

# Análisis de la caminata humana aplicado al estudio de la integración sensorial

Dana C. Guber<sup>1</sup>, Jessica Del Punta<sup>1,2</sup>, and Gustavo Gasaneo<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Física del Sur, Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, CONICET, Bahía Blanca, Argentina

<sup>2</sup> Departamento de Matemática, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

<sup>3</sup> Centro Integral de Neurociencias Aplicadas, Bahía Blanca, Argentina  
danaguber97@gmail.com

**Abstract.** El estudio de la integración sensorial establece que la alteración de un sentido debe analizarse en conexión con los restantes. El objetivo de este trabajo es comprender cómo la ausencia de información visual afecta la integración de la información proveniente de los sistemas vestibular y propioceptivo, así como las consecuentes respuestas motoras. Para ello, estudiamos la marcha humana con y sin el recurso visual, a partir del análisis de datos recopilados mediante técnicas de trackeo corporal basado en videos. Se registraron videos de 23 sujetos caminando, bajo condiciones experimentales definidas, de los cuales se extraerán series temporales que indicaban la posición de cada parte de su cuerpo a lo largo de la tarea. A partir de estas, se definieron métricas que permitieron caracterizar el desempeño de cada individuo en su desempeño en la tarea. Mediante algoritmos supervisados, se clasificaron las caminatas según su modalidad (con y sin visión), y mediante algoritmos no supervisados se buscaron agrupamientos de los individuos según las estrategias utilizadas para cumplir la meta propuesta.

**Keywords:** Integración sensorial · Caminata humana · Machine learning · Agrupamientos.

## 1 Introducción

El estudio de la integración sensorial plantea que la alteración de un sentido debe analizarse en conexión con los restantes, ya que el problema puede encontrarse en la adquisición de información del entorno (la cual involucra a más de un sentido), en la transmisión efectiva de esta información al cerebro, en su interpretación adecuada o en la ejecución de la respuesta al estímulo. Esta perspectiva amplía significativamente el ámbito de estudio de los problemas sensoriales [1]. Ahora no solo nos referimos a las dificultades de un sentido en particular, sino también a la manera en que este se integra con el resto de los sentidos.

Un área particularmente desafiante para la investigación es el estudio de la propiocepción, es decir, la percepción del movimiento de las articulaciones y del

cuerpo, así como la posición de distintos segmentos del cuerpo en el espacio [2]. La propiocepción está íntimamente ligada al equilibrio y la orientación en el espacio, de los cuales es responsable el sistema vestibular. Los sistemas propioceptivo y vestibular pueden verse afectados por patologías o lesiones físicas, provocando caídas, golpes y dificultando las actividades de la vida diaria y la participación ocupacional.

En este trabajo, nos proponemos estudiar la propiocepción y su integración con los sistemas visual y vestibular mediante el análisis del comportamiento de sujetos en una tarea de caminata. Este trabajo apunta a ampliar la comprensión de las complejidades de la integración sensorial y sus implicaciones en la salud y el bienestar de los individuos. Para alcanzar este objetivo, diseñamos un experimento de caminata en dos modalidades, con y sin recurso visual. La ejecución de la tarea se registró mediante video, herramienta no invasiva y de fácil acceso para una evaluación. Utilizando librerías de body tracking obtuvimos series temporales del movimiento de diferentes puntos estratégicos del cuerpo. Con la información obtenida realizamos un estudio de las características principales de este movimiento y un análisis con herramientas de machine learning. Esto nos permitió, por un lado, clasificar las modalidades, y por otro, reconocer diferentes estrategias a las que recurrieron los sujetos en el desarrollo de la tarea.

## 2 Materiales y métodos

### 2.1 Participantes y experimento

Filmamos las caminatas de 23 sujetos de entre 18 y 37 años, con edad media de 25 años y desviación estandar de 5 años, de los cuales 3 eran mujeres y 20 hombres. Clasificamos a los participantes en deportistas y no deportistas según su historial deportivo, considerando que personas con más de siete años de entrenamiento son deportistas. En nuestra muestra se clasificaron 14 participantes como deportistas y 9 como no deportistas.

El experimento se basó en caminar en línea recta hacia una pared ubicada a una distancia de 4 metros del punto de partida de la misma. Como referencia, se colocó una cinta en el suelo a lo largo de la trayectoria, y se marcó un punto en la pared donde los sujetos debían colocar su mano con el brazo extendido al llegar. Esta marca se reubicó en cada oportunidad, de acuerdo a la altura del hombro de cada participante y sobre la línea de trayectoria. La experiencia fue registrada a través de videos grabados con un celular colocado en un trípode a 1,20 m de altura, desde el perfil derecho de la línea de caminata, a 4 m de distancia de la mitad de la trayectoria.

