

## Diseño y construcción de un equipo para la evaluación automatizada de la conducta locomotora en pequeñas especies

Pérez-Gambino César Augusto y Negrete-Díaz Jose Vicente

Laboratorio de Psicología Experimental y Neurociencias, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato. [jv.negrete@ugto.mx](mailto:jv.negrete@ugto.mx)

---

### Resumen

Las vías dopaminérgicas centrales representan el principal sistema modulador de la actividad locomotora y además, este sistema tiene un rol primordial aportando el componente motivacional de la acción. Ambas propiedades de la conducta, la actividad locomotora y la motivación, pueden ser medidas en modelos animales, particularmente los asociados a enfermedades mentales, a través de métodos de registro automatizado, donde se busca conocer el desplazamiento a lo largo del tiempo (Actividad Locomotora) y la preferencia que establece el sujeto por un lugar asociado a un estímulo motivacional (Preferencia de Lugar). Este trabajo tiene la finalidad de presentar el diseño, construcción y validación de un equipo automatizado para la evaluación de estos parámetros, con suficiente sensibilidad para detectar el nivel de respuesta al estrés en el tiempo y estímulos con propiedades motivacionales. Para su validación, se utilizaron tres especies de animales pequeños: rata, ratón y pollo; se videograbaron durante su desempeño en el equipo automatizado y las mediciones obtenidas se compararon con las que arrojó el análisis del video utilizando un sistema de seguimiento de objetos o videotracking

(EthoVision XT 13); así como con datos experimentales provenientes de estudios reportados en la literatura realizados con otro dispositivo (fabricación y componentes discontinuados) por miembros de nuestro grupo de trabajo. El perfil temporal y la actividad total obtenidos por nuestro dispositivo arroja los resultados predichos del comportamiento esperado de un organismo ante un ambiente novedoso, en relación a la manera como responde y se adapta al estrés moderado, con una buena correlación entre los resultados de las diferentes mediciones ( $r > 0.82$ ), el cual es alto considerando la variabilidad del comportamiento animal. Tiene además las ventajas de que es considerablemente más económico y asequible respecto al software comercial, que permite la evaluación simultánea de tantos animales como equipos se tengan, está actualizado tecnológicamente y disponible; además, permite hacer estudios de preferencia de lugar, ampliando su aplicabilidad. En resumen, el equipo resulta ser una herramienta útil, económica, de fácil construcción y manejo, a un nivel de investigación, para la medición automatizada de la conducta motivada en especies pequeñas, aplicable a estudios asociados a depresión, ansiedad, adicción,

### Palabras Clave

Actividad locomotora, roedor, dopamina, conducta, preferencia de lugar

esquizofrenia, entre otros, donde la función dopaminérgica se encuentra alterada.

### **Abstract**

The main modulator system of locomotive activity is represented by the central dopaminergic pathways, in addition, this system has an important role mainly contributing the action motivational component. Both behavioral properties, locomotive and motivation activity, can be measured in animal models especially those models associated with mental illnesses by automated registration methods, where displacement during time needs to be known and the preference established by the subject for an associated place with a motivational stimulus (Place Preference). This work aims to present the design, the construction and the validation of an automated equipment for the evaluation of these parameters, with sufficient sensitivity to detect the level of response for stress over time and stimulation with motivational properties. For validation, three species of small animals were used: rat, mouse and chicken; they were recorded on video during their performance in the automated equipment. The obtained measurements were compared to the video analysis, using an object tracking system or video tracking (EthoVision XT 13), as well as experimental data from reported studies from literature which was conducted with another device by our work collaborators. The temporal profile and the total activity obtained by our device yield the predicted results of the expected behavior of an organism in a novel environment. Now, related to the way that the subject responds and adapts to moderate stress, there was a good correlation among the results of the different measurements ( $r > 0.82$ ), which is high considering the variability of animal behavior. It also has the advantages such as considerably cheaper and affordable compared to commercial software. Besides, the simultaneous evaluations performed by the proposed equipment for several subject animals, which can be as many as system modules are connected or available, this design is technologically updated and available in contrast to other that we used and that is discontinued; In addition, place preference studies are allowed by the system, expanding its applicability. In summary, this approach seems to be a useful and economical tool, with easy construction and use for a

research level, for the automated measurements of motivated behavior in small species; these measurements are applicable for studies associated with depression, anxiety, addiction, schizophrenia, among others, where the dopaminergic function is altered.

Key words: locomotor activity, rodent, dopamine, behavior, place preference.

