



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Comparación de dos acelerómetros triaxiales para medir la actividad locomotora y el ritmo circadiano en corderos

Comparison of two tri-axial accelerometers for measuring locomotor activity and circadian rhythm in lambs

Autor/es

Carlos Aguerri Michavila

Director/es

José Alfonso Abecia Martínez

Facultad de Veterinaria.

2023/2024

Índice

1-Introduccion.....	5
1.1- ¿Qué es un Acelerómetro Triaxial?	5
1.2- Principio de Funcionamiento de los Acelerómetros Triaxiales	5
1.3- Desarrollo Histórico de los Acelerómetros.....	6
1.4- Uso de los acelerómetros en la medicina veterinaria	7
1.5- Comparación técnica de los acelerómetros usados en el presente trabajo	10
2-Justificación y objetivos	12
3-Materiales y metodos	13
3.1-Animales	13
3.2-Acelerometros	13
3.3- Análisis estadístico	14
4-Resultados y discusiones	15
4.1-Experimento 1.....	15
4.2-Experimento 2.....	17
4.3- Discusiones	20
5-Conclusiones	21
6-Valoración personal y agradecimientos.....	22
7-Referencias bibliográficas	24

RESUMEN

Los acelerómetros triaxiales proporcionan un medio no invasivo para registrar todos los movimientos a pequeña escala del cuerpo del animal. Un resumen de las métricas que se pueden extraer de un acelerómetro determinado, y la validez y fiabilidad de las estimaciones obtenidas, determinan si un acelerómetro en particular es adecuado para la investigación. Los objetivos de este estudio fueron comparar el rendimiento de dos modelos de acelerómetros triaxiales en la cuantificación del comportamiento de ovejas adultas y corderos en crecimiento, y comparar los ritmos circadianos calculados a partir de los datos de actividad locomotora recogidos por estos acelerómetros. En el experimento 1 y 2 se utilizaron diez ovejas vacías y diez corderos destetados, que estaban en su periodo de engorde, respectivamente. Las ovejas y los corderos se equiparon con dos modelos de acelerómetros disponibles comercialmente (ActiGraph wGT3X-BT y Axivity AX3), que se colocaron en un collar de cuello que permaneció en su lugar durante 10 días. Los perfiles de la actividad locomotora media de ovejas y corderos basados en los dos dispositivos fueron similares. Además, las curvas cosinor de los dos dispositivos (ritmos circadianos) se ajustaron entre sí y sus acrofases no difirieron significativamente. Ambos acelerómetros indicaron que todas las ovejas y corderos tenían un ritmo de 24 horas en la actividad locomotora. El coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación entre los datos de Actigraph y Axivity fueron 0,798 ($P < 0,01$) y 0,6369 ($P < 0,01$), y 0,940 ($P < 0,01$) y 0,8843 ($P < 0,01$), para ovejas y corderos, respectivamente. Dada la alta correlación entre los acelerómetros triaxiales Actigraph y Axivity en la cuantificación de las actividades de ovejas y corderos, y la similitud de las curvas de ritmicidad circadiana calculadas a partir de los datos de los dos dispositivos, ambos modelos son adecuados para medir la actividad locomotora en estos animales.

Palabras clave: ovejas, acelerómetro, actividad locomotora, ritmo circadiano

ABSTRACT

Triaxial accelerometers provide a non-invasive means of recording all small-scale body motions of an animal. The summary metrics that can be extracted from a given accelerometer, and the validity and reliability of the estimates obtained, determine whether a particular accelerometer is suitable for research. The objectives of this study were to compare the performance of two models of triaxial accelerometers in quantifying the behavior of adult ewes and growing lambs, and to compare the circadian rhythms calculated from the locomotor activity data collected by these accelerometers. Ten non-pregnant ewes, and 10 weaned lambs, which were in their fattening period were used in experiment 1 and 2, respectively. Ewes and lambs were fitted with two models of commercially available accelerometers (ActiGraph wGT3X-BT and Axivity AX3), which were attached to a neck collar that remained in place for 10 d. The profiles of the mean locomotor activity of ewes and lambs based on the two devices were similar. In addition, the cosinor curves of the two devices fit each other, and their acrophases did not differ significantly. Both accelerometers indicated that all ewes and lambs had a 24-h rhythm in locomotor activity. The coefficient of correlation and the coefficient of determination between the Actigraph and the Axivity data were 0,798 ($P < 0,01$) and 0,6369 ($P < 0,01$), and 0.940 ($P < 0,01$) and 0,8843 ($P < 0,01$), for ewes and lambs, respectively. Given the strong correlations between the Actigraph and the Axivity tri-axial accelerometers in quantifying the activities of ewes and lambs, and the similarity of the circadian rhythmicity curves calculated from data from the two devices, both brands of accelerometers are suitable for measuring the locomotor activity in these animals.

Keywords: sheep, accelerometer, locomotor activity, circadian rhythm

1. Introducción

1.1 ¿Qué es un Acelerómetro Triaxial?

Un acelerómetro triaxial es un sensor que mide la aceleración en tres dimensiones perpendiculares entre sí. Estos sensores pueden detectar tanto la aceleración estática, como la gravedad, como la aceleración dinámica resultante del movimiento o la vibración. Esta capacidad de medir en tres ejes permite un análisis detallado y preciso del movimiento en el espacio tridimensional (Reilly et al., 2006).

La acelerometría es la técnica de medir y analizar la aceleración de un objeto. Utilizando acelerómetros, se pueden obtener datos sobre la velocidad y la dirección del movimiento, así como sobre las fuerzas que actúan sobre el objeto. La acelerometría es una herramienta crucial en diversas disciplinas, incluyendo la ingeniería, la medicina y la física, donde se utiliza para monitorear y evaluar el comportamiento dinámico de sistemas y estructuras (Woodman, 2007).

1.2 Principio de Funcionamiento de los Acelerómetros Triaxiales

El funcionamiento de un acelerómetro triaxial se basa en el uso de masas sensibles al movimiento y transductores que convierten este movimiento en señales eléctricas. Los acelerómetros modernos suelen utilizar tecnologías como la microelectromecánica (MEMS), que permite la integración de componentes miniaturizados en un solo chip (Reilly et al., 2006).

En un acelerómetro triaxial MEMS típico, cada uno de los tres ejes contiene una pequeña masa suspendida por resortes. Cuando el dispositivo experimenta una aceleración, la inercia de la masa causa una desviación de su posición, lo que, a su vez, se convierte en una señal eléctrica proporcional a la aceleración experimentada. Esta señal se procesa para obtener los componentes de aceleración en los tres ejes (Denishev, y Petrova 2007).

1.3 Desarrollo Histórico de los Acelerómetros

Primeros Acelerómetros

Los primeros acelerómetros, desarrollados en la primera mitad del siglo XX, eran dispositivos grandes y pesados que utilizaban principios mecánicos simples. Estos dispositivos consistían en masas colgantes y resortes que medían la deflexión causada por la aceleración. El trabajo de pioneros como George Washington Pierce en 1918 sentó las bases de la acelerometría moderna (Walter, 2006).

Estos primeros acelerómetros eran limitados en términos de precisión y sensibilidad, y estaban restringidos debido a su tamaño y costo. Durante la Segunda Guerra Mundial, estos dispositivos fueron cruciales para la navegación inercial y la estabilización de armamentos (Yazdi et al., 1998), también fueron importantes en la aviación y la industria automotriz para medir y controlar la aceleración y la vibración.

Acelerómetros Modernos

El avance en tecnologías como la microelectrónica y la MEMS ha revolucionado el diseño y las aplicaciones de los acelerómetros. Los acelerómetros MEMS, introducidos en las últimas décadas, son extremadamente pequeños, eficientes y precisos. Estos sensores se integran fácilmente en dispositivos portátiles, como teléfonos inteligentes y relojes inteligentes, permitiendo aplicaciones en el monitoreo de la salud, la realidad aumentada, y la navegación inercial (Albarbar et al., 2008).

