

Análisis de recurrencia en la actividad locomotora en cochinillas en función del nivel de humedad

Recurrence Analysis in the Locomotion of Woodlice as a Function of Humidity Level

Jorge A. Ruiz & Cristina G. Guerrero Sánchez

Universidad Veracruzana, Veracruz, México

El presente estudio se enfoca en el uso del análisis cuantitativo de recurrencia para analizar la actividad locomotora en cochinillas en función del nivel de humedad en el entorno. Se expuso a tres sujetos a cuatro condiciones en las que varió el nivel de humedad, de 32,9% a 94,9%. Se videograbó el desplazamiento de los animales en cada condición de humedad. Mediante el uso de software para el seguimiento de trayectorias en insectos (ID tracker) y algoritmos programados en lenguaje R se obtuvieron registros y representaciones de las rutas de desplazamiento de las cochinillas como coordenadas XY. Los resultados mostraron diferencias en el nivel de actividad, en términos de distancia total recorrida y en la variación de las rutas de desplazamiento en función del nivel de humedad, siendo la condición de humedad al 50% la que controló mayor actividad y mayor regularidad en los patrones de desplazamiento. Los análisis cuantitativos de recurrencia, así como las gráficas de recurrencia correspondientes, mostraron ser útiles para la representación y análisis de la orientación en cochinillas bajo diferentes condiciones de nivel de humedad.

Palabras clave: análisis de recurrencia, dinámica no-lineal, locomoción, ortokinesis, cochinillas.

The present study focuses on the use of quantitative recurrence analysis to analyse locomotor activity in woodlice as a function of the humidity level in the environment. Three subjects were exposed to four conditions in which the humidity level varied, from 32.9% to 94.9%. The movement of the animals in each humidity condition was videotaped. Using software for tracking insect trajectories (ID tracker) and algorithms programmed in R language, records, and representations of the displacement routes of woodlice were obtained as XY coordinates. The results showed differences in the level of activity, in terms of total distance travelled and in the variation of the displacement routes depending on the level of humidity, being the 50% humidity condition the one that controlled greater activity and greater regularity in the displacement patterns. Quantitative recurrence analyses, as well as corresponding recurrence plots, proved useful for the representation and analysis of activity in woodlice under different humidity level conditions.

Keywords: recurrence analysis, non-linear dynamics, locomotion, ortho-kinesis, woodlice.

Contacto: J. A. Ruiz, Centro de Estudios e Investigaciones en Conocimiento y Aprendizaje Humano, Universidad Veracruzana, Agustín Melgar s/n esquina con Araucarias. Xalapa, Veracruz. C.P. 91100. Correo electrónico: jorruiz@uv.mx

Cómo citar: Ruiz, J. A. & Guerrero Sánchez, C. G. (2022). Análisis de recurrencia en la actividad locomotora en cochinillas en función del nivel de humedad. *Revista de Psicología*, 31(1), 1-12.
<http://dx.doi.org/10.5354/0719-0581.2022.67867>

Introducción

En el estudio de la conducta, una de las instancias consideradas como parte del repertorio conductual básico de todo organismo vivo es la actividad locomotora (Staddon, 2016). Algunos autores han sugerido que la actividad locomotora, bajo condiciones en las que se le puede identificar como un movimiento forzado, sería el caso más simple en el estudio de la motivación, ya que incluso organismos inferiores parecen orientarse y dirigirse en su medio a partir de las condiciones presentes (Brown & Herrnstein, 1975).

El estudio sistemático de la conducta de orientación en animales (y de su actividad locomotora como una instancia de la orientación) se remonta a los trabajos clásicos de principios del siglo XX (e.g., Loeb, 1918). No obstante, la obra de Fraenkel y Gunn (1961) es quizá la contribución más emblemática al estudio de la orientación en animales, especialmente en cuanto a la categorización del movimiento de estos, en función de si son dirigidos o no dirigidos hacia (o para alejarse de) la fuente de estimulación.

En la taxonomía sugerida originalmente por Gunn, Kennedy y Pielou (1937), y desarrollada por Fraenkel y Gunn, los movimientos de los organismos se clasifican en taxias y kinesis, cuando la orientación del organismo es dirigida y cuando la orientación es no dirigida, respectivamente. Además, se añade un prefijo a cualquiera de estas dos categorías generales para señalar la manera particular en la que se orienta el organismo. Por ejemplo, el caso de la klino-taxia corresponde a un movimiento dirigido caracterizado por desplazamientos angulares respecto de la fuente de estimulación, ya sea para acercarse a o alejarse de, depende del organismo en cuestión y de la estimulación. El caso de la klinokinesis corresponde a un movimiento semejante (giros con ángulos muy marcados), aunque este ocurre de manera desorganizada y sin orientación directa hacia o en contra de la fuente de estimulación. En ambos casos, la magnitud en los giros está relacionada con la intensidad de la estimulación.

De entre diferentes ejemplos de movimientos forzados, en el presente trabajo es de particular interés el caso de la ortokinesis, el cual se refiere a un movimiento no dirigido, en el que la velocidad lineal de la actividad locomotora varía en función de la intensidad de la estimulación (ver

Fraenkel & Gunn, 1961). Gunn (1937) documentó uno de los casos más representativos de ortokinesis, exponiendo a cochinillas (de la especie *Porcelio scaber*) a condiciones con diferentes niveles de humedad. Utilizando un aparato construido para controlar un gradiente de humedad (ver Gunn & Kennedy, 1936) y bajo condiciones de temperatura más o menos constante (entre 16 y 18 °C), el autor encontró que la actividad locomotora en un grupo de cochinillas variaba de tal manera que cuando el nivel de humedad estuvo por debajo del 30%, el porcentaje de individuos en reposo era bajo; mientras que bajo niveles de humedad cada vez más altos, el porcentaje de individuos en reposo también incrementaba. Otras características del ambiente que también resultan relevantes en el control de la actividad locomotora de las cochinillas son la intensidad de la iluminación, la temperatura y la presencia de otros organismos, principalmente de la misma especie (Sutton, Harding, & Burn, 1972).