### **Introducción**

La evaluación de la actividad locomotora (AL) en modelos animales es de utilidad para el estudio de alteraciones fisiológicas que tienen su base en el sistema nervioso central (SNC) [1]. Tal es el caso del estudio de la AL y su relación con el sistema dopaminérgico central, pues este se concibe como el principal ente modulador del movimiento intencional y además, juega un papel crucial al proveer dichas acciones con determinantes internos que la incitan, en otras palabras, con motivación [2].

Gracias al estudio conjunto de la conducta y la fisiología del sistema nervioso, se sabe que las principales vías dopaminérgicas del cerebro están implicadas en la coordinación y la modulación de funciones motoras simples o complejas, donde participan distintas estructuras como los ganglios basales y la corteza cerebral [3]. Por otro lado, el sistema dopaminérgico posee un rol crucial en la codificación del valor o la importancia de las acciones del sujeto y el aprendizaje que se deriva de estas asociaciones; se ha planteado que la alteración crónica de estos procesos podría resultar en neuropatologías como la esquizofrenia [4]. Asimismo, cabe exponer que estas vías también pueden modular el procesamiento cognitivo superior, gracias a las eferencias dopaminérgicas sobre la corteza prefrontal, provenientes del mesencéfalo [5]., lo cual estaría asociado con procesos como la toma de decisiones. En términos generales, la AL espontánea en modelos animales podría ser entonces un fenómeno mensurable que está relacionado directamente con el funcionamiento de las vías centrales dopaminérgicas y que de hecho, ha demostrado ser altamente consistente y cuantificable [1], en especial, cuando son estos sistemas los que son intervenidos farmacológicamente, por medio de lesiones neurotóxicas o eléctricas [6]. Por otro lado, neuropatologías o trastornos del comportamiento como la enfermedad de Parkinson, la esquizofrenia y las

conductas adictivas tienen una etiología íntimamente relacionada con el sistema dopaminérgico central y por ende, reflejan patrones particulares de AL que pueden ser evaluados como parte del estudio preclínico de agentes terapéuticos [7-9].

Como ya se ha presentado, el sistema dopaminérgico también está implicado en la motivación y por lo tanto, en el proceso de aprendizaje asociativo que comprende un estímulo que posee propiedades motivacionales primarias, como una droga psicoestimulante (estímulo no-condicionado) y un estímulo o contexto neutro; este último, tras repetidas presentaciones simultáneas con el estímulo motivacional primario, puede generar una preferencia marcada en el animal, incluso cuando el objeto primario de su motivación está ausente [10]. Este es el principio del paradigma de preferencia o aversión de lugar condicionado (PLC, ALC). De esta manera puede entrecruzarse el gran potencial que tienen los métodos de evaluación de la actividad motora en modelos animales, en especial la AL y la PLC, comportamientos que pueden verse diferencialmente afectados por estados o tratamientos que modifican un mismo sistema neuromodulador [10].

Son varias las consideraciones que se pueden tener en cuenta para diseñar un instrumento con la capacidad de medir la AL y la PLC, para registrar ambas conductas puede recurrirse a la observación directa o un sistema de monitoreo automatizado, este último requiriendo menos tiempo y minimiza el error humano. Los sistemas de monitoreo automatizado pueden valerse del registro de video, utilizando software que analiza transmisión directa o grabaciones de cada experimento [11]. Además, también se han propuesto sistemas que no requieren del procesamiento de videos y que se fundamentan en detectores mecánicos o fotosensores ubicados estratégicamente a lo largo de uno o varios compartimentos interconectados [12-14], lo cual representa nuestro caso. Estos últimos sistemas, en especial los que comprenden tecnología infrarroja, presentan varias ventajas sobre los demás tipos de monitoreo: son indetectables por los animales, a diferencia de los dispositivos mecánicos; no son costosos, como sí puede ocurrir con las cámaras de video infrarrojas y los software de procesamiento y análisis

de video; no se apoyan en la observación del experimentador, evitando juicios o medidas sesgadas [13]; y además, no presentan peligro biológico a largo plazo para los sujetos experimentales, a diferencia de los sistemas de microondas [14].