El primer artículo en el que se discute la aplicación de los acelerómetros en la medicina es el de (Montoye et al., 1983). Durante la década de los 90, su uso en la investigación continuó, aunque de forma reducida debido al altísimo coste y a los problemas relacionados con la fiabilidad y la calibración de los acelerómetros de la época. A partir de los años 2000, el uso de acelerómetros en la medición de la actividad física ha experimentado un crecimiento considerable. Este aumento se refleja en la cantidad de artículos publicados, que pasó de 10 o menos por año entre 1981 y 1996, a casi 90 por año en 2003 y 2004, y más de 600 artículos en 2012 y 2013 (Troiano et al., 2014).

1.4 Uso de los acelerómetros en la medicina veterinaria

La acelerometría es un avance significativo sobre el método tradicional de monitorear animales en el campo visualmente, y proporciona el seguimiento más preciso de las actividades de animales. Los acelerómetros triaxiales se han convertido en herramientas esenciales en la medicina veterinaria, proporcionando datos detallados sobre el comportamiento y la actividad física de los animales. Estas aplicaciones abarcan una amplia gama de usos, desde el monitoreo de la salud y el bienestar hasta la investigación de comportamientos específicos en diferentes especies animales.

Animales de Abasto

En el ganado de abasto, los acelerómetros triaxiales tienen múltiples aplicaciones cruciales para mejorar la eficiencia y el bienestar animal (Fig.1) y (Fig.2). Uno de los usos más comunes es el monitoreo del comportamiento alimentario. Estos dispositivos pueden registrar la frecuencia y duración de las comidas, así como los patrones de masticación y rumia. Esta información es vital para ajustar las dietas y mejorar la eficiencia alimentaria, lo que a su vez puede aumentar la productividad y reducir los costos de alimentación (Iqbal et al., 2021).

Además, los acelerómetros se utilizan para detectar comportamientos anómalos, como cojera o cambios en los patrones de actividad, que pueden indicar problemas de salud. Este monitoreo continuo permite la identificación temprana de enfermedades o lesiones, facilitando intervenciones rápidas y efectivas (Martiskainen et al., 2009). En la investigación de comportamientos reproductivos, estos dispositivos pueden detectar el comportamiento de monta y los períodos de celo, optimizando el momento de la inseminación y mejorando las tasas de concepción (Saint-Dizier & Chastant-Maillard, 2012).



Fig.1. Dos acelerómetros colocados en el collar y en la pata delantera izquierda de una vaca. Obtenido de Tran et al. (2022).



Fig. 2. Cerdo con acelerómetro colocado en la oreja derecha. Obtenido de Chapa et al. (2020).

Animales de Compañía

En animales de compañía, los acelerómetros triaxiales se utilizan para monitorear la actividad física y el comportamiento en el hogar (Fig.3). Estos dispositivos son especialmente útiles para detectar problemas de salud y bienestar, como la obesidad, la artritis o la ansiedad. Los datos recogidos pueden ayudar a los propietarios y veterinarios a diseñar planes de ejercicio y manejo del comportamiento más efectivos, mejorando la calidad de vida de las mascotas (Morrison et al., 2014).



Fig.3. Perro con acelerómetro colocado en el la parte ventral del cuello. Obtenida de Bolton et al. (2021).

En la rehabilitación y fisioterapia veterinaria, los acelerómetros son herramientas importantes para evaluar el progreso de los animales que se están recuperando de lesiones o cirugías. Proporcionan datos objetivos sobre la movilidad y la actividad, permitiendo a los veterinarios ajustar los planes de tratamiento según sea necesario para asegurar una recuperación óptima (Schuster et al 2023). Además, el monitoreo de la actividad y el ejercicio es crucial en la gestión de la salud de los animales, especialmente en aquellos con necesidades específicas de ejercicio, como los caballos de competición o los perros de trabajo. Los acelerómetros triaxiales proporcionan datos precisos sobre la intensidad y la duración del ejercicio, lo que ayuda a diseñar programas de entrenamiento adecuados y a prevenir lesiones por sobre entrenamiento (Sweeney et al 2024).

Fauna Salvaje

En la investigación de fauna salvaje, los acelerómetros triaxiales son herramientas valiosas para el estudio del comportamiento y la ecología (Fig. 4). Estos dispositivos pueden rastrear los movimientos y actividades de los animales en su hábitat natural, proporcionando datos cruciales para la conservación y manejo de especies en peligro. Los acelerómetros permiten a los investigadores comprender mejor los patrones de actividad diarios, las migraciones y las interacciones con el medio ambiente (Brown et al., 2013).

Además, estos dispositivos son útiles para el monitoreo del bienestar animal en proyectos de conservación. Pueden detectar cambios en los patrones de actividad que pueden indicar estrés o problemas de salud, facilitando intervenciones tempranas (Brown et al., 2013). Los acelerómetros también se utilizan para evaluar el impacto de las actividades humanas en la vida silvestre, ayudando a desarrollar estrategias de mitigación más efectivas (Brown et al., 2013).



Fig. 4. *Tamias speciosus* en cautiverio con acelerómetro. Obtenida de: Hammond et al. (2016).

1.5 Comparación técnica de los acelerómetros usados en el presente trabajo

Las métricas que se pueden extraer de un acelerómetro determinado, y la validez y fiabilidad de las estimaciones obtenidas, determinan si un acelerómetro en particular es adecuado para la investigación que busca evaluar objetivamente la actividad locomotora en el ganado. Existen numerosos tipos de acelerómetros disponibles comercialmente, y no está claro qué acelerómetro es el más adecuado para estimar la actividad en animales estabulados.

Primero, al comparar diferentes acelerómetros triaxiales es importante cuantificar su sensibilidad, precisión y exactitud, lo cual ayudará a determinar qué acelerómetro es el mejor para una aplicación particular. Segundo, dado que los acelerómetros deben calibrarse periódicamente para mantener su precisión, al comparar las salidas de dos acelerómetros, uno de los cuales se sabe que es preciso o está calibrado, se puede verificar la calibración del otro acelerómetro. Tercero, algunos acelerómetros pueden haber sido diseñados para aplicaciones o entornos específicos; por lo tanto, al comparar su rendimiento, se puede identificar el acelerómetro que es más adecuado para una situación particular basándose en factores como la especie, el rango de temperatura, la resistencia a impactos, el tamaño y el consumo de energía. Otros problemas son la rentabilidad de diferentes acelerómetros, y cómo cada

dispositivo puede proporcionar información sobre nuevas tecnologías, materiales o diseños, identificando áreas de mejora e innovación, lo que lleva al desarrollo de acelerómetros de mejor rendimiento.

A pesar de que los dos dispositivos a comparar en este trabajo tengan una función similar, podemos encontrar alguna diferencia en sus características técnicas (Tabla 1).

El ActiGraph wGT3X-BT tiene unas dimensiones de 4,6 cm x 3,3 cm x 1,5 cm y un peso de 19 gramos. Está equipado con un sensor de aceleración triaxial que tiene un rango de aceleración de ± 8 g. La frecuencia de muestreo del ActiGraph es configurable entre 30 y 100 Hz, y tiene la capacidad de almacenar datos sin procesar a una frecuencia de hasta 100 Hz. La capacidad de almacenamiento es de 512 MB, y la duración de la batería puede llegar hasta 25 días con una sola carga, dependiendo de la configuración de muestreo. Una de las características más destacadas del ActiGraph wGT3X-BT es su conectividad Bluetooth Low Energy (BLE), que permite la transmisión de datos en tiempo real y la compatibilidad con dispositivos móviles y software de análisis. Además, este dispositivo es resistente al agua hasta 1 metro de profundidad durante 30 minutos (IPX7), lo que lo hace adecuado para actividades al aire libre y monitoreo de sueño. El ActiGraph es compatible con el software ActiLife para el análisis de datos de actividad física y sueño, y puede integrarse con plataformas de salud e investigación para el seguimiento de la actividad en estudios longitudinales.

