guide physical therapist practice. *Physical Therapy*, 89(3), 267–282. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080130>
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schönner, G. (2007). Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*, 11(3), 276–308. <https://doi.org/10.1123/mcj.11.3.276>
- Newell, K. M., & Corcos, D. M. (Eds.). (1993). *Variability and motor control*. Human Kinetics.
- Roth, A. M. (2024). The roles of reinforcement-based and error-based on sensorimotor exploration [Doctoral dissertation]. Nombre de la Universidad.
- Smith, M. A., Ghazizadeh, A., & Shadmehr, R. (2014). Interacting adaptive processes with different timescales underlie short-term motor learning. *PLoS Biology*, 4(6), e1000021. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000021>
- Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, 30(5), 869–888. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002>
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. MIT Press.
- Wu, H. G., Miyamoto, Y. R., Castro, L. N. G., Ölveczky, B. P., & Smith, M. A. (2014). Temporal structure of motor variability is dynamically regulated and predicts motor learning ability. *Nature Neuroscience*, 17(2), 312–321. <https://doi.org/10.1038/nn.3616>

## 7. Anexos

### Anexo I. Metodología: Imágenes de la tarea y del procesamiento de datos.

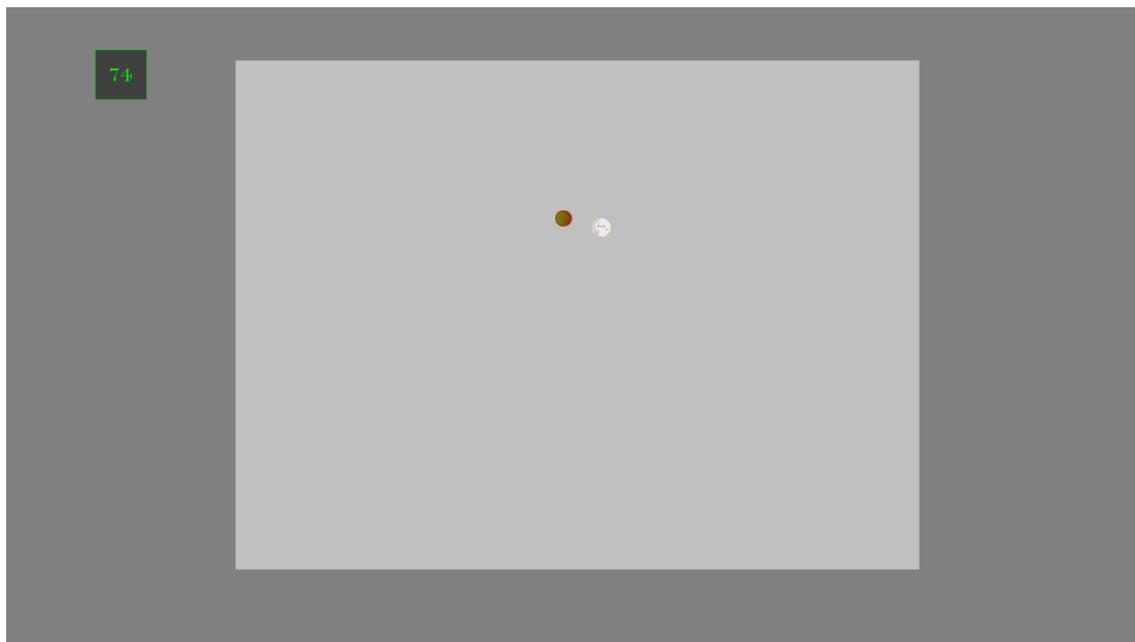


Imagen 1. Vista de la tarea de seguimiento con refuerzo positivo.