Por lo anterior, el diseño de nuevos dispositivos con tecnología infrarroja para la medición de AC y PLC podría orientarse a satisfacer necesidades puntuales del experimentador y también, podría mostrar ventajas económicas y procedimentales. El diseño del prototipo que aquí se presenta, posee varias ventajas respecto a diseños similares: el costo de los insumos para su fabricación es muy bajo, aproximadamente, \$150.00 USD; su fabricación es sencilla y no requiere equipos de manufactura sofisticados; posibilita la experimentación simultánea de varios dispositivos a la vez, reduciendo el tiempo requerido para evaluar la conducta de varios animales y también, disminuyendo la variabilidad inherente a las medidas no sincronizadas. Además de estas ventajas, el dispositivo cuenta con algunas características que pueden hacerlo más eficiente en la práctica: funciona como un sistema independiente que no requiere de una computadora; tiene una interfaz amigable para modificar los principales parámetros de registro; permite el desarrollo de sistemas de control sin la necesidad de dominar el lenguaje ensamblador, gracias su microcontrolador ATMEGA2560 que se programa con lenguaje C; los datos registrados pueden ser almacenados en memorias SD y además, es posible la comunicación exterior serial (conectar computadoras y dispositivos bluetooth). Con todo esto, el prototipo en cuestión resultaría ser una alternativa práctica y asequible para la investigación.

## Materiales y métodos

### Materiales para la estructura del aparato:

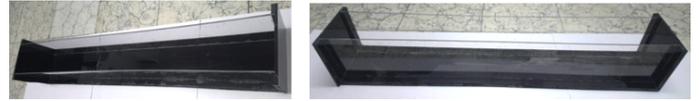
Acrílico negro opaco de 6 mm, lámina de 2.40 x 1.80 metros, y acrílico transparente/cristal de 3 mm, de 2.44 x 1.22, de las cuales se obtienen los cortes que se detallan.

- 4 láminas de acrílico negro opaco de 6 mm. de 15 x 90 cm
- 2 láminas de acrílico negro opaco de 6 mm. de 90 x 2 cm
- 4 láminas de acrílico negro opaco de 6 mm. de 15 x 2 cm
  - 3 láminas de acrílico transparente de 3 mm. de 15x 90 cm
- 3 láminas de acrílico negro opaco de 6mm. de 15 x15 cm
- 2 láminas de acrílico negro opaco de 6 mm. de 15 x 5 cm
  - Pegamento PVC
- Herramientas de corte, sierra de banco con disco de 71/4 pulgadas, 3 mm, para metal
  - Varilla circular de acero de 3 mm.
- Rejilla de acero calibre 3mm de 14.5 x 89.5 cm
  - Pegamento hipóxico
  - 15 leds infrarrojos
- 15 fototransistores (sensores)
  - Teclado matricial de 4x4
  - Pantalla LCD de 20x4
  - Tarjeta Arduino 1
- Resistencia de potencia de 100 watts

Armado de la estructura. Las piezas de acrílico se cortan con una sierra para metal y se arma una caja rectangular con dos compartimentos, uno elaborado con acrílico negro opaco de 6 mm, para albergar los componentes electrónicos y otro para colocar al animal en movimiento, este último tiene doble pared a ambos lados, la pared interna es una lámina de acrílico transparente de 3 mm, sobre la que se colocan los leds infrarrojos de un lado y los sensores en la doble pared de enfrente, separados 6 cm. Los leds y sensores son conectados vía cable a la tarjeta Arduino 1. En las siguientes imágenes se ilustra el primer esqueleto del equipo, con la base de la estructura y las paredes internas (A), y la caja terminada (B), pueden apreciarse los compartimentos internos que albergan los sensores, dentro de la caja se presenta un ratón de plástico usado para estandarizar las pruebas iniciales, a fin de minimizar el uso de organis-

mos (B).

A)



B)

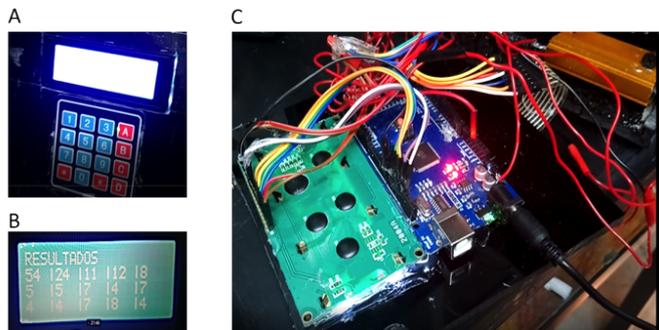


**Fig. 1.** Estructura de la caja. Diferentes vistas muestran las paredes externas e internas, donde se colocan leds infrarrojos y los sensores (el ratón es de juguete, útil en pruebas).