En estudios más recientes, las técnicas para el análisis de los patrones de actividad de pequeños organismos han evolucionado considerablemente respecto al tipo de observaciones y registros realizados en el pasado. Por ejemplo, pasando del empleo de la vibración de la arena experimental cuando los organismos se movían como indicador para trazar el movimiento de una aguja en un quimógrafo (e.g., Gunn & Kennedy, 1936), al rastreo del desplazamiento en tiempo real de los animales en cualquier tipo de espacio (e.g., Dell et al., 2014). Otro avance importante ha sido el uso herramientas de representación y análisis de datos que permiten describir con mayor detalle la dinámica del movimiento locomotor de los organismos. Por ejemplo, Neves Viana, & Pie (2017) registraron los patrones de actividad en ejemplares de tres especies diferentes de hormigas y una de escarabajos y analizaron la dinámica de los cambios en las distancias recorridas a través del tiempo mediante gráficas de recurrencia. Encontraron diferencias notables entre la dinámica en la actividad de las hormigas y la de los escarabajos.

Las gráficas de recurrencia fueron propuestas originalmente por Eckmann, Kamphorst y Ruelle (1987) para detectar patrones en series de tiempo que describen el comportamiento de sistemas dinámicos al representar dichas series como una matriz o como una gráfica en la que se incluye la serie de tiempo en uno de los ejes y la misma

serie de tiempo en el otro eje. Así, al conformar una matriz cuadrada con dimensiones $N \times N$, el cruce de un renglón con todas las columnas (o de una columna con todos los renglones) ejemplificaría la comparación entre un momento determinado de la serie temporal y todos los demás momentos incluidos en esta. Cuando los valores que toma la serie temporal en un determinado momento son semejantes (o iguales) a los que toma en un momento diferente, la matriz toma valores de 1 en los cruces correspondientes entre tales valores; mientras que en todos los casos en los que los valores de la serie de tiempo no coinciden (o recurren) la matriz toma valores de 0. En el caso de la representación gráfica, las recurrencias se describen como puntos negros, mientras que los casos en los que no hay recurrencia los espacios se quedan en blanco (para una revisión técnica apropiada, véase Marwan, Romano, Thiel, & Kurths, 2007).

En el contexto del estudio de sistemas dinámicos mediante el uso de gráficas de recurrencia, han surgido múltiples desarrollos que han permitido su análisis cuantitativo, en términos del porcentaje de recurrencia, del porcentaje de determinismo, el grado de entropía en la conformación de patrones de recurrencia, entre otras propiedades (cf. Webber & Zbilut, 2005), de manera que resulta más fácil evaluar las características del sistema dinámico. Esto ha repercutido en la extensión de su aplicabilidad a otros escenarios y fenómenos diferentes a los de la física, que es donde este tipo de técnica tuvo su origen y principal desarrollo (Bakeman & Quera, 2011; Zbilut & Webber, 2007). Considerando los desarrollos en el registro y análisis de la actividad locomotora en animales y la relevancia de los métodos provenientes del estudio de sistemas dinámicos, se realizó el presente estudio con el objetivo de analizar el caso de la ortokinesis en cochinillas mediante métodos de rastreo por videograbación y el análisis de sus trayectorias con base en gráficas y análisis cuantitativos de recurrencia.

Método

Sujetos

Se emplearon tres cochinillas recolectadas en

un jardín de la Ciudad de México. Según las características entomológicas descritas por Potter (2021), los sujetos fueron identificados como miembros de la especie *Armadillidium vulgare*. Fueron mantenidos en un terrario con condiciones de humedad ambiente y alimento disponible, de acuerdo con lo sugerido en cuanto al manejo de este tipo de organismos (cf. Sutton et al., 1972). Después de llevar a cabo el experimento los tres ejemplares fueron liberados en un jardín con características semejantes a aquel en el que se recolectaron.

Aparatos

Se empleó una caja de cartón como espacio experimental, con dimensiones de 78 x 28,5 x 41,5 cm (largo por ancho por alto). Dentro del espacio experimental se encontraba una plataforma blanca semitransparente sobre la que se colocó la caja de Petri (8,5 cm de diámetro) la cual funcionó como espacio de desplazamiento para las cochinillas. Debajo de la plataforma se colocó una luz de fondo (Megaluz®, LLP004, 12 W, 120 VCA, 6000 K) para mejorar el contraste entre el organismo y el fondo. A 20 cm sobre la caja de Petri, se colocó una cámara DSLR (Canon Rebel EOS T2i, 35 mm, f 4.5, ISO 3200) con la que se hicieron las grabaciones de las cochinillas en la arena de observación (formato de video: .mov, 640x480 pixeles). En cada pared de la caja se colocó una lámpara fluorescente de luz fría (G-light®, YKN07/13, 25 W, 120 VCA, 6400 k), para proveer de luz suficiente el espacio experimental y facilitar así las videograbaciones. Sobre la plataforma, junto a la caja de Petri se encontraba un sensor de humedad y temperatura (DHT11) conectado a una tarjeta Arduino® Uno, mediante los cuales se registró a lo largo de cada sesión tanto el nivel de humedad como de temperatura (en escala Celsius). En la Figura 1 se presenta un esquema del espacio experimental empleado en el presente estudio.

Para generar las diversas condiciones de humedad se utilizaron: hojuelas secantes (Cero humedad®) en una de las condiciones y un nebulizador ultrasónico de tipo hospitalario (Yuehua®, WH-203) en otras dos condiciones; en una cuarta condición no se necesitó material especial.