Por otro lado, el Axivity AX3 tiene unas dimensiones más compactas de 2,3 cm x 2,3 cm x 0,8 cm y un peso de 11 gramos. También cuenta con un sensor de aceleración triaxial con un rango de aceleración de ± 8 g. La frecuencia de muestreo del Axivity AX3 es configurable desde 12,5 hasta 3200 Hz, lo que permite una amplia gama de aplicaciones y configuraciones de investigación. Al igual que el ActiGraph, el Axivity AX3 tiene una capacidad de almacenamiento de 512 MB, pero su duración de batería es de hasta 14 días con configuraciones típicas de muestreo. A diferencia del ActiGraph, el Axivity AX3 no posee conectividad inalámbrica, utilizando en su lugar USB 2.0 para la transferencia de datos y carga de la batería. Aunque esto limita la transmisión de datos en tiempo real, asegura una mayor duración de la batería. El Axivity AX3 es altamente resistente al agua, soportando inmersiones hasta 10 metros de profundidad (IP68), lo que lo hace ideal para estudios que requieren inmersiones prolongada.

Las diferencias más significativas entre el ActiGraph wGT3X-BT y el Axivity AX3 incluyen el tamaño y peso, con el Axivity siendo más compacto y ligero. El ActiGraph ofrece conectividad BLE, lo que permite la sincronización de datos en tiempo real, mientras que el Axivity no tiene

esta capacidad, pero ofrece una mayor duración de batería en ausencia de conectividad inalámbrica. En términos de resistencia al agua, el Axivity tiene una ventaja significativa con su capacidad para soportar inmersiones más profundas y prolongadas. Además, el Axivity ofrece una gama más amplia de frecuencias de muestreo, lo que lo hace más versátil para diferentes tipos de investigaciones.

Tabla 1. Características técnicas de los acelerómetros utilizados en este trabajo

Característica	ActiGraph wGT3X-BT	Axivity AX3
Dimensiones	4,6 cm x 3,3 cm x 1,5 cm	2,3 cm x 2,3 cm x 0,8 cm
Peso	19 gramos	11 gramos
Sensor	Aceleración triaxial	Aceleración triaxial
Rango de Aceleración	±8 g	±8 g
Frecuencia de Muestreo	Configurable de 30 a 100 Hz	Configurable de 12,5 a 3200 Hz
Capacidad de Almacenamiento	512 MB	512 MB
Duración de la Batería	Hasta 25 días	Hasta 14 días
Conectividad	Bluetooth Low Energy (BLE)	USB 2.0
Impermeabilidad	Resistente al agua hasta 1 metro (IPX7)	Resistente al agua hasta 10 metros (IP68)

(Axivity, 2024). (ActiGraph, 2024).

2. Justificación y objetivos

Vista la importancia de la acelerometría en los estudios de comportamiento animal, en este trabajo, planteamos la hipótesis de que el uso de dos marcas de acelerómetros triaxiales debería conducir a las mismas conclusiones sobre la actividad locomotora de ovejas, ya sean ovejas adultas o corderos de engorde.

Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron comparar el rendimiento de dos modelos de acelerómetros triaxiales (Actigraph wGT3X-BT y Axivity AX3), que se han utilizado por separado para cuantificar la actividad locomotora en ovejas, en la cuantificación del comportamiento de ovejas adultas y corderos en crecimiento, y comparar los ritmos circadianos calculados a partir de los datos de actividad locomotora recogidos por estos acelerómetros.

3. Metodología

3.1. Animales

En el experimento 1, se utilizaron 10 ovejas adultas y vacías de raza Rasa Aragonesa (edad media (\pm DE): 5 ± 2 años; peso vivo (PV) medio: $65,9 \pm 5,7$ kg). En el experimento 2, se utilizaron 10 corderos destetados de la raza Rasa Aragonesa (edad media: 60 ± 4 días; PV medio: $17,4 \pm 3,1$ kg), que estaban en su periodo de engorde (desde el destete a los 45 días de edad hasta el sacrificio a los 90 días de edad). Las ovejas y los corderos se equiparon con dos modelos de acelerómetros disponibles comercialmente que registran datos de aceleración, los cuales se colocaron en un collar de cuello que permaneció en su lugar durante 10 días (Fig. 5). El análisis excluyó datos del primer y últimos días de la recopilación de datos.

3.2. Acelerómetros

Se compararon las prestaciones de dos modelos de acelerómetros triaxiales en los dos experimentos: el ActiGraph wGT3X-BT (ActiGraph, FL, EE.UU.) y el Axivity AX3 3-Axis Logging Accelerometer (Axivity, Newcastle, Reino Unido). Ambos sensores registran aceleraciones (actividad) basadas en la amplitud (g) y la frecuencia (Hz) del movimiento del individuo a lo largo de tres ejes ("x" para adelante-atrás, "y" para lado a lado, y "z" para arriba-abajo). Los sensores se programaron para recopilar datos a una tasa de 50 Hz, lo que equivale a 50 muestreos por segundo. Los datos de actividad de los dispositivos Actigraph se descargaron en el software ActiLife (ActiGraph, LLC, Pensacola, FL, EEUU) como "cuentas de actividad por intervalos de 1 minuto", y los datos de los dispositivos Axivity se descargaron en el software OMGUI Configuration and Analysis Tool (código abierto) en "g" (la aceleración de la gravedad, $-9,8 \text{ m s}^{-2}$).

Los datos (cuentas o g) de los tres ejes se utilizaron para crear valores de datos de actividad minuto a minuto (Vector de Magnitud, VM), que son las magnitudes de los vectores resultantes formados a partir de la combinación de las aceleraciones muestreadas de los tres ejes (x, y, z) en cualquier dispositivo.

$$VM = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$



Fig. 5. Ovejas (A) y corderos (B) equipados con dos tipos de sensores de acelerómetros triaxiales comerciales (ActiGraph wGT3X-BT y Axivity AX3 3-Axis (C)) que registran datos de aceleración, los cuales se colocaron en un collar en el cuello (D).

3.3. Análisis estadístico

La actividad locomotora media (\pm ES) estimada durante los ocho días se calculó en función de los datos de ambos dispositivos, y se calcularon las medias horarias. Las medias horarias se ajustaron a la curva coseno de un ritmo de actividad de 24 horas, que se obtuvo mediante el método cosinor en la plataforma en línea Cosinor (<https://cosinor.online/app/cosinor.php>) (Molcan, 2019). La acrofase, que es el momento en el que ocurre la mayor actividad según el modelo cosinor, se calculó basándose en los datos de los dos acelerómetros. Para confirmar la ritmicidad circadiana, se comparó el modelo coseno con los datos de entrada mediante una prueba F. Si se rechazaba la hipótesis nula ($p < 0,05$), los datos

de entrada se ajustaban a un ritmo circadiano de 24 horas. Las acrofases calculadas para cada oveja y cordero con cada uno de los acelerómetros se compararon mediante una prueba t para muestras relacionadas. Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre los valores de cuentas/min registrados por el acelerómetro Actigraph y los valores en g registrados por el acelerómetro Axivity medidos al mismo tiempo. Se realizó un análisis de regresión lineal entre los valores estimados por los acelerómetros Actigraph y Axivity.

4. Resultados y discusión

4.1. Experimento 1

Los perfiles de la actividad locomotora media de las ovejas basados en los dos dispositivos fueron similares, ya sea basados en un perfil de 24 horas, con los datos registrados cada 10 segundos (Fig. 6) o cada hora (Fig. 7). Ambos dispositivos indicaron un pico de actividad a las 0825 h. Además, las curvas cosinor de los dos dispositivos se ajustaron entre sí (Fig. 8), y sus acrofases no difirieron significativamente (Actigraph: 1144 h; Axivity: 1124 h). Ambos acelerómetros indicaron que todas las ovejas tenían un ritmo de 24 horas en la actividad locomotora. El coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación entre los datos del Actigraph y el Axivity fueron 0,798 ($P < 0,01$) y 0,637 ($P < 0,01$), respectivamente (Fig. 9).