### Sistema electrónico

El sistema consiste de una tarjeta principal Arduino MEGA (Figura 2 C, en azul), la cual puede alimentarse desde una fuente externa o una computadora, pero en este caso como el sistema es independiente y no requiere una computadora, la alimentación es por medio de una fuente externa. Se colocaron 15 leds infrarrojos y 15 fototransistores (sensores) en las caras externas de las paredes internas de acrílico transparente, separados 6 cm (Fig. 1B), conectados a la tarjeta Arduino. Los emisores son LEDs infrarrojos (Fig. 1B), los cuales son imperceptibles para los animales que son objeto de estudio y los receptores son foto transistores o foto receptores, encargados de recibir la señal infrarroja de los emisores, cuando los ases de luz son interrumpidos por los animales, esto se convierte en un evento, entonces cuando el sistema lo contabiliza los eventos son almacenados dentro del microcontrolador que tiene la Arduino MEGA para su posterior almacenamiento en una memoria SD (por incorporarse). Se incorporó un teclado matricial de 4x4 (Fig. 2A), adherido al compartimento frontal, que cuenta con comunicaciones I2C y serie, con el cual se ajusta el número de periodos, la duración de cada intervalo y el usuario se puede desplazar dentro de los diferentes menús u opciones que tiene el sistema. El teclado matricial es un dispositivo que agrupa varios pulsadores o interruptores y permite controlarlos empleando un número de conductores inferiores al que necesitaríamos al usarlos de forma individual. La pantalla LCD 20x4 se insertó sobre un oficio a su medida hecho sobre la pared frontal de

acrílico (Fig. 2B) y se conectó a la tarjeta Arduino. Se empleó además una resistencia de potencia de 100 watts para controlar el suministro de energía a los leds (Fig. 2C). El lenguaje utilizado para programar los protocolos en la tarjeta MEGA fue lenguaje C.



**Fig. 2** Componentes electrónicos. A teclado matricial 4x4, B. Pantalla LCD 4x20, C. Tarjeta Arduino (al centro en azul) y resistencia de 100 watts (esquina superior derecha).

### Operación de la Caja de Actividad en Campo Lineal

1. Preparación de la caja: se debe limpiar con ethanol a 70%, impregnar un trozo de tela y pasarlo por el interior de la caja; lavar la rejilla metálica y el tapete que se usa en el fondo de la caja, una vez seco se puede utilizar.
2. Instalación de la caja: la caja debe colocarse en un cuarto apto para evaluar la conducta, con luz controlada y sonido amortiguado, conociendo temperatura y humedad. Se coloca la caja en una superficie firme y plana; el tapete se pone en el fondo y sobre éste la rejilla de metal (Fig. 3).
3. Encendido y programación: una vez encendido el aparato, en la pantalla se muestra un menú para ajustar los parámetros del experimento, por ejemplo el número de periodos a contabilizar y el tiempo de duración de cada uno. Para este estudio se eligieron 6 periodos de 5 minutos para un tiempo total de 30 minutos de medición.
4. En la evaluación del comportamiento es necesario blindar al organismo además de aromas provenientes del sujeto, para ello debe emplearse equipo que además de la bata y guates, permita cubrir la cabeza, pies y boca (Fig. 3).
5. Colocación del sujeto de experimento: se coloca gentilmente el organismo en el centro de

la caja, posteriormente se coloca la tapa de acrílico transparente y se da inicio a la medición. Para efectos de validar, se videograbó simultáneamente cada ensayo de cada animal.

6. Captura de los datos: Los datos obtenidos de cada periodo se muestran en la pantalla del tablero de la caja, ahora mismo se capturan directamente, en breve se incorporará la tarjeta de memoria a fin de almacenarlos y exportarlos a Excel u otro programa estadístico. Los datos de los leds 1-5, 6-10 y 11-15 corresponden a las zonas 1,2 y 3 respectivamente, para el estudio de la conducta de preferencia de lugar.

7. Limpieza de la caja: Una vez terminado el último periodo es necesario retirar gentilmente al sujeto y retornarlo a su caja, también se retira la rejilla metálica y el tapete para su limpieza con agua y jabón. El interior de la caja se limpia nuevamente con ethanol al 70%.



**Figura 3.** Unidad de Conducta. Computadora con programa Ethovision XT, sistema de video circuito cerrado, pantalla de visualización y equipo de protección tanto para el espécimen como para el investigador, así como cuarto aislado de ruido y con ambiente controlado.