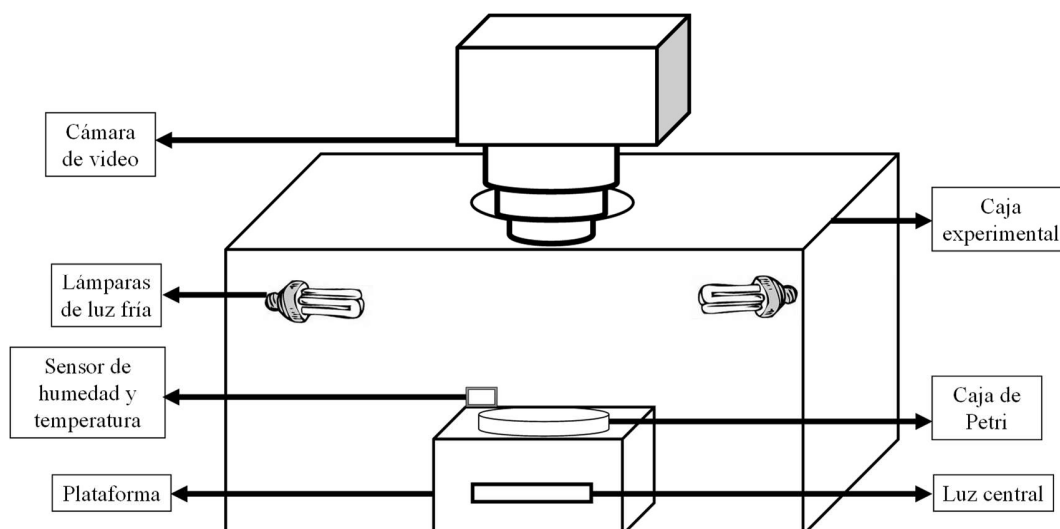


Figura 1. Dibujo del espacio experimental empleado para el estudio de la actividad en cochinillas bajo diferentes niveles de humedad.

Procedimiento

El experimento se llevó a cabo en cuatro días sucesivos en los que se iniciaba con el registro de temperatura y humedad durante el tiempo necesario para alcanzar el nivel requerido de humedad. Cuando las condiciones de humedad alcanzaban el nivel requerido y se habían mantenido estables por al menos cinco minutos, se introducía al primer individuo y se esperaba hasta que se estabilizara la humedad (aproximadamente un minuto), ya que cada vez que se abría la caja se alteraba ligeramente el nivel de humedad dentro de ella. La videograbación tuvo una duración de cinco minutos en todos los casos. Al terminar la grabación se retiraba al sujeto para colocarlo dentro del terrario. El procedimiento se repetía con los sujetos restantes. En cada uno de los cuatro días de experimentación se estableció un nivel diferente de humedad. El primer día se realizaron las grabaciones bajo un Nivel 2 de humedad ($M = 47,5\%$; E.E.M. = 1,0), correspondiente al nivel de humedad en el ambiente, el segundo día se utilizaron las hojuelas secantes para establecer el Nivel 1 ($M = 32,9\%$; E.E.M. = 1,8), el tercer día se utilizó el nebulizador a su máxima capacidad para generar el Nivel 4 ($M = 94,9\%$; E.E.M. = 0,1), el cuarto día se utilizó el nebulizador a mediana capacidad para establecer el Nivel 3 ($M = 66,3\%$; E.E.M. = 0,5). Todos los sujetos fueron expuestos a las diferentes condiciones en el mismo orden antes descrito. Para mayor claridad, los

resultados se presentarán siguiendo el orden ascendente de humedad, es decir, del Nivel 1 al 4. Es importante señalar que los niveles de humedad empleados en el presente estudio fueron determinados principalmente por la observación previa al experimento de que esos niveles particulares eran los que podían obtenerse y mantenerse por tiempos relativamente largos a partir de los aparatos y espacio experimental con el que se contó para esta investigación.

Análisis de datos

Para el análisis del desplazamiento de las cochinillas, los videos fueron convertidos de formato .mov a formato .avi. En una primera etapa se analizaron los datos a través del software IDtracker (Pérez-Escudero, Vicente-Page, Hinz, Arganda, & Polavieja, 2014) para obtener las trayectorias de cada sujeto en cada sesión, en términos de su posición en coordenadas XY (en mm) a través del tiempo de exposición a cada condición de humedad (con una resolución de 12 cuadros por segundo). Posteriormente, con el programa R (R Core Team, 2021), se generaron las diferentes representaciones gráficas que se incluyen en el trabajo, así como los análisis cuantitativos de recurrencia. Específicamente, se emplearon los paquetes *SparseM* (Koenker, 2021), *nonlinearTseries* (García, 2021), y *tseriesChaos* (Di Narzo & Di Narzo, 2019).

Resultados

En la figura 2 se muestran las trayectorias de desplazamiento para cada sujeto en cada una de las condiciones de humedad. En cada panel se muestra una figura tridimensional en la que la base corresponde al plano XY de la arena de desplazamiento y el eje vertical corresponde al paso del tiempo durante el periodo de exposición a cada nivel de humedad. Se encontró que en gran medida los sujetos experimentales realizaron recorridos a lo largo del perímetro de la caja de Petri, con algunos cruces por el centro u otras áreas del espacio. La mayoría de los recorridos se realizaron en el sentido de las manecillas del reloj, aunque ocasionalmente hubo cambios de dirección. En los tres casos es posible asumir, a

partir de las rutas de desplazamiento, que la distancia recorrida fue menor conforme el nivel de humedad fue más alto, es decir, las rutas cambiaron de un desplazamiento por el perímetro de la arena durante prácticamente los cinco minutos de exposición al Nivel 1 de humedad, por un desplazamiento con menos recorridos por la periferia y con varios momentos en los que las cochinillas se mantuvieron estáticas en diferentes puntos de la arena de desplazamiento. También es notorio el incremento en la variación de la ruta de desplazamiento bajo el Nivel 2 de humedad para los sujetos 2 y 3, para los cuales también fue mayor la distancia total recorrida durante la sesión bajo ese nivel de humedad que bajo cualquier otro, junto con el sujeto 1 (véase la tabla 1).