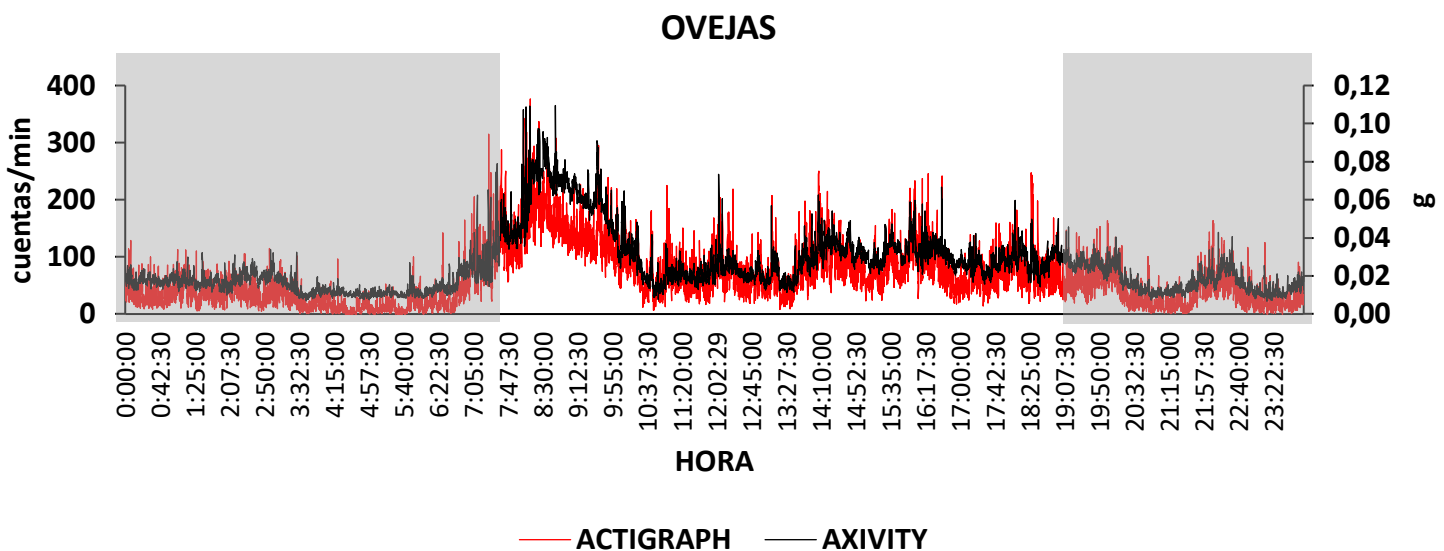


Fig. 6. Actividad locomotora de las ovejas medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales (ActiGraph, cuentas/min, y Axivity, g) registrada cada 10 segundos durante 8 días (las áreas grises representan la noche).

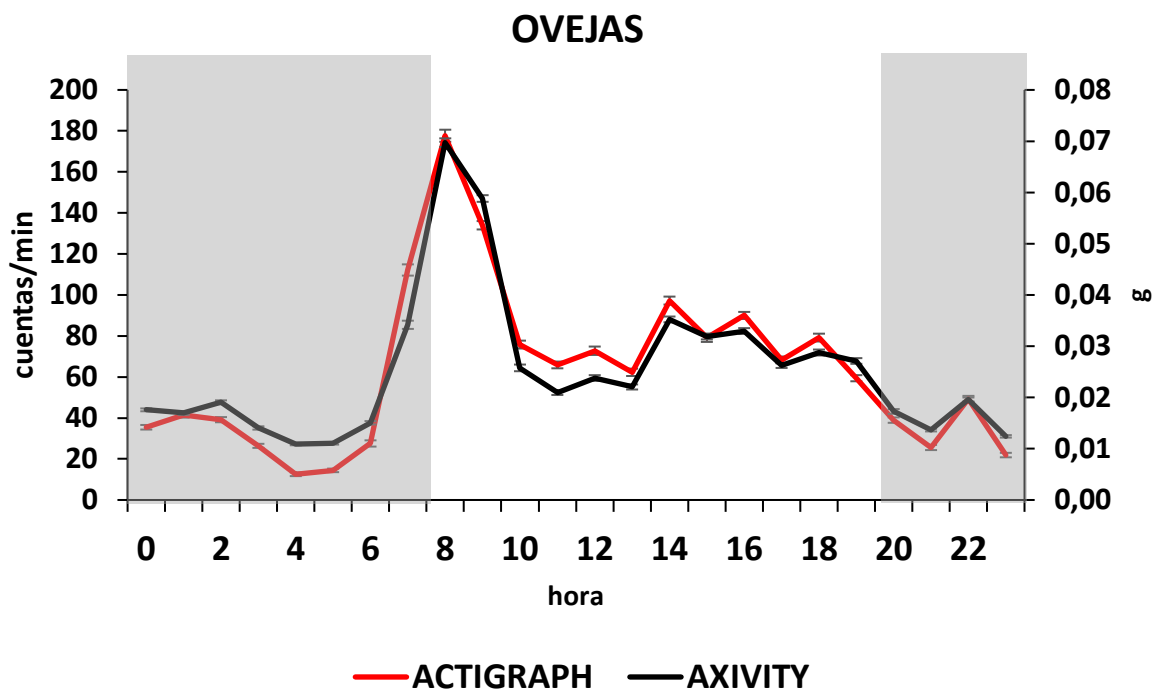


Fig. 7. Actividad locomotora horaria media (\pm ES) de las ovejas medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales (ActiGraph, cuentas/min, y Axivity, g) registrada cada 10 segundos durante 8 días (las áreas grises representan la noche).

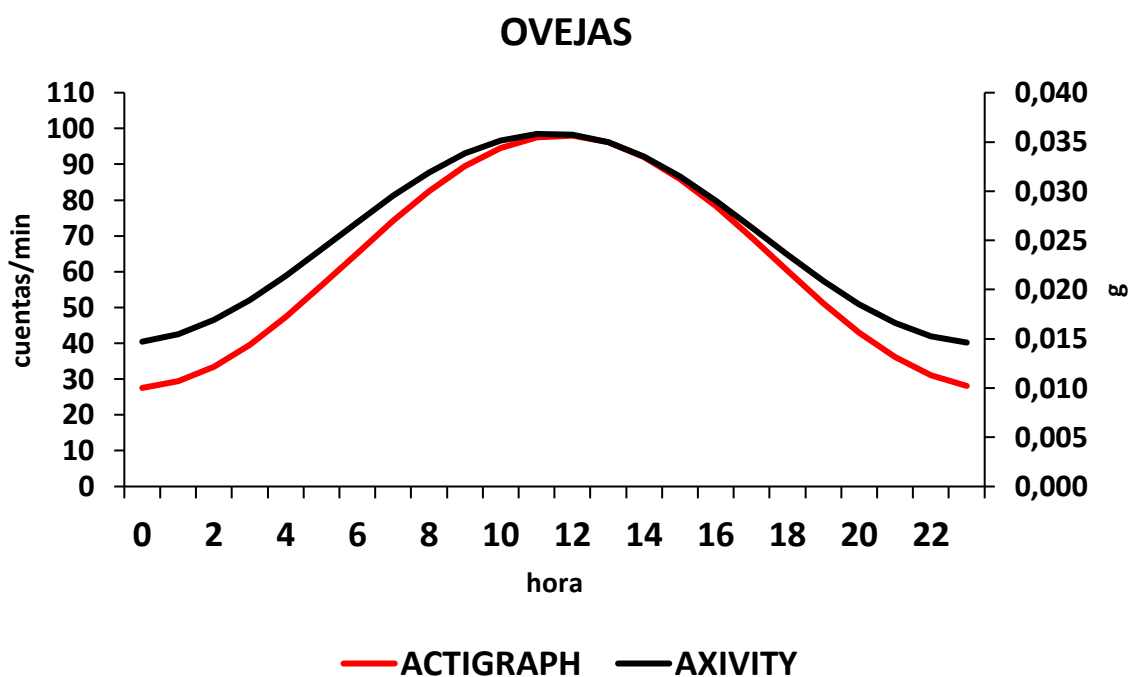


Fig. 8. Curvas cosinor de un ritmo de actividad de 24 horas en la actividad locomotora de las ovejas medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales (ActiGraph, cuentas/min, y Axivity, g) registradas cada 10 segundos durante 8 días.