Cada sujeto realizó dos caminatas. En la primera podían recurrir a tres sistemas sensoriales, visual, propioceptivo y vestibular, lo que permitió un desarrollo sin dificultades de la tarea. Llamamos a esta modalidad ojos abiertos (OA). En la segunda se les anuló la información proveniente del sistema visual (se les cubrió los ojos con una venda), y se les pidió que replicaran la experiencia, esto es, caminar en línea recta aproximando la distancia respecto a la pared para

poder extender el brazo en el momento adecuado y tener contacto con la marca. A esta etapa la llamamos ojos tapados (OT).

Completamos la información de los registros de video con información sobre la salud y el historial deportivo de cada sujeto, para descartar lesiones o patologías que podrían perjudicar en el estudio y tener en cuenta la influencia de la actividad deportiva. Además, registramos medidas antropométricas de cada participante.

## 2.2 Body tracking

Utilizando las librerías Mediapipe [4] y OpenCV [3], convertimos el movimiento corporal registrado en los videos en series temporales de puntos estratégicos del cuerpo: hombros, caderas, pies y manos. Esto nos permitió recuperar, para cada modalidad, la amplitud y duración de cada paso, la cantidad de pasos, el punto de apoyo de la mano en la pared y el tiempo total de caminata. Para analizar los registros de caminata de nuestro trabajo adaptamos un código, basado en la librería Mediapipe, que fue previamente desarrollado para evaluar riesgo y seguridad en el trabajo con el objetivo de disminuir los accidentes laborales [5].

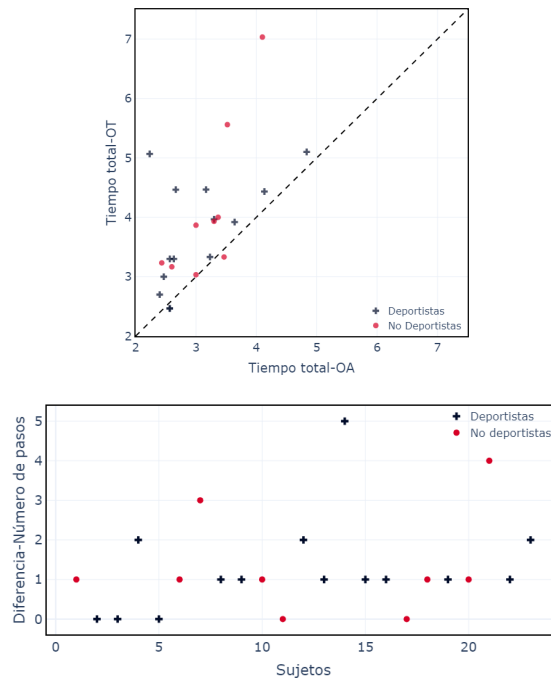
## 3 Resultados

### 3.1 Análisis exploratorio

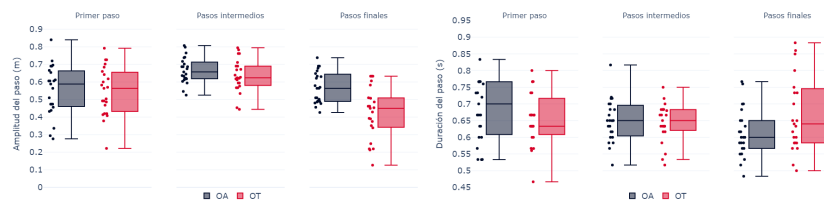
En primer lugar realizamos un análisis exploratorio de los datos, lo que nos permitió seleccionar distintas variables con las que caracterizar la tarea en cada modalidad: tiempo de realización, número de pasos, amplitud media y duración media de pasos. El análisis de tiempo y número de pasos puso en evidencia que con los ojos tapados, los individuos tardan más en realizar la tarea y realizan, en general, uno o dos pasos más que cuando pueden ver el objetivo a tocar. Este análisis no reportó diferencias entre deportistas y no deportistas. La Fig.1 refleja estos resultados.

El análisis de amplitud media y duración media de pasos nos reveló que estas variables debían ser consideradas por tramos, ya que el comportamiento en el primer paso se distinguía del observado en los pasos intermedios y estos a su vez mostraban diferencias con los pasos finales. Se hizo evidente que la necesidad de alcanzar de manera precisa la marca en la pared indujo un comportamiento diferente a medida que los individuos se acercaban a la pared. Por esto, estudiamos separadamente el primer paso, los pasos intermedios (que caracterizamos a partir de los valores medios del segundo y tercer paso) y los finales (valores medios de los dos últimos pasos). La comparación entre modalidades de la amplitud media y duración media de los pasos puede observarse en la Fig.2.