### Registro de la conducta locomotora

Se estudió la actividad locomotora en campo lineal en rata, ratón y pollo, empleando el equipo construido en el laboratorio, así como mediante el software comercial Ethovision XT mediante videotracking; además, se comparó con los datos obtenidos en estudios previos y reportados en la literatura por miembros del equipo de investigación (Negrete-Díaz et al., 2010). Los animales fueron evaluados en varias sesiones diarias, utilizando diferentes combinaciones:

-rata joven, macho, de 120 gramos, 2 sesiones diarias durante 2 días, (n=1)

- ratón joven, machos, de 15 gramos, 2 sesiones diarias durante 2 días, (n=3)
- ratón estresado (identificado cualitativamente), joven, hembra, de 15 gramos, 2 sesiones diarias durante 2 días, (n=1)
- pollo, joven, de 30 gramos (n=2).



**Fig. 4.** Organismos empleados. Se evaluó la conducta en tres especies pequeñas: rata, ratón y pollo.

### Análisis de los datos

Los datos fueron analizados y graficados usando GraphPad Prism 5.0. Se obtuvo la media  $\pm$  EEM, los datos obtenidos con los diferentes dispositivos fueron analizados obteniendo el coeficiente de correlación de Pearson. Los datos del perfil temporal y de la preferencia de lugar en tres zonas se analizaron empleando ANOVA de una vía.

### Resultados

Se obtuvieron los perfiles temporales (Fig. 5) y de la actividad por zona (Fig. 6). Puede apreciarse que en todos los casos el perfil temporal inicia con un pico elevado de actividad característico de la exploración del animal ante un ambiente nuevo, lo cual refleja su respuesta ante estrés moderado, el cual es una medida indirecta de la activación dopaminérgica, en los siguientes minutos el organismo reconoce el ambiente como no amenazante y se adapta progresivamente, presentando una disminución progresiva de su actividad, hasta alcanzar una meseta luego de 30 minutos, suficientes para mostrar el efecto y que continúa más allá de 1 hora (datos no mostrados). Las gráficas de barra de la figura 6 muestran el promedio del número de veces que los organismos cruzaron los leds de cada una de las tres zonas marcadas como Zona 1 (izquierda, leds 1-5), Zona 2 (el medio, leds 6-10) y Zona 3 (derecha, leds 11-15). Puede apreciarse que el aparato permite cuantificar este comportamiento, importante en los estudio de toma de decisiones, sean éstas preferencia de textura del piso, color, cantidad

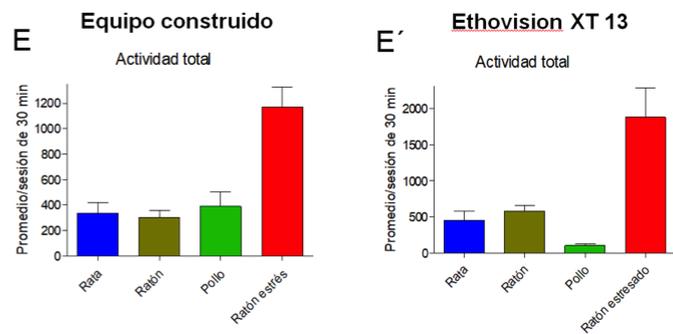
de luz, apariencia del ambiente, hasta la aplicación de estímulos para inducir cierta elección; lo que resulta de utilidad para la evaluación de esta función cerebral luego de la modificación/-manipulación del ambiente en que ha crecido el organismo, o de la administración de compuestos al sujeto de estudio por diferentes vías, o incluso la alteración de su desarrollo en diferentes etapas de la vida, incluyendo también las modificaciones a estructuras cerebrales mediante cirugía estereotáxica, por ejemplo.

Puede notarse que los valores son diferentes, ya que nuestro equipo mide el número de veces en que el animal interrumpe el haz de luz infraroja, y el software comercial la distancia recorrida, comportamentalmente no tiene mucha relevancia, ya que el fenómeno de interés es identificar si la actividad es idéntica al inicio, durante o al final de la prueba, y el número de cuentas o eventos de interrupción de la luz ha sido suficiente para correlacionar esta variabilidad con la activación/inactivación del sistema dopaminérgico, con el consecuente incremento/decremento de la liberación de este neurotransmisor.