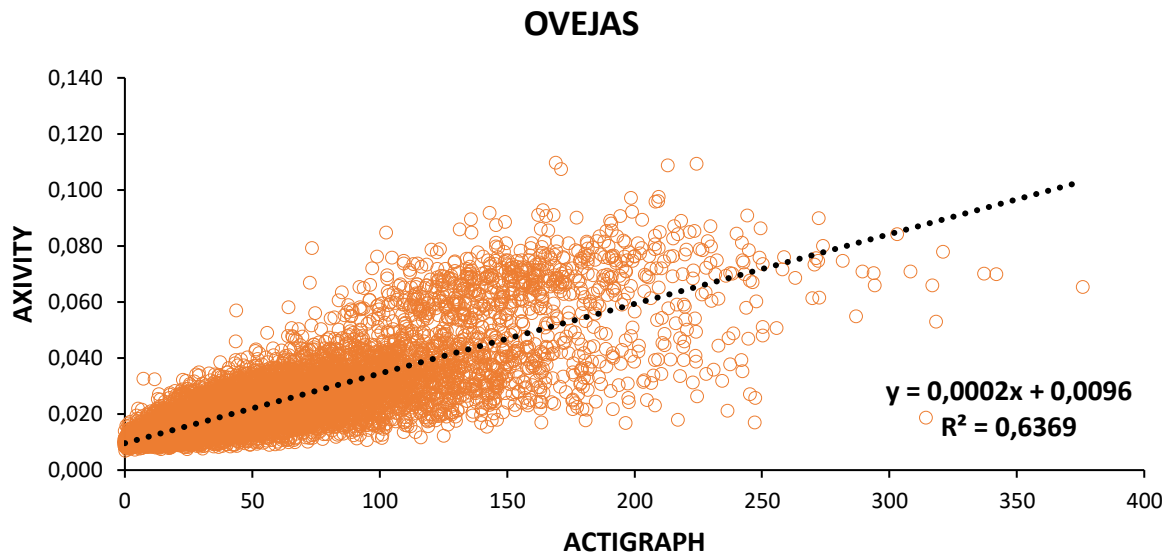


Fig. 9. Regresión lineal entre los valores de cuentas/min registrados por el acelerómetro Actigraph y los valores en g registrados por el acelerómetro Axivity de la actividad locomotora de las ovejas medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales durante 8 días

4.2. Experimento 2

El perfil de 24 horas, ya sea basado en datos registrados cada 10 segundos (Fig. 10) o cada hora (Fig. 11), mostró que los dos dispositivos indicaron una actividad locomotora media similar en los corderos. Ambos acelerómetros indicaron que los animales tenían picos crepusculares de actividad a las 0749 h y 1925 h. Las curvas cosinor derivadas de los dos dispositivos coincidieron bastante bien entre sí, y sus acrofases (Actigraph: 2316 h; Axivity: 2246 h) no difirieron significativamente (Fig. 12). Las dos marcas de acelerómetros indicaron que todos los corderos tenían un ritmo de 24 horas en la actividad locomotora. El coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación entre los datos de los acelerómetros Actigraph y Axivity fueron 0,940 ($P < 0,01$) y 0,8843 ($P < 0,01$), respectivamente (Fig. 13).

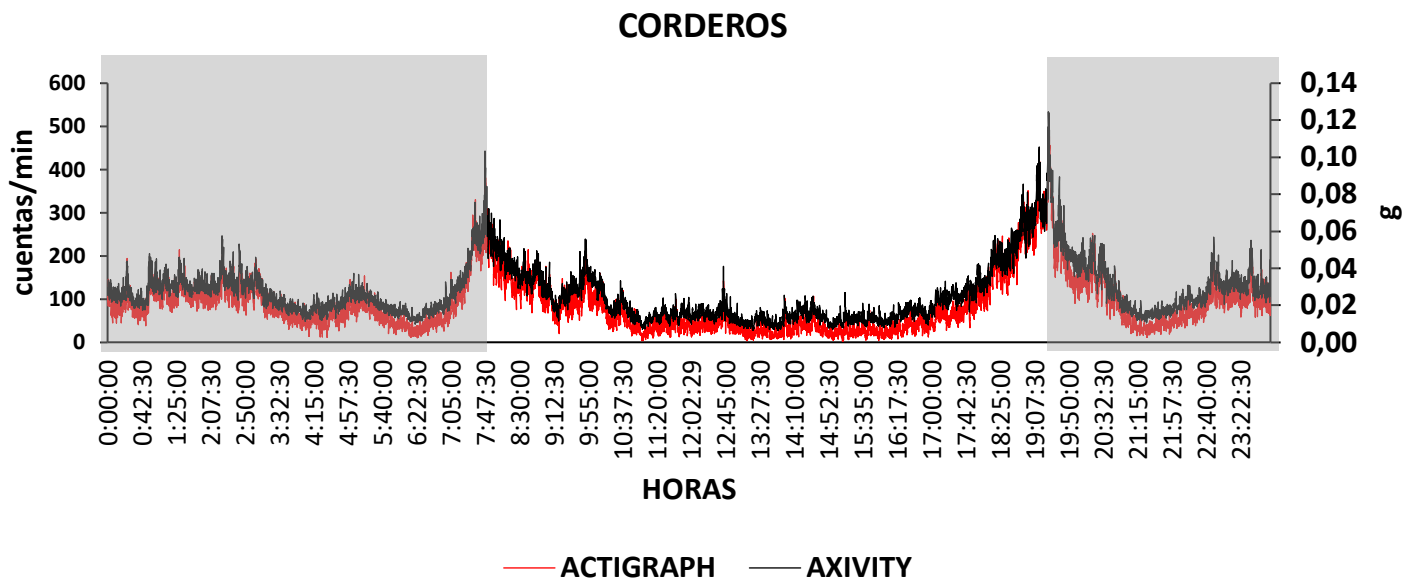


Fig. 10. Actividad locomotora de los corderos medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales (ActiGraph, cuentas/min, y Axivity, g) registrada cada 10 segundos durante 8 días (las áreas grises representan la noche).