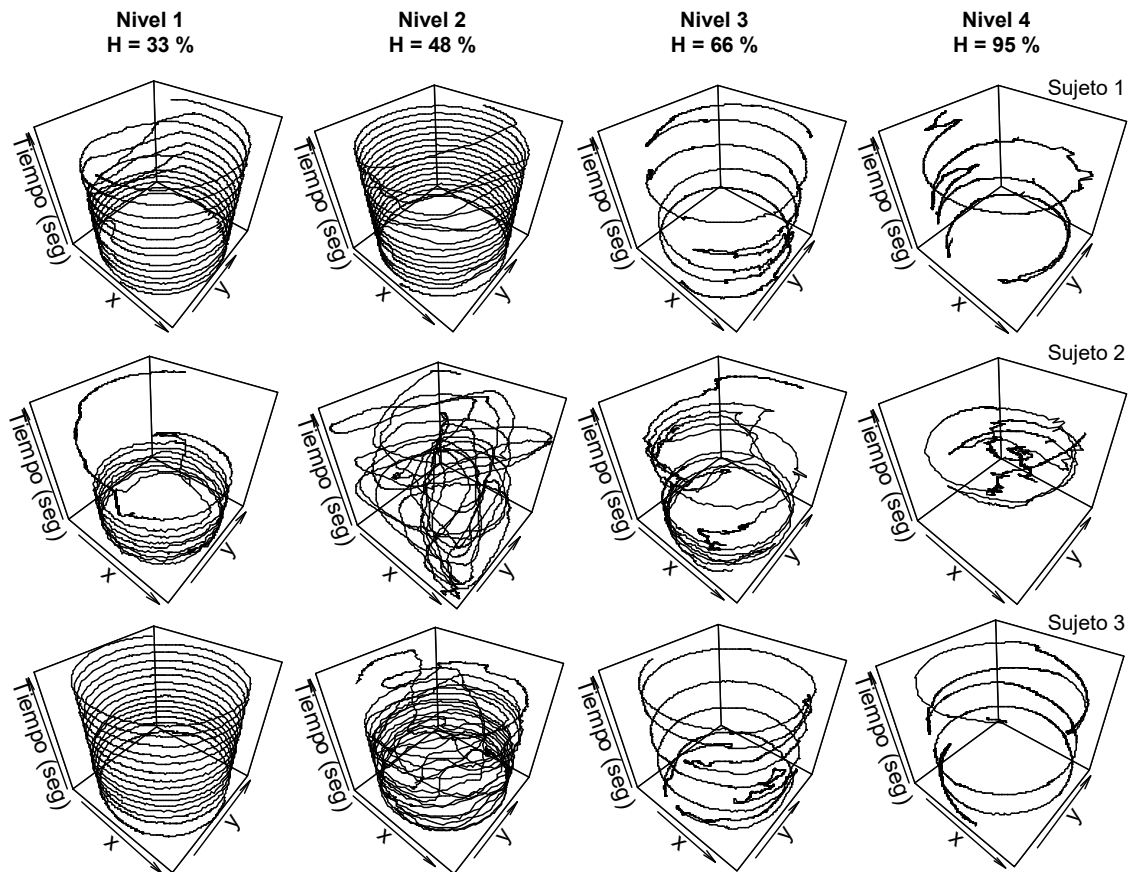


Figura 2. Rutas de desplazamiento. Se muestra el rastreo de la posición en coordenadas X-Y de cada cochinilla bajo cada condición de humedad, a través del tiempo (Eje Z).

Tabla 1

Distancia total recorrida (en metros) y velocidad lineal efectiva (mm/s)

Sujeto	Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		Nivel 4	
	D. T.	Vel. lineal	D. T.	Vel. lineal	D. T.	Vel. lineal	D. T.	Vel. lineal
1	2,78	9,51	3,65	12,22	1,27	4,24	1,03	3,43
2	2,36	7,98	3,29	10,98	3,21	7,66	1,23	4,18
3	3,45	11,11	4,14	13,82	1,44	7,85	1,14	3,82

Nota. D. T. = distancia total; Vel. Lineal = velocidad lineal.

A partir de las rutas de desplazamiento registradas se midió la distancia recorrida (en metros) y la velocidad lineal (milímetros por segundo) empleando las funciones descritas y programadas en *R* por Ruiz, Guerrero-Sánchez, Gutiérrez-Moreno, & Tamayo (2022). En la tabla 1 se presentan los valores obtenidos para el cálculo de la distancia total recorrida por cada cochinilla bajo cada nivel de humedad, así como la velocidad lineal de sus movimientos, calculada considerando como base el tiempo efectivo en el que hubo movimiento. Los valores mostrados en la tabla confirman la interpretación de las rutas de desplazamiento: la distancia total recorrida disminuyó con el incremento en el nivel de humedad, la velocidad neta también disminuyó conforme fue más alto el nivel de humedad y, bajo la condición con un nivel de humedad del 48 %, la distancia total recorrida y la velocidad lineal fueron mayores que bajo cualquier otro nivel de humedad.

Hasta este punto, los datos registrados a partir del rastreo de la locomoción de individuos (en lugar del conteo de individuos en movimiento respecto al total de individuos en el mismo espacio) y su análisis en términos de trayectorias en el plano XY de la arena de desplazamiento, sugieren un resultado consistente con los estudios anteriores sobre la relación entre el nivel de humedad y la ortokinesis en cochinillas (Gunn, 1937; Gunn & Kennedy, 1936). Sin embargo, los siguientes análisis pretenden ilustrar mediante técnicas de análisis de sistemas dinámicos, características más específicas de la estructura y patrones de la actividad locomotora en las cochinillas.

Al emplear la técnica de las gráficas de recurrencia es posible simplemente hacerlo con la serie de tiempo original respecto de sí misma y así establecer cuándo se repiten los mismos valores, o bien, los valores más cercanos (cf. Bakeman & Quera, 2011). Sin embargo, en la propuesta original de Eckmann et al. (1987), como en la gran mayoría de los trabajos en los que se ha

aplicado esta técnica (e.g., Webber, Ioana, & Marwan, 2016), la recurrencia se analiza respecto de la trayectoria del sistema dinámico en un espacio de fases (o espacio fásico). El espacio fásico se refiere a la representación del estado del sistema dinámico momento a momento a partir de un sistema de coordenadas en un espacio abstracto (Scott, 2007; Strogatz, 2018). Un ejemplo típico en el contexto del estudio de sistemas dinámicos es el caso del modelo de Lorenz (1963) para representar el flujo hidrodinámico, en el que cada uno de los estados de dicho sistema a través del tiempo es descrito por la solución de un sistema de tres ecuaciones diferenciales, las cuales generan un resultado completamente diferente dependiendo de las condiciones iniciales, aunque la trayectoria del sistema al representarlo en un espacio (fásico) tridimensional en el que cada coordenada está dada por la solución del sistema de ecuaciones en cada momento, sigue siempre el mismo patrón (con forma de mariposa). Un ejemplo menos típico, pero contextualizado en el estudio del comportamiento, es el de Ashby (1960), quien ilustra la representación momento a momento de los estados de las múltiples variables que están involucradas en, por ejemplo, un experimento de condicionamiento clásico como un sistema de coordenadas que permiten la representación del comportamiento a la manera de una trayectoria que sigue un patrón determinado a través del tiempo.

