

Ondas no lineales en la locomoción de las culebras *Thamnophis melanogaster* y *Thamnophis eques*

Javier Manjarrez Silva*, Ma. de Lourdes Nájera López**, Carmen Zepeda-Gómez* y Máximo Agüero Granados*

Recepción: 27 de febrero de 2013

Aceptación: 19 de junio de 2013

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

** Plantel Nezahualcóyotl, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Correos electrónicos: jsilva@uaemex.mx;

malourdesnl@yahoo.com; zepedacar@yahoo.com.mx y makxim@gmail.com

Los autores desean expresar sus agradecimientos a los árbitros anónimos, quienes con sus oportunas críticas y comentarios al manuscrito, contribuyeron a mejorarlo. Asimismo nuestros reconocimientos sinceros a los ex estudiantes de Biología de la UAEM Vanessa Escalona y Roberto Acosta por su apoyo para obtener los datos necesarios para este trabajo. Este estudio fue parcialmente financiado por la UAEM a través de la SIEA.

Resumen. Se reportan los resultados experimentales comparados con los teóricos sobre la posible existencia de ondas no lineales solitónicas durante el desplazamiento de un ser vivo a través de la observación de la locomoción de huida terrestre de las culebras *Thamnophis melanogaster* y *Thamnophis eques*. En *T. eques* se encontró que el número total de puntos de contacto disminuyó al aumentar la velocidad y la longitud de onda, mientras que la amplitud de onda disminuyó. En el caso de *T. melanogaster* solo se encontró que el número total de puntos de contacto disminuyó conforme la velocidad aumentó; en contraste la amplitud y longitud de onda permanecían casi constantes.

Palabras clave: medios dispersivos, huida terrestre, locomoción, solitones, ondas no lineales.

Non linear Waves in the Locomotion of *Thamnophis Eques* and *Thamnophis Melanogaster* Snakes

Abstract. In this work we report experimental results compared with theoretical results on the possible existence of solitonic non linear waves in dispersive media during movement of a living animal, through the observation of terrestrial escape locomotion in snakes *Thamnophis eques* and *Thamnophis melanogaster*. In *T. eques* we found that the total number of contact points decreased as the speed and wavelength increase, while the amplitude decreased. In contrast, in *T. melanogaster*, we found that the total number of contact points decreased as the speed increased, while the wavelength and amplitude remained almost constant.

Key words: dispersive media, terrestrial escape, speed.

Introducción

En el estudio del comportamiento y la transmisión de señales de un lugar a otro se encontraron varios fenómenos que *a posteriori* generaron una serie de aplicaciones fundamentales. La descripción matemática de la evolución de señales u ondas se realiza mediante el análisis de ecuaciones diferenciales que en una primera aproximación, tienen un comportamiento lineal. Sin embargo, estas ecuaciones lineales no presentan un buen ajuste a la variación de las ondas en la naturaleza. Cuando la *no linealidad*

se incorpora en el análisis matemático de la propagación de ondas, surgen entidades nuevas como los solitones. Estas entidades surgen del delicado equilibrio entre la no linealidad de las ecuaciones diferenciales y la dispersión. La no linealidad la interpretaremos como la fuerza de amarre entre las diferentes componentes de la onda, a diferencia de la dispersión que desarma los componentes para mantener unido un paquete de ondas inicialmente formado. Una característica importante de los solitones es que viajan en medio sin pérdida sustancial de energía y forma.

El primer reporte de un solitón data de 1844, el cual relata que el ingeniero escocés J. Scott Russell observó una onda solitaria en el Canal Unión en Hermiston, de Edimburgo a Glasgow. Documentó que ésta se propagaba sin variación alguna en su forma. Le dio el nombre de *Great Waves of Translation* (maravillosa onda de traslación). Fue hasta mediados de 1960 que Zabusky y Kruskal introdujeron la palabra *solitón*, que hace referencia al comportamiento tipo partículas de ondas no lineales en aguas poco profundas, descritas por la ecuación de Korteweg y De Vries. Las propiedades de esta estructura incluyen el balance de la dispersión y la no linealidad. De tal forma, que ésta preserva su forma aún después de una colisión con otro solitón, lo cual demuestra que su energía se puede propagar en paquetes estables (Zabusky y Kruskal, 1965). La aplicación de una teoría de solitones en el área de la biología, especialmente en biofísica o fisiología, es parte de las nuevas líneas de investigación, donde se analiza la propagación inalterada de las ondas no lineales que surgen en fenómenos biológicos. A estas entidades se les llama a bio-solitones; por ejemplo, en el estudio de las biomembranas y nervios se ha analizado el fenómeno de los impulsos nerviosos desde un análisis de equilibrio de gradientes iónicos (Hodking y Huxley, 1952). Tal aproximación puede aplicarse a teorías de comportamientos ondulatorios, como es el caso del desplazamiento que realizan los seres vivos reptantes.