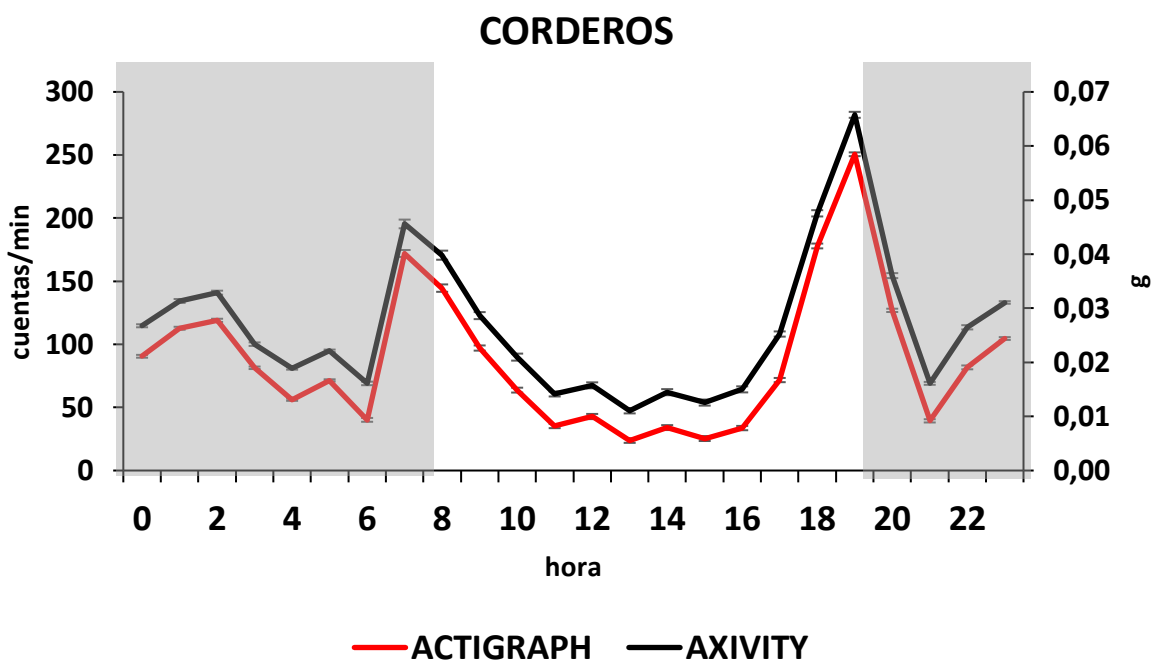


Fig. 11. Actividad locomotora horaria media (\pm ES) de los corderos medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales (ActiGraph, cuentas/min, y Axivity, g) registrada cada 10 segundos durante 8 días (las áreas grises representan la noche).

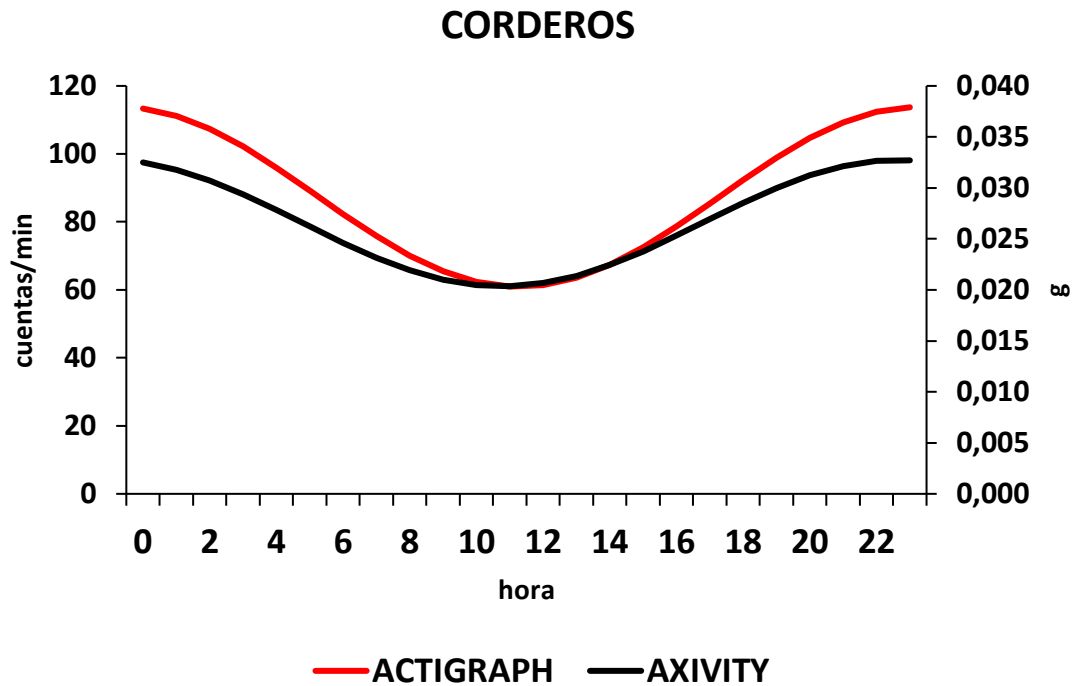


Fig. 12. Curvas cosinor de un ritmo de actividad de 24 horas en la actividad locomotora de los corderos medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales (ActiGraph, cuentas/min, y Axivity, g) registradas cada 10 segundos durante 8 días (las áreas grises representan la noche).

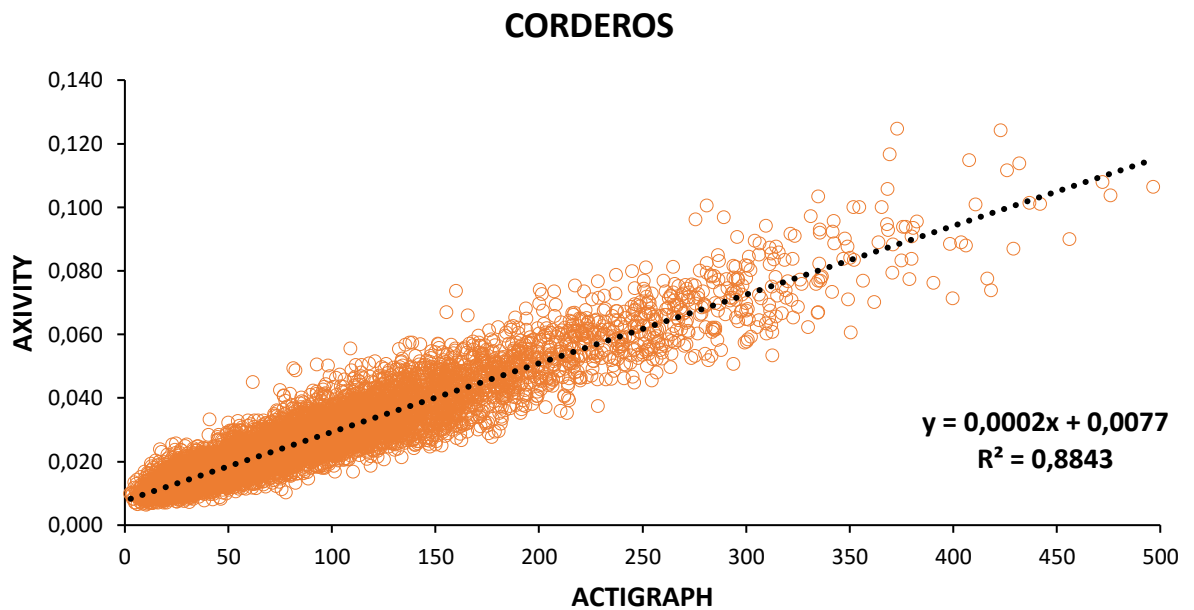


Fig. 13. Regresión lineal entre los valores de cuentas/min registrados por el acelerómetro Actigraph y los valores en g registrados por el acelerómetro Axivity, de la actividad locomotora de los corderos medida por dos tipos de acelerómetros triaxiales durante 8 días.

4.3- Discusiones

Comparaciones previas del rendimiento de los acelerómetros ActiGraph y Axivity en el campo de la medicina humana han revelado algunos resultados contradictorios. De Craemer y Verbestel (2020) investigaron la viabilidad y adecuación de usar los resultados derivados de estos dispositivos para medir comportamientos de movimiento de 24 horas (es decir, sueño, comportamiento sedentario y actividad física) en adultos en condiciones de vida libre. En ese estudio, los acelerómetros ActiGraph y Axivity no pudieron usarse de manera intercambiable para medir comportamientos de movimiento de 24 horas debido a que las diferencias en los resultados de los dos dispositivos eran clínicamente relevantes e impredecibles. Sin embargo, en otro estudio (Plekhanova et al., 2020), se compararon las estimaciones del sueño basadas en datos de los acelerómetros Axivity, GENEActiv y ActiGraph que habían sido usados en las muñecas no dominantes o dominantes, con o sin un registro del sueño para guiar el algoritmo, lo cual produjo resultados similares entre las tres marcas de acelerómetros y protocolos de uso.