En la figura 3 se ejemplifica con los datos del sujeto 1, en la condición con el nivel más bajo de humedad (33%), lo que implicaría la diferencia entre la representación del sistema dinámico en el sistema de coordenadas del plano cartesiano (Panel A) y la representación del sistema en un espacio abstracto de dos dimensiones (Panel C) y en uno de tres dimensiones (Panel D), a partir de la reconstrucción del sistema dinámico a partir de una sola de sus variables, por ejemplo, las coordenadas de posición en el eje X (Panel B). En el

Panel A se muestran los mismos datos que se muestran en panel superior izquierdo de la figura 2, aunque en esta ocasión con la ruta de desplazamiento representada de manera bidimensional. En el Panel B, se muestra la serie temporal correspondiente a la posición del sujeto 1 en el Eje X, momento a momento. Es posible apreciar una función sinusoidal que describe el movimiento para un lado y hacia el otro respecto del eje en cuestión. En el Panel C se muestra una reconstrucción bidimensional del sistema dinámico original (la ruta de desplazamiento) a partir de la posición en X momento a momento y, nuevamente, la posición en X momento a momento desfasada por un segundo respecto de la serie original. Debe tomarse en cuenta que, aunque el desfase es

de un segundo, implica un desfase de 12 frames por segundo (fps), debido a la resolución empleada en el rastreo del movimiento de la cochinilla. En el Panel D se muestra una reconstrucción tridimensional del sistema dinámico original (la ruta de desplazamiento) a partir de la posición en X momento a momento, la posición en X momento a momento desfasada por un segundo respecto de la serie original y la posición en X momento a momento desfasada por dos segundos respecto de la serie original. En ambas reconstrucciones es posible apreciar que la trayectoria del sistema dinámico se asemeja bastante a la forma original de la ruta de desplazamiento en coordenadas cartesianas.

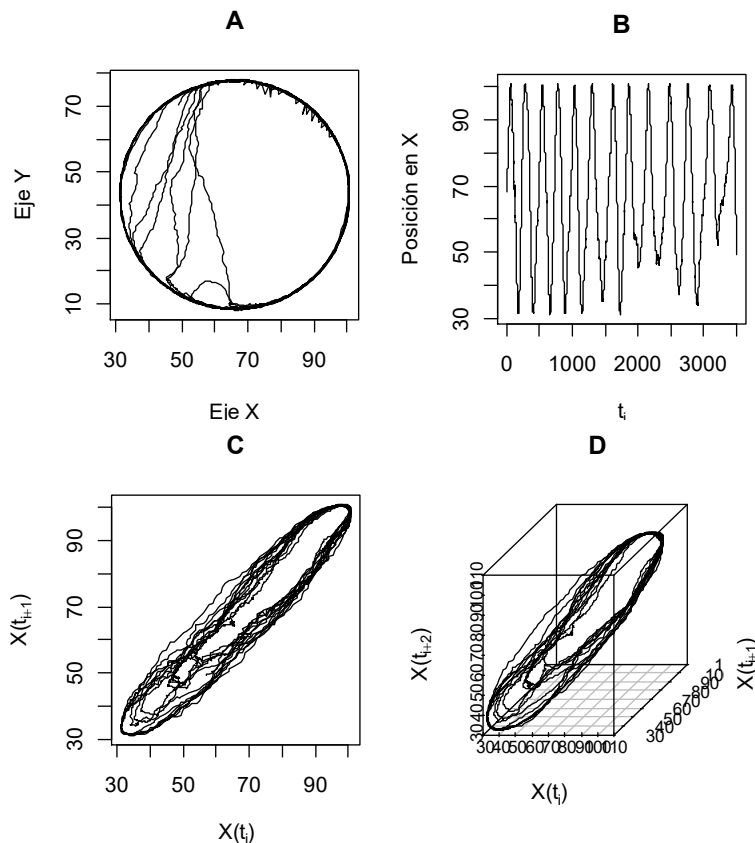


Figura 3. Reconstrucción del sistema dinámico. Se muestra la representación del sistema dinámico en el sistema de coordenadas del plano cartesiano (Panel A), la posición sobre el Eje X (Panel B), la representación del sistema reconstruido en un espacio abstracto de dos dimensiones (Panel C) y en uno de tres dimensiones (Panel D).

De acuerdo con Strogatz (2018), el número de dimensiones requeridas para la reconstrucción del sistema en el espacio fásico no tiene por qué ser mayor al suficiente para representar adecuada-

mente al sistema original (cf. Takens, 1981). En el presente estudio se usaron como criterios para establecer el número de dimensiones involucradas en las reconstrucciones del sistema dinámico del

movimiento de cada cochinilla bajo cada nivel de humedad, la función de información mutua y, para encontrar el grado adecuado de desfase temporal entre dimensiones, la técnica del falso vecino más cercano (véase Marwan et al., 2007, para revisión de ambas técnicas).

En la figura 4 se muestran las gráficas de recurrencia correspondientes a la trayectoria del sistema dinámico reconstruido a partir de la serie temporal del desplazamiento momento a momento en el Eje X de cada sujeto en cada condición, empleando para todos los casos un número de dimensiones igual a 2 y un valor de desfase igual a 60 frames (i.e., cinco segundos). Los puntos negros en cada gráfica representan las ocasiones en los que la trayectoria del sistema dinámico recorre una misma órbita (o pasa muy cercana), es decir, los puntos negros indican la recurrencia del sistema dinámico. Es notable que bajo los niveles de humedad del 33% y 48% la periodicidad

con la que recurre el sistema es casi constante, particularmente en los casos del sujeto 1, del sujeto 2 (en la condición de humedad del 48%) y del sujeto 3 (en la condición de humedad del 33%), en donde aparecen patrones de recurrencia consistentes en diagonales paralelas a la diagonal principal separadas por franjas blancas. Conforme el nivel de humedad fue mayor, los patrones de recurrencia resultaron menos consistentes. Aunque persistieron los patrones en diagonal, estos fueron notablemente más cortos que en las condiciones de menor nivel de humedad. También es notable la aparición de patrones consistentes en cuadros negros, lo cual representa los momentos en los que el sistema dinámico se mantuvo atrapado en una zona de la órbita por algún tiempo. Este tipo de patrón, frecuente en el sujeto 2, se corresponde con las pausas en su movimiento observadas en las rutas originales (véase la figura 2).