Si la materia viva es considerada como un medio donde se podrían generar ondas no lineales y si está cargada de suficiente energía, entonces se generarán colonias de bio-solitones. Estas entidades tienen la capacidad de interactuar entre sí atrayéndose-repeliéndose y forman grupos estables que no tienen un comportamiento trivial en el espacio. Las ondas musculares que conducen al movimiento ondulatorio del cuerpo de los organismos que se desplazan en medios acuáticos o terrestres, como es el caso de las culebras, podrían tener naturaleza solitónica, debido a que los solitones se trasladan sin pérdida de forma o velocidad y tienden a mantener la energía constante. Esta propiedad es importante para este tipo de especies, ya que al minimizar la pérdida de energía durante el traslado presentan una ventaja evolutiva. En las culebras es probable la existencia de una serie de ondas a través del tiempo que formen una extensión y compresión de las mismas (Pethoukhov, 1999).

En este trabajo se describe la propagación de ondas no lineales que se desplazan de diferentes maneras y en distintos medios que pueden ser o no conservativos. En medios activos biológicos y químicos, se han observado ondas estacionarias cuyas características no dependen de condiciones iniciales, de frontera, ni de dimensiones lineales

del sistema (Davydov, 1984). En el caso de los defectos en materia condensada, la explicación muchas veces se realiza mediante el modelo no lineal de teoría de campos, por ejemplo el de Sine-Gordon cuando a un cristal metálico continuamente se le deforma mediante fuerzas de desplazamiento, responde a presión mediante el desplazamiento de un plano de átomos del cristal a lo largo del otro (Kosevich, 2006). Cuando se desplaza un segmento sobre otro, la parte delantera y los puntos adyacentes a éste se mueven respecto al otro plano, pero las partes lejanas de la parte frontal todavía no. Esta tardanza conlleva a la deformación de la celda cristalina en la región localizada del cristal. Se puede construir un modelo simple de este movimiento si consideramos que los átomos del segmento inferior están inmóviles y los de la parte superior se mueven bajo un potencial periódico. La ecuación no lineal diferencial que describe este proceso se denomina ecuación de Klein-Gordon tiene la siguiente forma:

$$\Phi_{tt} - \Phi_{xx} + kF[\Phi] = 0$$

La desviación de un átomo de su posición de equilibrio es Φ , pero ya en un medio continuo, t es el tiempo, x es la distancia y k es una constante (Makhankov, 1990).

En el desarrollo del artículo primero abordamos la parte esencial del estudio de la locomoción en serpientes; luego mostramos su método de estudio mediante ecuaciones diferenciales y experimentales, en el tercer apartado exponemos los resultados obtenidos y finalmente la última parte se dedica a la discusión y comentarios finales del trabajo.

1. Locomoción en serpientes

Actualmente, la aplicación de modelos teóricos no lineales en la biología es un campo de acción promisorio en las ciencias exactas. Esta diversificación ha producido un gran número de resultados y nuevos conceptos como los bio-solitones (Davydov, 1984). Los solitones son pulsos locales que en movimiento son estructuras estables y que matemáticamente son soluciones de campo, con propiedades de partícula, y además presentan la tendencia de detener el caos, es decir, no presentan un efecto de destrucción (Davydov, 1984).

Hipóticamente existe la posibilidad de encontrar una analogía en la locomoción de culebras con la dinámica no lineal en materia condensada descrita mediante una ecuación no lineal donde aparecen biones. Una de las versiones de la ecuación de Klein-Gordon, que tiene aplicaciones en partículas, gravitación, plasmas, óptica, redes neuronales, etc.,

se llama ecuación de Sine-Gordon, debido a que la parte no lineal es proporcional al $\sin \phi$ (Agüero, 2001). El surgimiento de ondas en estos casos se estudia tomando en cuenta solamente la posibilidad de aparición de tal o cual régimen ondulatorio. Éstos reciben el nombre de *auto-ondas* por su analogía con las oscilaciones de los sistemas no lineales, y aparecen como una consecuencia natural de las características de los medios activos típicos de la biología. Aquí, en cada punto del espacio se almacena energía oculta y la onda que se acerca sirve como señal a su libramiento que por sí mismo también la mantiene. En biología, las formas elementales de auto-onda incluyen los impulsos nerviosos y las ondas de locomoción (Davydov, 1984). Las serpientes por presentar un sistema de locomoción sin extremidades y articulado son un excelente modelo de estudio que demuestra la interacción entre la dinámica biológica y la física de acuerdo con la mecánica de vértebras-músculos-escamas ventrales (Cundall, 1987).