Otro experimento evaluó la validez del uso de los acelerómetros ActiGraph GT3X+ y Axivity AX3 para medir la intensidad de la actividad física y las posturas corporales cuando la observación directa fue la medida de criterio, y concluyó que las diferencias en los resultados de los dos acelerómetros fueron mayores al comparar estar sentado/de pie, comportamiento sedentario/intensidad ligera e intensidad moderada/intensidad ligera (Hedayatrad et al., 2021). Además, se ha comparado el rendimiento de los acelerómetros en el estudio del movimiento humano (Rowlands et al., 2018) ;(Brønd et al.,2017) ;(Crowley et al., 2019). Aunque otros estudios han usado los acelerómetros ActiGraph GT3X+ y Axivity AX3 simultáneamente para cuantificar el comportamiento de las ovejas, estos se usaron para crear algoritmos en lugar de comparar sus rendimientos. Turner et al. (2023) demostró que el comportamiento de las ovejas está inherentemente desequilibrado (por ejemplo, más rumiando que caminando), lo que resulta en una subestimación de aquellas actividades que siendo importantes, son infrecuentes; por lo tanto, usaron ovejas equipadas con acelerómetros ActiGraph montados en la mandíbula y Axivity montados en la oreja para construir modelos de “Deep learning”, que son apropiados para datos secuenciales como estos, a partir de datos desequilibrados. Sus resultados demostraron la efectividad de esos modelos para clasificar el comportamiento de las ovejas en condiciones de pastoreo. Según nuestro conocimiento, no se han comparado en otros estudios el rendimiento de los acelerómetros simultáneamente en los mismos animales, como en este trabajo.

Tres zonas del cuerpo (cabeza, cuello y cruz) para el acelerómetro ActiGraph usando una cabezada, un collar y un arnés corporal, respectivamente, fueron comparadas (Ikurior et al., 2021). Gurule et al. (2022) usaron el dispositivo Axivity para investigar el comportamiento de las ovejas antes y después de enfermar debido a la ingestión de alimento contaminado con moho. Aunque los acelerómetros evaluados en nuestro estudio fueron diseñados para su uso con humanos, los fuertes coeficientes de correlación entre los acelerómetros triaxiales Actigraph y Axivity en la cuantificación de las actividades de ovejas y corderos, y la similitud de las curvas de ritmicidad circadiana calculadas a partir de los datos de los dos dispositivos, indican que ambas marcas de acelerómetros son adecuadas para medir la actividad locomotora en estos animales.

5. Conclusiones

Dadas las fuertes correlaciones entre los acelerómetros triaxiales Actigraph y Axivity en la cuantificación de las actividades de las ovejas y los corderos, y la similitud de las curvas de ritmicidad circadiana calculadas a partir de datos de ambos dispositivos, ambas marcas de acelerómetros son adecuadas para medir la actividad locomotora en estos animales.

Conclusion

Given the strong correlations between the Actigraph and the Axivity tri-axial accelerometers in quantifying the activities of ewes and lambs, and the similarity of the circadian rhythmicity curves calculated from data from the two devices, both brands of accelerometers are suitable for measuring the locomotor activity in these animals.

6. Valoración personal y agradecimientos

La realización de este Trabajo Fin de Grado ha sido una experiencia enriquecedora tanto a nivel académico como personal. A lo largo del desarrollo del proyecto, he tenido la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos durante mi carrera, enfrentándome a desafíos que han puesto a prueba mis habilidades técnicas y mi capacidad de resolución de problemas. Este proceso me ha permitido desarrollar un pensamiento crítico y una mayor autonomía en mi trabajo, así como mejorar mi capacidad de gestión del tiempo y organización.

Además, trabajar en este proyecto me ha permitido profundizar en un área de estudio que me apasiona, lo que ha reforzado mi interés y motivación para seguir aprendiendo y especializándome en este campo. He aprendido a valorar la importancia de la investigación rigurosa y de la búsqueda constante de información actualizada y relevante.

En definitiva, considero que este trabajo ha sido una etapa crucial en mi formación, proporcionándome herramientas y conocimientos que serán fundamentales en mi futuro profesional. Me siento satisfecho con los resultados obtenidos y orgulloso del esfuerzo y dedicación invertidos.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Alfonso Abecia, por su inestimable apoyo, guía y asesoramiento a lo largo de todo el proceso. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para la correcta realización de este trabajo, y sus consejos y sugerencias han enriquecido significativamente el proyecto.

También quiero agradecer a Pancho, cuya ayuda ha sido esencial en diversos aspectos del desarrollo de este trabajo. Su disposición para colaborar y su amabilidad han facilitado mucho mi labor.

También quiero agradecer a mis profesores y profesoras de la facultad, quienes han contribuido de manera decisiva a mi formación a lo largo de estos años. Su dedicación y compromiso con la enseñanza han sido una fuente constante de inspiración y aprendizaje.

A mis padres y a toda mi familia, les agradezco profundamente su apoyo incondicional, ánimo y comprensión en los momentos más difíciles. Su confianza en mis capacidades me ha motivado a seguir adelante y dar lo mejor de mí en cada etapa de este proceso.

A mi novia, gracias por tu amor, paciencia y constante apoyo. Tu compañía y aliento han sido fundamentales para mantenerme enfocado y motivado durante todo este tiempo.

Quiero agradecer también a la cafetería de Veterinaria, por ser un lugar de encuentro y descanso donde he podido relajarme y recargar energías. Su amabilidad y buen servicio han sido un apoyo constante.

Finalmente, agradezco al equipo de rugby de la facultad, por proporcionarme un espacio de camaradería y deporte que ha sido vital para equilibrar mi vida académica y personal. Los momentos compartidos en el campo han sido una fuente de motivación y un recordatorio de la importancia del trabajo en equipo y la perseverancia.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

7. Bibliografía

- Abecia, J. A., & Canto, F. (2023). Circadian, feeding, and locomotor activities of artificially reared lambs measured by actigraphy. *Journal of Applied Animal Research*, 51, 234-241. <https://doi.org/10.1080/09712119.2023.2186884>
- Abecia, J. A., Bello, J. M., Marco, L., Viola, I., Canto, F., & Miranda de la Lama, G. (2024). Locomotor activity measured by actigraphy as a means of estimating social mixing and animal density induced stress in lambs. *Large Animal Review*, 30.
- Abecia, J. A., Canudo, C., Palacios, C., & Canto, F. (2022). Measuring lamb activity during lactation by actigraphy. *Chronobiology International*, 39, 1368-1380. <https://doi.org/10.1080/07420528.2022.2108715>
- Abecia, J. A., Palacios, C., Plaza, J., & Canto, F. (2023). Actigraphy reveals higher circadian activity in light-induced sexually active rams in spring than in rams subjected to the natural photoperiod. *US Precision Livestock Conference*, Knoxville, Tennessee.
- ActiGraph (2024), from <https://theactigraph.com/>
- Albarbar, A., Mekid, S., Starr, A., & Pietruszkiewicz, R. (2008). Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: An experimental study. *Sensors*, 8(2), 784-799. <https://doi.org/10.3390/s8020784>
- Axivity. (2024), from <https://axivity.com/>
- Bolton, S., Cave, N., Cogger, N., & Colborne, G. R. (2021). Use of a collar-mounted triaxial accelerometer to predict speed and gait in dogs. *Animals*, 11(5), 1262. <https://doi.org/10.3390/ani11051262>
- Brønd, J. C., Andersen, L. B., & Arvidsson, D. (2017). Generating actigraphy counts from raw acceleration recorded by an alternative monitor. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49, 2351-2360. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001344>
- Brown, D. D., Kays, R., Wikelski, M., Wilson, R., & Klimley, A. P. (2013). Observing the unwatchable through acceleration logging of animal behavior. *Animal Biotelemetry*, 1, 20. <https://doi.org/10.1186/2050-3385-1-20>