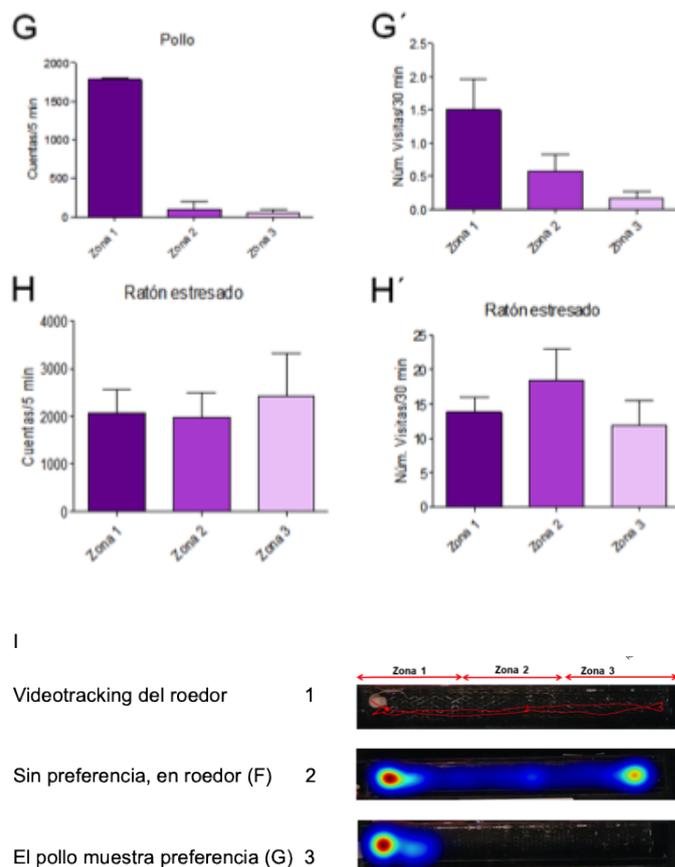
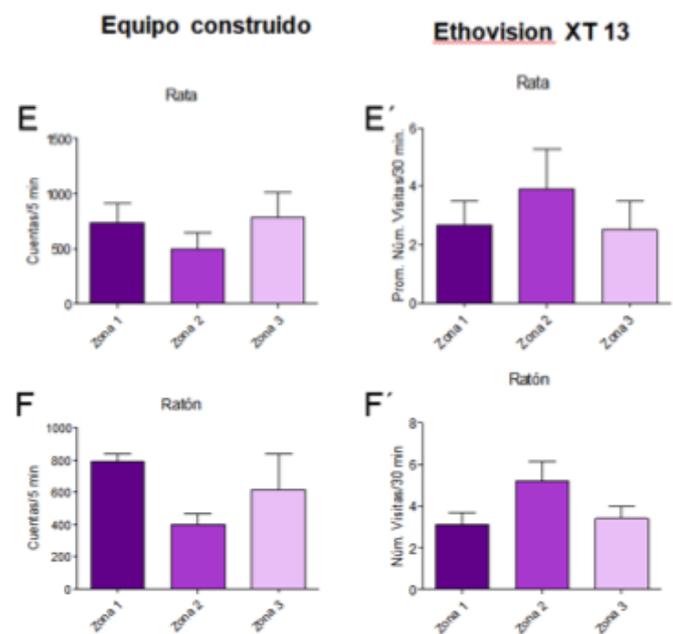
Fue de considerable interés evidenciar que la actividad del pollo es susceptible de ser estudiada con estos instrumentos, ya que son pocos los estudios sobre este aspecto del comportamiento animal. De manera particular, la figura 7-G muestra una significativa preferencia del pollo por la zona 1 (izquierda), ante lo cual se midió la temperatura de todo el aparato, encontrando que la temperatura en ese sitio es de 1-2 °C más elevada que en el resto, ya que detrás de la pared adyacente se localiza una resistencia, efecto que se eliminará reubicando este dispositivo para evitar sesgos. Algo similar se observó en el ratón aunque el efecto no fue significativo. Puede observarse que este hallazgo también está reflejado en las mediciones realizadas con el software comercial, mostradas además de sus gráficas, con mapas de calor, todo lo cual evidencia la utilidad de nuestro equipo para el estudio de este parámetro.

Debe aclararse que el presente estudio no tiene el propósito de mostrar experimentalmente el efecto de alguna maniobra, sea conductual o farmacológica, aunque si muestra sensibilidad para identificar estas variaciones. Lo anterior porque al inicio del estudio se identificó cualita-