4 D. C. Guber et al.



**Fig. 1.** Panel superior: comparación entre modalidades y actividad deportiva de los tiempos totales de caminata. Panel inferior: diferencia entre cantidad de pasos de las modalidades de cada sujeto, discriminando por actividad deportiva



**Fig. 2.** Panel superior: comparación entre modalidades y tramos de la amplitud. Panel inferior: comparación entre modalidades y tramos de la duración

Estudiamos además la distancia entre la mano y la marca en la pared al finalizar la caminata con ojos tapados, donde pudo observarse que 8 de los 23 sujetos tuvieron menos de 10 cm de distancia. Por otro lado, y aún siendo individuos sin patologías, algunos participantes equivocaron en objetivo por más de 20 cm ya sea porque no lograron una caminata siguiendo la línea recta hacia la

pared (error en el sistema vestibular), o porque no pudieron identificar el centro de su pecho frente a ellos (error en la propiocepción).

Finalmente realizamos un estudio de correlaciones entre las variables consideradas. Encontramos una correlación moderada (coeficiente de correlación de Spearman  $\rho > 0,7$ ) entre los datos y las medidas antropométricas; creemos que este valor podría ser más significativo si se incrementa la cantidad de sujetos estudiados. Por su parte, el tiempo y el número de pasos mostraron una alta correlación positiva ( $\rho = 0,97$  en la caminata OA y  $\rho = 0,92$  en OT). A su vez, ambas variables tienen correlaciones negativas con la amplitud media de los pasos ( $\rho < -0,85$  en las dos modalidades). Estos resultados nos indicarían que podríamos descartar la variable tiempo o la variable número de pasos a la hora de caracterizar a un sujeto. Sin embargo, encontramos también correlación positiva ( $\rho=0,75$ ) entre el tiempo y la duración media de los pasos en la modalidad OA, valor que disminuye en la modalidad OT ( $\rho=0,61$ ), y este comportamiento no se repite para el número de pasos. El hecho de que la correlación se encuentre para la variable tiempo, pero no para el número de pasos nos indica que en algún punto, las variables están aportando información distinta, por lo que no sería recomendable descartar ninguna. Además, la disminución de la correlación al pasar de la modalidad OA a la OT nos habla de la diferencia en el comportamiento: cuando tenemos el recurso de la visión la duración media de los pasos está más vinculada al tiempo que se demora en la tarea, y la falta de información visual diluye la relación entre estas dos variables.

Resaltamos que no encontramos correlación entre la amplitud media y la duración media de los pasos en ninguna de las modalidades. Esto nos dice, por un lado, que ambas variables son relevantes para caracterizar el desempeño del individuo, y por otro que los participantes avanzan a una velocidad variable, lo cual puede ser efecto del corto tramo que debían desplazarse

### 3.2 Clasificación de modalidades

A raíz de lo observado en el análisis exploratorio, hipotetizamos que es posible diferenciar las modalidades basándonos en la información proveniente de las características estudiadas. Por esto, utilizamos dos algoritmos supervisados para clasificar las caminatas registradas según su modalidad (OA y OT).

En primer lugar utilizamos el algoritmo SelectKBest para seleccionar las 5 variables más relevantes para caracterizar las diferencias entre modalidades. El algoritmo nos indicó que el valor medio de la amplitud y de la duración de los pasos finales, el valor medio de la amplitud de los pasos generales, el tiempo total de caminata y la cantidad de pasos eran las variables que debíamos considerar. Aplicamos dos algoritmos supervisados, árbol de decisión y random forest, con las variables seleccionadas, para clasificar las modalidades. En ambos casos utilizamos un 70% de los datos para entrenamiento y un 30% para testeo. Las métricas de evaluación de resultados en el árbol de decisión mostraron una exactitud (accuracy) de 0,9, una precisión de 0,91 y un  $F1 = 0,89$ . Puede observarse la representación gráfica en la Fig.3 En el algoritmo de random forest encontramos una exactitud de 0,69, una precisión de 0,66 y un  $F1 = 0,64$ . Las

6 D. C. Guber et al.

métricas obtenidas en el árbol de decisión resultaron ser más apropiadas para nuestro estudio. Esto seguramente se deba al tamaño de la muestra, una mayor cantidad de datos arrojaría mejores resultados.