- Canto, F., & Abecia, J. A. (2023). Trimming extremely overgrown hooves in sheep does not improve their welfare as measured by actigraphy. *US Precision Livestock Conference*, Knoxville, Tennessee. x
- Chapa, J. M., Maschat, K., Iwersen, M., Baumgartner, J., & Drillich, M. (2020). Accelerometer systems as tools for health and welfare assessment in cattle and pigs – A review. *Behavioural Processes*, 181, 104262. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2020.104262>
- Crowley, P., Skotte, J., Stamatakis, E., Hamer, M., Aadahl, M., Stevens, M. L., et al. (2019). Comparison of physical behavior estimates from three different thigh-worn accelerometers brands: A proof-of-concept for the Prospective Physical Activity, Sitting, and Sleep consortium (ProPASS). *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 16, 65. <https://doi.org/10.1186/s12966-019-0835-0>
- De Craemer, M., & Verbestel, V. (2022). Comparison of outcomes derived from the ActiGraph GT3X+ and the Axivity AX3 accelerometer to objectively measure 24-hour movement behaviors in adults: A cross-sectional study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(271). <https://doi.org/10.3390/ijerph19010271>
- Denishev, K. H., & Petrova, M. R. (2007). Accelerometer design. *Proceedings of ELECTRONICS*, 2007, 159-164.
- Gurule, S. C., Flores, V. V., Forrest, K. K., Gifford, C. A., Wenzel, J. C., Tobin, C. T., et al. (2022). A case study using accelerometers to identify illness in ewes following unintentional exposure to mold-contaminated feed. *Animals*, 12, 266. <https://doi.org/10.3390/ani12030266>
- Hammond, T. T., Springthorpe, D., Walsh, R. E., & Berg-Kirkpatrick, T. (2016). Using accelerometers to remotely and automatically characterize behavior in small animals. *Journal of Experimental Biology*, 219(11), 1618–1624. <https://doi.org/10.1242/jeb.136135>
- Hedayatrad, L., Stewart, T., & Duncan, S. (2021). Concurrent validity of ActiGraph GT3X+ and Axivity AX3 accelerometers for estimating physical activity and sedentary behavior. *Journal of Measurement in Physical Behaviour*, 4, 1-8. <https://doi.org/10.1123/jmpb.2019-0075>

- Ikurior, S. J., Marquetoux, N., Leu, S. T., Corner-Thomas, R. A., Scott, I., & Pomroy, W. E. (2021). What are sheep doing? Tri-axial accelerometer sensor data identify the diel activity pattern of ewe lambs on pasture. *Sensors*, *13*, 6816. <https://doi.org/10.3390/s21206816>
- Iqbal, M. W., Draganova, I., Morel, P. C. H., & Morris, S. T. (2021). Validation of an accelerometer sensor-based collar for monitoring grazing and rumination behaviours in grazing dairy cows. *Animals*, *11*(9), 2724. <https://doi.org/10.3390/ani11092724>
- Martiskainen, P., Järvinen, M., Skön, J. P., Tiirikainen, J., Kolehmainen, M., & Mononen, J. (2009). Cow behaviour pattern recognition using a three-dimensional accelerometer and support vector machines. *Applied Animal Behaviour Science*, *119*(1-2), 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2009.03.005>
- McGowan, C. M., Stubbs, N. C., & Jull, G. A. (2007). Equine physiotherapy: a comparative view of the science underlying the profession. *Equine veterinary journal*, *39*(1), 90–94. <https://doi.org/10.2746/042516407x163245>
- Merriam-Webster. (2022). *Merriam-Webster medical dictionary*. Springfield, MO: Merriam Webster.
- Molcan, L. (2019). Time distributed data analysis by cosinor. *bioRxiv*, 805960. <https://doi.org/10.1101/805960>
- Montoye HJ, Washburn R, Servais S, et al. (1983). Estimation of energy expenditure by a portable accelerometer. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *15*(5), 403-407.
- Morrison, R., Penpraze, V., Greening, R., Underwood, T., Reilly, J. J., & Yam, P. S. (2014). Correlates of objectively measured physical activity in dogs. *The Veterinary Journal*, *199*(2), 263-267. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.11.023>
- Plekhanova, T., Rowlands, A. V., Yates, T., Hall, A., Brady, E. M., Davies, M., et al. (2020). Equivalency of sleep estimates: Comparison of three research-grade accelerometers. *Journal of Measurement in Physical Behaviour*, *3*, 294-303. <https://doi.org/10.1123/jmpb.2019-0047>
- Reilly, S. P., Leach, R. K., Cuenat, A., Lowe, M., & Awan, S. A. (2006). Overview of MEMS sensors and the metrology requirements for their manufacture. *National Physical Laboratory*, 15-20.

- Rowlands, A. V., Mirkes, E. M., Yates, T., Clemes, S., Davies, M., Khunti, K., & Edwardson, C. L. (2018). Accelerometer-assessed physical activity in epidemiology: Are monitors equivalent? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *50*, 257-265. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001435>
- Saint-Dizier, M., & Chastant-Maillard, S. (2015). Methods and on-farm devices to predict calving time in cattle. *Veterinary journal (London, England : 1997)*, *205*(3), 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.05.006>
- Schuster, L. A. H., de Carvalho, A. L., Dos Santos, E. A. R., de Oliveira, M. P., Camacho-Rozo, C. A., Raposo Monteiro, E., Ferreira, M. P., & Alievi, M. M. (2023). Physical activity measured with an accelerometer in dogs following extracapsular stabilisation to treat cranial cruciate ligament rupture. *The Journal of small animal practice*, *64*(10), 619-625. <https://doi.org/10.1111/jsap.13645>
- Sweeney, D. M., Holmström, M., Donohue, K. D., Lambert, D. H., & Bayly, W. M. (2024). Using accelerometers to identify a high risk of catastrophic musculoskeletal injury in three racing Thoroughbreds. *Journal of the American Veterinary Medical Association* (published online ahead of print 2024). <https://doi.org/10.2460/javma.24.02.0114>
- Tran, D.-N., Nguyen, T. N., Khanh, P. C. P., & Tran, D.-T. (2022). An IoT-based design using accelerometers in animal behavior recognition systems. *IEEE Sensors Journal*, *22*(18), 17515-17528. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3051194>
- Troiano, R. P., McClain, J. J., Brychta, R. J., & Chen, K. Y. (2014). Evolution of accelerometer methods for physical activity research. *British Journal of Sports Medicine*, *48*(13), 1019-1023.
- Turner, K. E., Thompson, A., Harris, I., Ferguson, M., & Sohel, F. (2023). Deep learning based classification of sheep behaviour from accelerometer data with imbalance. *Information Processing in Agriculture*, *10*, 377-390. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.04.001>
- Viola, I., Canto, F., & Abecia, J. A. (2023). Effects of melatonin implants on locomotor activity, body temperature, and growth of lambs fed a concentrate-based diet. *Journal of Veterinary Behavior*, *68*, 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2023.08.004>
- Walter, P. L. (2006). The history of the accelerometer 1920s-1996 – Prologue and Epilogue. Texas Christian University, Ft. Worth, Texas.

- Woodman, O. J. (2007). An introduction to inertial navigation. *Technical Report*, University of Cambridge. <https://doi.org/10.48456/tr-696>
- Yang, X., Zhao, Y., Street, G. M., Huang, Y., To, S. D. F., & Purswell, J. L. (2021). Classification of broiler behaviours using triaxial accelerometer and machine learning. *Animal*, 15(7), 100269. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100269>
- Yazdi, N., Ayazi, F., & Najafi, K. (1998). Micromachined Inertial Sensors. *Proceedings of the IEEE*, 86(8), 1640-1659. <https://doi.org/10.1109/5.704269>