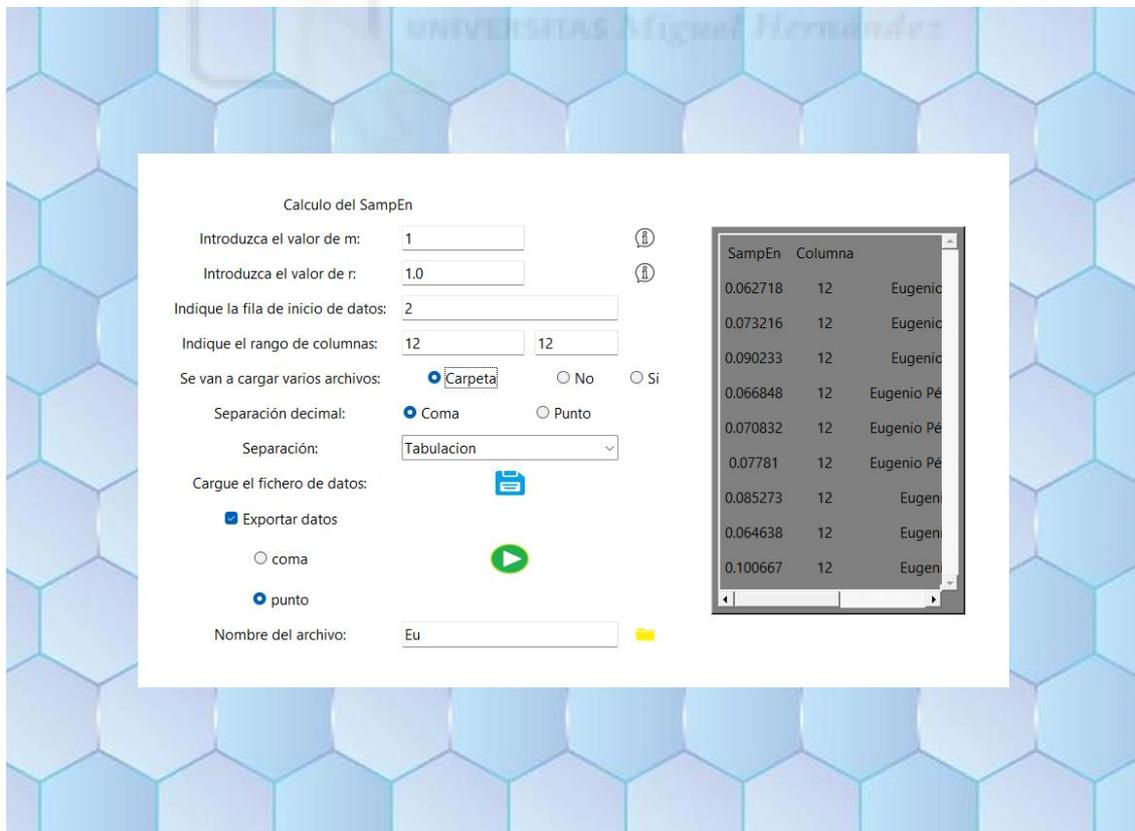


Imagen 2. Vista del software procesador de los datos en crudo de la prueba.

**Anexo II. Resultados: Porcentajes de acierto y entropía muestral por sujeto.**

	Pre-test			Test			Test de retención		
	1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º	3º
Sujeto 1	59,8%	45,8%	66,9%	75,3%	70%	79,3%	84,7%	82,3%	83,7%
Sujeto 2	85,5%	86,4%	87,6%	88,2%	86,3%	88,8%	86,7%	86,7%	85,2%
Sujeto 3	83,9%	85%	85,4%	86,7%	86,2%	86,6%	87,2%	85,1%	87,6%
Sujeto 4	67,6%	73,7%	69,7%	69,3%	71,8%	75%	76,2%	74,5%	77,4%
Sujeto 5	2,7%	16,8%	51,7%	52,8%	41,2%	36,2%	46,5%	43,1%	40,73%
Sujeto 6	30,6%	38,4%	48,6%	70,2%	61,3%	62,4%	70,2%	67,6%	63,6%
Sujeto 7	34,7%	35,2%	60%	54,11%	69,2%	77,7%	74%	68,7%	57,7%
Sujeto 8	7,4%	7,8%	14,8%	25,6%	14,2%	35%	22,3%	37,6%	31,9%

Tabla 1. Porcentajes de acierto obtenidos por los sujetos en cada uno de los ensayos.

	Pre-test			Test			Test de retención		
	1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º	3º
Sujeto 1	0,172074	0,098697	0,164484	0,188933	0,168184	0,289311	0,34249	0,348125	0,448854
Sujeto 2	0,38632	0,448073	0,542598	0,523765	0,374892	0,570665	0,392404	0,414897	0,450353
Sujeto 3	0,332403	0,369954	0,425043	0,424888	0,39448	0,498863	0,398421	0,374597	0,574046
Sujeto 4	0,17521	0,219831	0,153009	0,150023	0,169776	0,165855	0,22253	0,1565	0,178794
Sujeto 5	0,030331	0,035396	0,080012	0,087633	0,047498	0,026681	0,082379	0,034455	0,068087
Sujeto 6	0,073278	0,111998	0,102867	0,169358	0,108589	0,107761	0,247039	0,101125	0,198101
Sujeto 7	0,028604	0,027396	0,180575	0,035215	0,226333	0,321305	0,264477	0,011683	0,349727
Sujeto 8	0,05372	0,056129	0,067905	0,048786	0,042629	0,08474	0,065426	0,037252	0,037926

Tabla 2. Valores de entropía muestral registrados por los sujetos en cada uno de los ensayos.