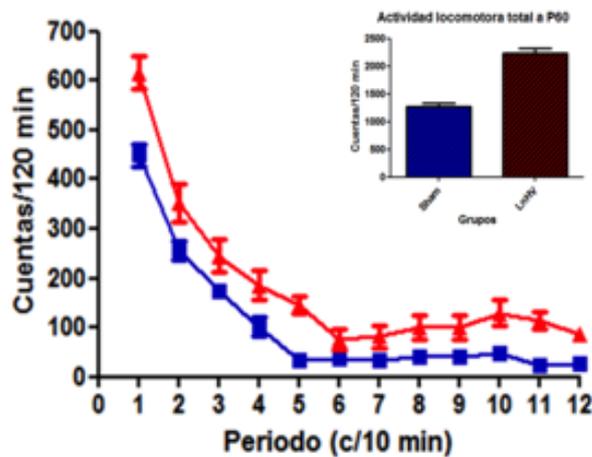
tivamente (por un experimentador experto) un estado de alteración conductual en uno de los ratones en estudio, el cual de clasificó como “ratón estresado”, dada su hiperreactividad al ser manipulado, mayor velocidad de escape, más intentos de escape y vocalizaciones (chillidos) al intentar atraparlo, por lo que su conducta se analizó aparte, encontrándose un considerable incremento en su actividad (Figs. 5 D, 6E, 7H), lo cual fue reproducido también con el software comercial. El perfil temporal de este sujeto es similar a la forma en que se da la adaptación en los otros organismos estudiados, sin embargo varía en dimensión, ya que el número de cuentas y la distancia recorrida es considerablemente superior a los valores del primer grupo de ratones, medidos con ambos métodos.



**Fig. 6.** Actividad total. Se presenta el promedio por sesión, se aprecia que los valores relativos obtenidos de roedores con el equipo contruido son similares a los arrojados por el software comercial.



**Fig. 7.** Preferencia de Lugar. Nótese que la rata y el ratón no presentan preferencia de lugar (E, F, H), como se espera que ocurra; a diferencia del pollo (G), lo cual se debió a la proximidad de una resistencia en la zona 1, lo cual se está ajustando. Nótese la trayectoria del roedor (I1) y los mapas de calor generados por Ethovision (I2-3), donde el último muestra claramente la preferencia de lugar en el pollo, como nuestro dispositivo (G).



**Fig. 8.** Perfil temporal de referencia. Se muestra la gráfica del perfil temporal construido con datos provenientes de un equipo similar, reportado en la literatura.

## Discusión

En el presente estudio se diseñó y construyó un aparato para evaluar el comportamiento en roedores, en concreto su desplazamiento lineal conocido como actividad locomotora (AL), así como su elección de un lugar preferido dentro del aparato (PL). Los datos del equipo propuesto se compararon cualitativa y cuantitativamente con un gráfico construido con datos provenientes de otro equipo similar (Fig. 8), que aunque se encuentra reportado en la literatura científica, donde miembros de nuestro equipo son coautores [15], su construcción se encuentra descontinuada. Puede apreciarse que el perfil obtenido con dicho equipo es similar al que se genera con nuestro dispositivo, con la ventaja de que tecnológicamente está actualizado y sus componentes electrónicos están disponibles. Más importante es el hecho de que nuestro equipo puede conectarse a una computadora y crearle un ambiente de control digital desde la misma, cuenta con ranura para tarjeta SD, teclado matricial y pantalla LCD superior, también puede adaptarse comunicación vía bluetooth, pero sobre todo, tiene varias características indiscutibles adicionales a lo descrito y que no posee el primero: 1) evalúa la preferencia de lugar en zonas designadas por el usuario, 2) su diseño lineal, de mayor longitud y baja altura, confina de manera no agresiva al organismo en una especie de túnel, permitiendo reducir desplazamientos en diagonal con pérdida de información, y 3) el sistema electrónico puede ser incorporado a otras arenas (“laberintos”) con otra estructura y diferente aplicación del estudio del desplazamiento y la preferencia, y donde sólo habría que conectar a la tarjeta Arduino los leds y sensores dispuestos sobre la nueva arena.

A partir de estos resultados, puede comprobarse la utilidad de este dispositivo para cuantificar la AL y la preferencia de lugar. Las medidas obtenidas no sólo resultan comparables con las hechas por métodos convencionales, sino que también se ven respaldadas por la literatura en lo que respecta al efecto del estrés sobre la AL [16] y a la conducta termotáxica observada en animales de laboratorio [17]. De esta manera, se validan los resultados y se puede entonces decir que el dispositivo aquí presentado cumple con su objetivo.

## Conclusiones

El equipo para la medición automatizada puede medir la actividad locomotora y la preferencia de lugar de forma consistente y coherente con lo reportado en la literatura. El sistema puede cuantificar las conductas en cuestión de manera eficaz y sus resultados son comparables también con los obtenidos por videotracking, un método preferido pero que en la práctica resulta inaccesible por su alto costo. El componente electrónico es además escalable, de manera sencilla, para aplicarlo a otros paradigmas en el estudio del comportamiento.