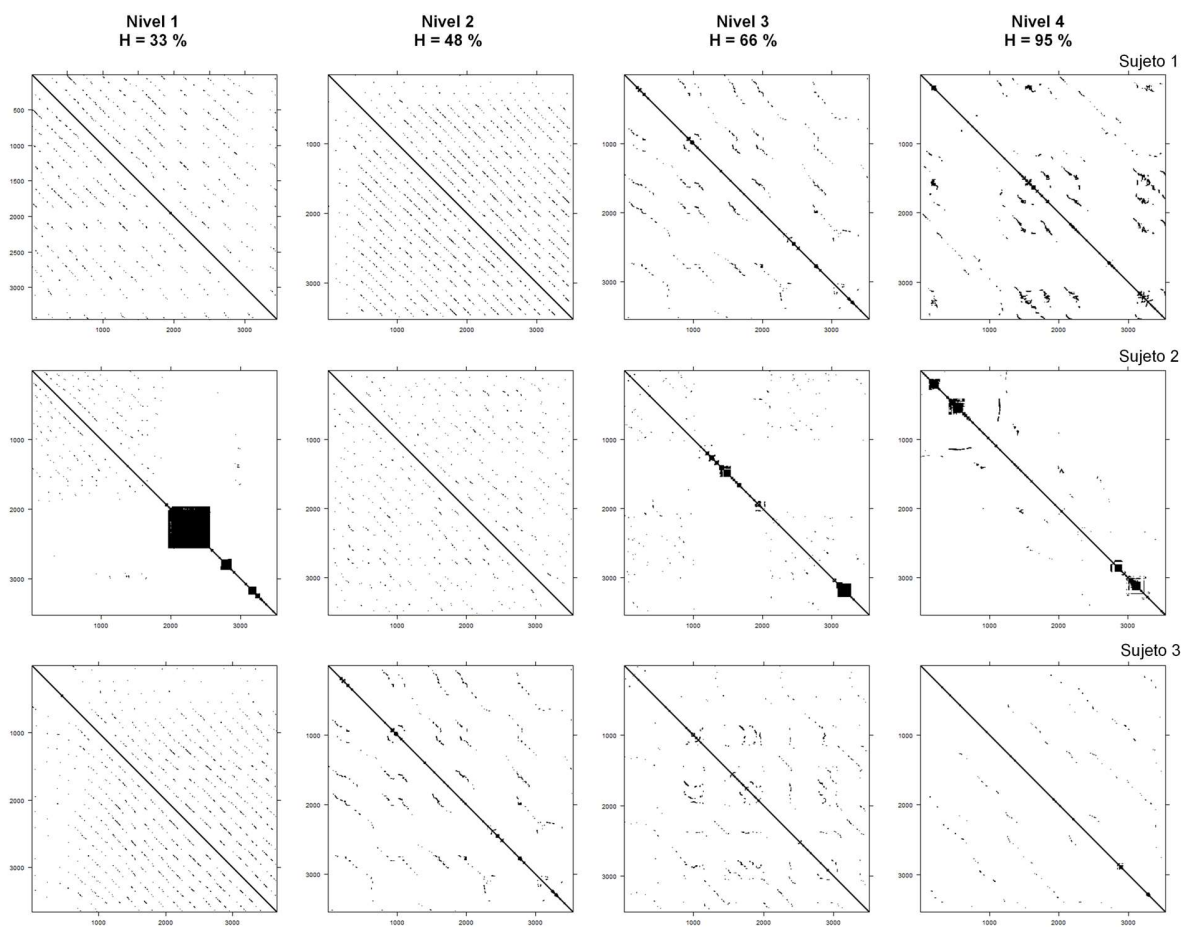


Figura 4. Gráficas de recurrencia. Se muestra la proporción y patrones de recurrencia para cada sujeto, bajo cada nivel de humedad.

Con el objetivo de comparar la recurrencia en cada condición, además de otros indicadores, en la tabla 2 se muestran los resultados de los análisis cuantitativos correspondientes, obtenidos mediante los paquetes mencionados en la sección anterior. La cuantificación permite obtener valores específicos que facilitan la comparación entre sujetos y condiciones, sin recaer únicamente en una interpretación cualitativa de los patrones observados en las gráficas de recurrencia. En los resultados que se muestran en la tabla 2, es posible observar que el porcentaje de recurrencia tuvo un nivel bajo y más o menos semejante entre sujetos y a través de las diferentes fases experimentales, excepto en el caso del sujeto 2 bajo el Nivel 1 de humedad, cuyo valor alto en el porcentaje de recurrencia se corresponde con la concentración notable de puntos negros en el panel intermedio de la primera columna de la Figura 4. Aunque el porcentaje de recurrencia fue bajo, el patrón de tal recurrencia estuvo más o menos definido en todos los casos. El porcentaje de de-

terminismo, con valores relativamente altos, sugiere que trayectoria del sistema representado tuvo un comportamiento periódico, lo cual coincide con las rutas de desplazamiento en la arena experimental (véase figura 2), en las que se observó una ruta circular en casi todos los casos, así como con la predominancia de diagonales en las gráficas de recurrencia (figura 4). El porcentaje de laminaridad fue más variable entre sujetos y entre condiciones, aunque es notable que bajo los niveles de humedad 3 y 4 fue más alto y constante en todos los casos. Los valores obtenidos coinciden con el incremento de las recurrencias dispuestas en líneas horizontales (o verticales) en las gráficas de la figura 4, esto es, conforme el nivel humedad fue mayor. Finalmente, el nivel de entropía siguió una tendencia semejante a la laminaridad, es decir, fue ligeramente mayor conforme el nivel de humedad también lo fue. En relación con lo mostrado en las gráficas de la figura 4, es posible interpretar que las trayectorias del sistema fueron cada vez más complejas.