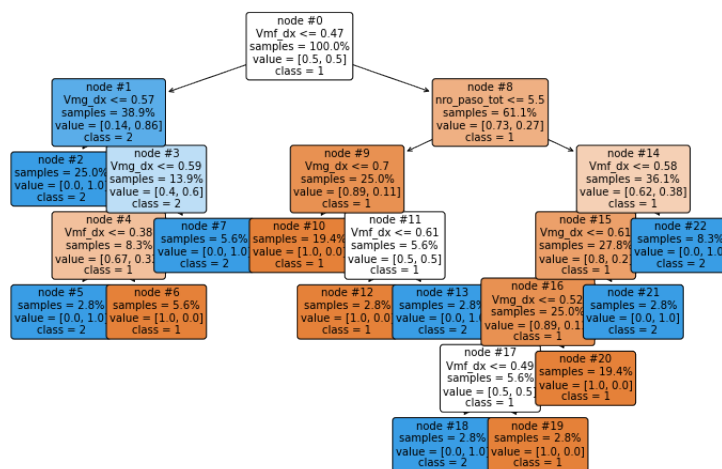


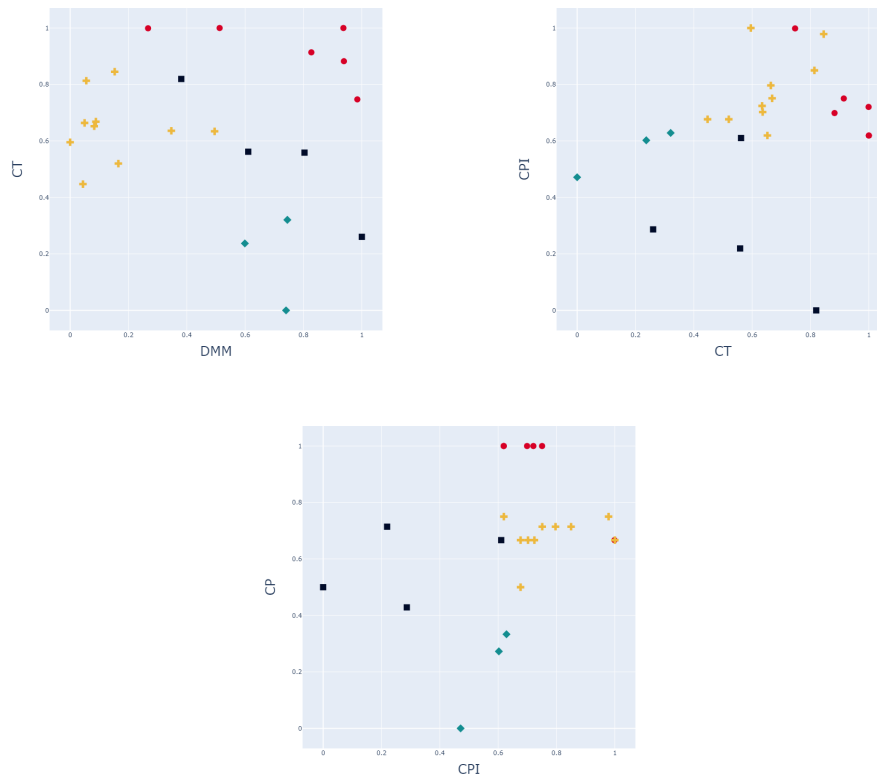
Fig. 3. Árbol de decisión para clasificar modalidades de caminata

### 3.3 Agrupamiento de individuos según la caracterización de su desempeño

Para agrupar a los participantes según su desempeño en la tarea, consideramos las variables antes mencionadas, y agregamos nuevas características que reflejaban mejor la diferencia entre modalidades en el desempeño del individuo. Estas nuevas variables se definieron como el cociente entre el valor de una variable en la modalidad OA y el valor de esa misma variable en la modalidad OT. El método del codo y el coeficiente silueta indicaron que cuatro agrupamientos era la cantidad que mejor clasificaba los datos, y en base a esto aplicamos el algoritmo Kmeans.

Un estudio de centroides reveló las variables más adecuadas para caracterizar los agrupamientos resultantes fueron el cociente entre el número de pasos en las dos modalidades (CP), la distancia entre el apoyo de la mano en la pared y la marca indicada (DMM) en la modalidad OT, el cociente de los tiempos de realización en cada modalidad (CT), y el cociente del valor medio de las duraciones de los pasos intermedios en cada modalidad (CPI). Los agrupamientos obtenidos

se muestran en la Fig.4, donde cada punto corresponde a los valores obtenidos por un individuo en cada variable representada. Los colores corresponden a los distinto agrupamientos.