## Agradecimientos

1. Beca de Verano de la Ciencia 2019 otorgada al alumno C.A.P.G.
2. Proyecto 058/2019, Convocatoria CIIC 2019, UGto. otorgado a J.V.N.D.
3. Proyecto PRODEP UGTO-PTC-611 otorgado a J.V.N.D.
4. A Oscar Andrés Bolívar Baquero, estudiante de la Maestría en Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, durante estancia internacional, por su contribución a la versión final.
5. Rectoría de Campus Celaya-Salvatierra por las facilidades para la creación del laboratorio donde se implementó el desarrollo tecnológico.

## Referencias

1. Hruska, R. E., Kennedy, S., & Silbergeld, E. K. (1979). Quantitative aspects of normal locomotion in rats. *Life sciences*, 25(2), 171-179.
2. Iversen, S. D., & Iversen, L. L. (2007). Dopamine: 50 years in perspective. *Trends in neurosciences*, 30(5), 188-193.
3. Alexander, G. E., Crutcher, M. D., & DeLong, M. R. (1991). Basal ganglia-thalamocortical circuits: parallel substrates for motor, oculomotor, “prefrontal” and “limbic” functions. In *Progress in brain research* (Vol. 85, pp. 119-146). Elsevier.
4. Kapur, S. (2004). How antipsychotics become anti-‘psychotic’—from dopamine to salience to psychosis. *Trends in Pharmacological Sciences*, 25(8), 402-406.
5. Williams, G. V., & Goldman-Rakic, P. S. (1995). Modulation of memory fields by dopamine D1 receptors in prefrontal cortex. *Nature*, 376(6541), 572.
6. Fishman, R. H., Feigenbaum, J. J., Yanai, J., & Klawans, H. L. (1983). The relative importance of dopamine and norepinephrine in mediating

locomotor activity. *Progress in neurobiology*, 20(1-2), 55-88.

7.Mokrý, J. (1995). Experimental models and behavioural tests used in the study of Parkinson's disease. *Physiological research*, 44(3), 143-150.

8.Mittleman, G., LeDuc, P. A., & Whishaw, I. Q. (1993). The role of D1 and D2 receptors in the heightened locomotion induced by direct and indirect dopamine agonists in rats with hippocampal damage: an animal analogue of schizophrenia. *Behavioural brain research*, 55(2), 253-267.

9.Yamamoto, D. J., Nelson, A. M., Mandt, B. H., Larson, G. A., Rorabaugh, J. M., Ng, C. M., ... & Zahniser, N. R. (2013). Rats classified as low or high cocaine locomotor responders: a unique model involving striatal dopamine transporters that predicts cocaine addiction-like behaviors. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(8), 1738-1753.

10.Tzschentke, T. M. (1998). Measuring reward with the conditioned place preference paradigm: a comprehensive review of drug effects, recent progress and new issues. *Progress in neurobiology*, 56(6), 613-672.

11.Da Silva Aragão, R., Rodrigues, M. A. B., de Barros, K. M. F. T., Silva, S. R. F., Toscano, A. E., de Souza, R. E., & Manhães-de-Castro, R. (2011). Automatic system for analysis of locomotor activity in rodents—A reproducibility study. *Journal of neuroscience methods*, 195(2), 216-221.

12.Brockwell, N. T., Ferguson, D. S., & Beninger, R. J. (1996). A computerized system for the simultaneous monitoring of place conditioning and locomotor activity in rats. *Journal of neuroscience methods*, 64(2), 227-232.

13.McLelland, A. E., Winkler, C. E., & Martin-Iverson, M. T. (2015). A simple and effective method for building inexpensive infrared equipment used to monitor animal locomotion. *Journal of neuroscience methods*, 243, 1-7.

14.Genewsky, A., Heinz, D. E., Kaplick, P. M., Kilonzo, K., & Wotjak, C. T. (2017). A simplified microwave-based motion detector for home cage activity monitoring in mice. *Journal of biological engineering*, 11(1), 36.

15.Negrete-Díaz, J.V., Baltazar-Gaytán, E., Bringas, M.E., Vazquez-Roque, R.A., Newton, S., Aguilar-Alonso, P., León-Chávez, B.A. & Flores, G. Neonatal ventral hippocampus lesion induces increase in nitric oxide [NO] levels which is

attenuated by subchronic haloperidol treatment. *Synapse* 64(12):941-7.