Tabla 2
Indicadores del análisis cuantitativo de recurrencia

Sujeto	Nivel 1				Nivel 2				Nivel 3				Nivel 4			
	% Rec	% Det	% Lam	Entropía	% Rec	% Det	% Lam	Entropía	% Rec	% Det	% Lam	Entropía	% Rec	% Det	% Lam	Entropía
1	0,06	72,30	38,50	0,97	0,06	76,42	28,53	1,12	0,26	88,46	89,84	2,12	0,53	90,42	93,89	2,24
2	2,85	98,74	98,61	3,79	0,05	77,63	47,45	1,09	0,56	95,47	95,14	2,71	0,62	92,71	95,15	2,52
3	0,05	79,05	22,68	1,21	0,06	73,77	38,50	1,42	0,22	88,82	89,25	2,07	0,14	89,27	90,36	2,14

Nota. % Rec = porcentaje de recurrencia; % Det = porcentaje de determinismo; % Lam = porcentaje de laminaridad.

Discusión

El objetivo del presente estudio fue analizar el caso de la ortokinesis en cochinillas mediante métodos de rastreo por videograbación y analizar sus trayectorias con base en gráficas y análisis cuantitativos de recurrencia. Al respecto, se encontraron resultados consistentes con los reportes originales sobre la ortokinesis en cochinillas (Fraenkel & Gunn, 1961; Gunn, 1937). Mientras que en los estudios originales se registraba la proporción de animales en movimiento dentro de una arena de observación, en ocasiones incluso de manera indirecta al registrar la vibración en la arena mediante una aguja en un tambor (cf. Gunn & Kennedy, 1936), en el presente estudio se rea-

lizaron videograbaciones de organismos aislados y se realizaron rastreos de su actividad locomotora mediante software especializado para identificar las coordenadas de la posición del organismo momento a momento (Pérez-Escudero et al., 2014). No obstante, mediante ambas técnicas es posible concluir que las cochinillas reaccionan ante un gradiente de humedad mostrando mayor o menor nivel de actividad e incluso variando la velocidad de sus movimientos. Una ventaja importante de las técnicas de rastreo como la empleada en el presente estudio es que permiten registrar y representar la trayectoria exacta del movimiento llevado a cabo por las cochinillas y no solo establecer si hay o no movimiento. En resumen, el nivel de actividad, la velocidad lineal

del movimiento y la direccionalidad de este es más alta cuando el nivel de humedad en el entorno es bajo, mientras que hay menor actividad y con menor velocidad bajo condiciones con mucha humedad.

La posibilidad de contar con las rutas de desplazamiento de las cochinillas permitió realizar un análisis de la recurrencia en los patrones del movimiento de los sujetos, tanto de manera gráfica como de manera cuantitativa. Los resultados encontrados mediante este tipo de técnica proporcionaron una visión diferente en el análisis de las rutas de desplazamiento, enfocado en las características específicas de las posiciones en las coordenadas cartesianas X-Y para reconstruir a partir de ellas la representación del desplazamiento como un sistema dinámico.

Si bien otros autores han ilustrado la pertinencia de las gráficas de recurrencia como técnica de análisis del desplazamiento de organismos diferentes a las cochinillas, tales autores han basado sus análisis en la distancia euclidiana entre las coordenadas X-Y de un momento al siguiente, es decir, en la distancia entre la posición de hormigas y escarabajos en un momento t_i y su posición en un momento t_{i+1} (Neves et al., 2017) o entre la posición de ratas en un momento t_i y un punto de referencia particular, como un dispensador de agua (Palacios, 2016). En el presente estudio se empleó directamente la ruta seguida de principio a fin durante el periodo de exposición a cada nivel de humedad y fue tal ruta la que se reconstruyó a partir de una de las variables que describieron la ruta original, la posición en X momento a momento. Las gráficas de recurrencia obtenidas mostraron variaciones sistemáticas en los patrones de recurrencia observados en relación con el nivel de humedad específico en cada condición, con patrones de recurrencia periódicos más definidos en los niveles bajos de humedad, es decir, cuando las cochinillas estuvieron mayor tiempo en movimiento y con velocidades más altas. En cuanto el nivel de actividad disminuyó con el incremento en la humedad en el entorno, los patrones de recurrencia fueron menos sistemáticos, aunque persistieron los patrones en diagonal. La característica de los patrones en diagonal en las gráficas de recurrencia es común en sistemas dinámicos que tienen como característica ser cíclicos en su versión original (cf. Marwan et al., 2007). En el presente estudio se observaron pa-

trones homogéneos y repetitivos del desplazamiento en las condiciones con bajo nivel de humedad, mientras que los patrones de desplazamiento fueron más heterogéneos bajo niveles altos de humedad. Asimismo, los indicadores del análisis cuantitativo de recurrencia mostraron valores que describen con mayor precisión la dinámica de los patrones de recurrencia, mostrando que tanto el porcentaje de recurrencia como el de determinismo fueron más o menos semejantes a través de las condiciones de humedad, aunque la laminaridad varió de manera notable para el sujeto 2. En el caso de la entropía, el valor observado bajo cada nivel de humedad mostró que conforme aumentó el nivel de humedad la dinámica del movimiento de las cochinillas fue más complejo.

El presente reporte no pretende ser exhaustivo en la descripción de los detalles involucrados técnicas de análisis de sistemas dinámicos, como es el caso de las gráficas de recurrencia y los correspondientes análisis cuantitativos, ni de las posibles implicaciones que tendría concebir a las rutas de desplazamiento como la trayectoria de un sistema dinámico no lineal (cf. Killeen, 1989). Las múltiples características de los sistemas dinámicos no lineales y la teoría subyacente a las técnicas de análisis son tales que plantean la posibilidad de analizar al comportamiento de seres vivos desde dicha perspectiva al enfatizar el estudio de los sistemas dinámicos como un flujo que ocurre de manera continua y en donde el estado del sistema en un momento determinado está influenciado tanto por las condiciones iniciales, como por los valores que se van actualizando momento a momento en el sistema, entre otras características (Gleick, 2015). Tal visión parece coincidir con los planteamientos de Ribes Iñesta (2018) en cuanto a una visión interconductual de lo psicológico en la que se enfatiza el interés en el comportamiento como un continuo y en donde los diferentes elementos que forman parte del campo interconductual toman un papel relevante como moduladores de la configuración de los episodios psicológicos, tanto por las condiciones iniciales en las que el organismo entra en contacto con el entorno como por el desarrollo momento a momento de las interacciones organismo-ambiente. No obstante, queda pendiente llevar a cabo las investigaciones necesarias para evaluar la pertinencia de un análisis de lo psicológico como un sistema dinámico no lineal, incluyendo situacio-

nes diferentes a la actual en la que se tomó como dato de análisis el movimiento de las cochinillas. En otras circunstancias y con otras especies, incluyendo a los humanos, podría haber mayor o menor dificultad para emprender este propósito (cf. Guastello & Gregson, 2011; Guastello, Koopmans, & Pincus 2013).