**Fig. 4.** Relación entre las variables utilizadas para agrupamiento no supervisado.

Según el resultado de la aplicación de este algoritmo, encontramos un grupo de participantes (puntos rojos) que se caracteriza por tener los tiempos y las cantidades de pasos, entre modalidades, similares o idénticos, es decir que este conjunto de sujetos se destacó por el parecido en el desarrollo de sus caminatas. El segundo grupo identificado (cruces amarillas), se caracteriza por tener una distancia entre la mano y la marca en la pared muy pequeña, por lo que podemos afirmar que este conjunto de personas se destacó en la caminata en línea recta y tuvieron mejor noción de la altura de su hombro, y el alineamiento con el pecho, que el resto de los participantes del experimento. El tercero de los grupos resultantes (rombos celestes) está formado por los individuos que mayor diferencia presentaron en los tiempos de caminata, siendo la modalidad con ojos tapados la

de mayor duración. Finalmente, el cuarto grupo identificado (cuadrados azules), se caracteriza por la mayor diferencia entre el valor medio de la duración de los pasos intermedios. Estos pasos son los más "naturales" debido a que ya se dio un primer impulso en el primer paso, y la pared aun está lejos como para afectar notablemente la caminata, por lo que la diferencia entre las duraciones entre modalidades indica que los sujetos realizaron su caminata con ojos tapados con inseguridad desde el principio, y no fue algo generado solo por la cercanía a la pared.

## 4 Conclusiones

En este trabajo abordamos el estudio del funcionamiento del sistema sensorial en humanos a partir del análisis de la respuesta motora de sujetos a los que se les solitito realizar una tarea de caminata. Se estudio la integración entre el sistema visual, el propioceptivo y el vestibular en sujetos adultos sin patologías identificadas. Se les propuso a los mismos realizar una caminata corta en línea recta y al final de la misma el tocar una marca ubicada a una dada altura. Se implementaron dos modalidades, una en la cual podían ver donde debían tocar y otra con ojos tapados en la cual no podían ver la marca a tocar. Durante el proceso de caminata se filmo a los sujetos. Los videos permitieron, mediante rutinas de body tracking, caracterizar cada una de las partes relevantes del cuerpo de los sujetos.

Los algoritmos supervisados nos permitieron clasificar las modalidades de caminata, lo que nos indica que efectivamente los sujetos se comportan de manera distinta al tener o no el recurso visual. Es decir, encontramos evidencias cuantitativas de que las caminatas tienen características que las diferencian cuando la integración sensorial es completa (visual, propioceptivo y vestibular) respecto de cuando solo se cuenta con los sistemas propioceptivo y vestibular. Las características destacadas para la clasificación nos revelaron que las modificaciones en el comportamiento de los individuos se deben a la aproximación a la pared. Esto evidencia que los sistemas que propiamente se encargan de procesar la información espacial y de la ubicación de las partes de nuestro cuerpo, no logran una buena respuesta cuando falta el sentido de la visión.

La caracterización propuesta de los sujetos nos permitió agruparlos según características que, de alguna manera, reflejan las estrategias utilizadas para la realización de la tarea. Esto evidenció diferentes reacciones presentes durante la realización de la caminata tan solo integrando la información de los sistemas propioceptivo y vestibular en relación a la modalidad con ojos abiertos.

La metodología implementada puede ser de gran valor para la caracterización de sujetos con diversas patologías tales como Parkinson o ante secuelas remanentes de un accidente cerebro vascular entre otras. Los métodos utilizados tienen la ventaja de ser no invasivos, de muy simple aplicación en el ámbito clínico y bajo costo, y permiten la cuantificación de diversas variables que podrían convertirse en biomarcadores para la caracterización de las patologías mencionadas.



## 5 Agradecimientos

Esta investigación se desarrolló como parte de los proyectos UNS PGI 24/F078, CONICET PIP KE3 11220200102879CO y por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica PICT - 2020 - SERIE A - 02450.

## References

1. A. Ayres, J. Robbins, S. McAtee, and P. T. Network: Sensory Integration and the Child: Understanding Hidden Sensory Challenges. Western Psychological Services, (2005)
2. C. Sherrington.: The integrative action of the nervous system. In: The Journal of Nervous and Mental Disease, vol.34, no. 12, pp. 801–802, (1907).
3. OpenCV.: Opencv: Open source computer vision library. (2024)
4. OpenCV.: Mediapipe. (2023)
5. M. Massiris Fernández, J. A. Fernández, J. M. Bajo, and C. A. Delrieux.: Ergonomic risk assessment based on computer vision and machine learning. In: Computers & Industrial Engineering, vol. 149, (2020).