Referencias

- Ashby, W. R. (1960). *Design for a brain. The origin of adaptive behavior* (2nd edition). New York, New York: Wiley.
- Bakeman, R. & Quera, V. (2011). *Sequential analysis and observational methods for the behavioral sciences*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Brown, R. & Herrnstein, R. J. (1975). *Psychology*. Boston, Massachusetts: Little & Brown.
- Dell, A. I., Bender, J. A., Branson, K., Couzin, I. D., Polavieja, G. G., Noldus, L. P., . . . Brose, U. (2014). Automated image-based tracking and its application in ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(7), 417-428.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.05.004>
- Di Narzo, A. & Di Narzo, F. (2019). *tseriesChaos: Analysis of nonlinear time series*. R package version 0.1-13.1.
 Recuperado de <https://bit.ly/3cEkJZe>
- Eckmann, J., Kamphorst, S. O., & Ruelle, D. (1987). Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics Letters (EPL)*, 4(9), 973-977.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/4/9/004>
- Fraenkel, G. & Gunn, D. (1961). *The orientation of animals*. Dover Edition. New York, New York: Dover.
- García, C. A. (2021). *nonlinearTseries: Nonlinear time series analysis*. R package version 0.2.11.
 Recuperado de <https://bit.ly/3cKxPE8>
- Gleick, J. (2015). *Chaos making a new science*. London, United Kingdom: The Folio Society.
- Guastello, S. J. & Gregson, R. A. (2011). *Nonlinear dynamical systems analysis for the behavioral sciences using real data*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Guastello, S. J., Koopmans, M., & Pincus, D. (2013). *Chaos and complexity in psychology: The theory of nonlinear dynamical systems*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Gunn, D. L. (1937). The humidity reactions of the wood-lice, porcellio scaber (latreille). *Journal of Experimental Biology*, 14(2), 178-186.
<https://doi.org/10.1242/jeb.14.2.178>
- Gunn, D. L. & Kennedy, J. S. (1936). Apparatus for investigating the reactions of land arthropods to humidity. *Journal of Experimental Biology*, 13(4), 450-459.
<https://doi.org/10.1242/jeb.13.4.450>
- Gunn, D., Kennedy, J., & Pielou, D. (1937). Classification of taxes and kineses. *Nature*, 140, 1064.
<https://doi.org/10.1038/1401064a0>
- Killeen, P. R. (1989). Behavior as a trajectory through a field of attractors. In J. R. Brink & C. R. Haden (Eds.), *The computer 6 the brain: Perspectives on human and artificial intelligence* (pp. 53-82). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Koenker, R. (2021). *SparseM: Sparse Linear Algebra*. R package version 1.81.
 Recuperado de <https://bit.ly/3vi6MGK>
- Loeb, J. (1918). *Forced movements, tropisms, and animal conduct*. Philadelphia, Pennsylvania: J. B. Lippincott Company.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2), 130-141.
<https://doi.org/fwwt5q>
- Marwan, N., Romano, C.M., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329.
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.11.001>
- Neves, F. M., Viana, R. L., & Pie, M. R. (2017). Recurrence analysis of ant activity patterns. *Plos One*, 12(10).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185968>
- Palacios, H. (2016). *Medidas molares y análisis no lineal de datos*. (Tesis Doctoral). Universidad Veracruzana, Veracruz, México.
- Pérez-Escudero, A., Vicente-Page, J., Hinz, R. C., Arganda, S., & Polavieja, G. G. (2014). IdTracker: Tracking individuals in a group by automatic identification of unmarked animals. *Nature Methods*, 11(7), 743-748.
<https://doi.org/10.1038/nmeth.2994>
- Potter, M. F. (s. f.). Sowbugs and pillbugs. *ENTFACT-439*. Cooperative extension service, University of Kentucky, College of agriculture, Kentucky.
 Recuperado de <https://bit.ly/3zvCJxZ>
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
 Recuperado de <https://www.R-project.org/>
- Ribes Iñesta, E. (2018). *El estudio científico de la conducta individual. Una introducción a la teoría de la psicología*. Ciudad de México, México: Manual Moderno.
- Ruiz, J. A., Guerrero-Sánchez, C. G., Gutiérrez-Moreno, I. A., & Tamayo, J. (2022). Análisis de dimensiones continuas del comportamiento: un tutorial en R. *Revista Mexicana de Análisis de la Conducta*, 48.

- Scott, A. W. (2007). *The Nonlinear Universe. Chaos, emergence, life*. Berlin, Germany: Springer.
- Staddon, J. E. R. (2016). *Adaptive behavior and learning* (2nd edition). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Strogatz, S. H. (2018). *Nonlinear dynamics and chaos: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Sutton, S., Harding, P., & Burn, D. (1972). *Woodlice*. London, United Kingdom: Ginn.
- Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Mathematics Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*, 366-381. <https://doi.org/10.1007/bfb0091924>
- Webber, J. C., Ioana, C., & Marwan, N. (2016). *Recurrence plots and their quantifications: Expanding horizons*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29922-8>
- Webber, C. & Zbilut, J. (2005). Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. In M. A. Riley & G. C. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences* (pp. 26-94). Recuperado de <https://bit.ly/3cBsSgZ>
- Zbilut, J. P., & Webber, C. L. (2007). Recurrence quantification analysis: Introduction and historical context. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 17(10), 3477-3481. <https://doi.org/10.1142/s0218127407019238>

Fecha de recepción: 15 de noviembre de 2021

Fecha de recepción de revisión 1: 1 de diciembre de 2021

Fecha de recepción de revisión 2: 28 de mayo de 2022

Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2022