A partir de las consideraciones anteriores, se busca determinar si los solitones se encuentran como paquetes de energía, sin disipación, en la forma típica de una onda encorvada que durante su recorrido preserva tanto su forma como velocidad (Petouhkov, 1999). Debido a que la mayoría de la información sobre bio-solitones es teórica, este estudio tiene como objetivo demostrar que en un ser vivo se ajusta a las ondas solitónicas tipo bion a través de la caracterización experimental de la locomoción de huida terrestre de dos especies de culebras simpátricas (*Thamnophis melanogaster* y *Thamnophis eques*), además de su relación con el comportamiento solitónico como un fenómeno no lineal. Elegimos ambas especies porque están relacionadas filogenéticamente y abundan dentro del Altiplano Mexicano (Rossman *et al.*, 1996), además de tener dietas y hábitos de forrajeo diferentes en el agua. *Thamnophis melanogaster* se desenvuelve preferentemente dentro de un hábitat acuático, donde bucea para encontrar a sus presas; en contraste, *Thamnophis eques* es más anfibia, se alimenta de presas que se encuentran los límites agua-tierra. En consecuencia, al estar adaptadas a diferentes estrategias de búsqueda de alimento, pueden ajustarse a diferentes formas solitónicas.

Si la locomoción de huida terrestre de las culebras se asemeja a la planteada por las ondas solitónicas, sin pérdida de forma o velocidad y con energía constante, entonces existe una analogía entre esta locomoción de huida con la dinámica no lineal en materia condensada descrita mediante la ecuación Sine-Gordon. Se espera que a mayor velocidad de huida, el número de puntos de contacto disminuya. Aquí los puntos de contacto ocurren cuando el cuerpo de la serpiente toca el piso (Gans, 1975). Asimismo, se espera que la

amplitud de onda disminuya y la longitud de onda aumente; es decir, que la locomoción de la culebra se comporte como un fenómeno solitónico tipo bion. El deslizamiento y locomoción de las serpientes son el resultado de cómo evolucionaron: a partir de organismos que perdieron sus extremidades, todo el cuerpo se formó como órgano de locomoción y como consecuencia modificó sus vísceras, dando como resultado un alargamiento del tronco (Cundall, 1987). En tierra, las serpientes se desplazan por medio de puntos de apoyo y en el agua la locomoción involucra todo el cuerpo, pero en ambos medios requieren diferentes fuerzas y mecanismos musculares (Gans, 1970; Shine y Shetty, 2001). Las especies terrestres tienen más escamas ventrales que las acuáticas para tener más puntos de apoyo y poder desplazarse de manera eficiente en tierra (Jayne, 1985). El número de escamas ventrales permanece constante con la edad, pero es variable dentro de las poblaciones y las especies (Arnold, 1988).

2. Método

2.1. Fundamentación metodológica teórica

Se asume que la ecuación que gobierna el comportamiento de las ondulaciones en la locomoción de las culebras es del tipo Klein-Gordon.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial^2 x} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} = Q[\alpha, f(x), y, \dot{y}, \ddot{y}, t] \quad (1)$$

El parámetro α estará ligado con propiedades elásticas. Los puntos sobre la variable significan derivadas parciales con respecto al tiempo y al espacio, cuya parte derecha es una función sinusoidal de la variable dependiente y

$$\frac{\partial^2 y}{\partial^2 x} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} = \sin y \quad (2)$$

Siguiendo la hipótesis de Pethoukhov (1999), se considera como primera aproximación no lineal a las formas ondulatorias de la locomoción de las serpientes determinadas por la ecuación (2).

Un estudio más riguroso nos dará cierta aproximación respecto a esta ecuación, pero para los objetivos del presente trabajo determinamos un parámetro (B) que indica si una solución de esta ecuación llamada bion es la adecuada. Para ello nos basamos en las múltiples observaciones teóricas en algunos seres vivos respecto a esta ecuación no lineal de Sine-Gordon.

Una solución matemática de la ecuación (2) se llama solución tipo Breather o también denominado bion. Esta solución existe sólo cuando la combinación siguiente de parámetros ocurre de la forma:

$$m^2 = \frac{1}{2} \left(1 - B \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \right) < 1 \tag{3}$$

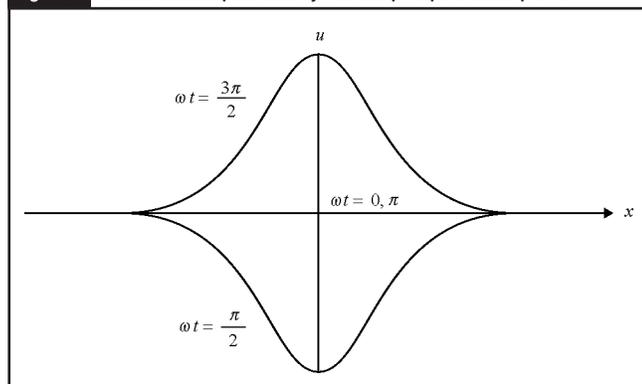
donde B es una constante de integración de la ecuación (3), la cual presenta las condiciones iniciales del sistema, u es la velocidad de la onda solitónica y c es la velocidad del sonido. Una vez determinados los posibles valores de la constante B podemos determinar su frecuencia mediante la fórmula:

$$w = \sqrt{1 - m^2} \tag{4}$$

Para un valor fijo de x la solución de la ecuación (2) representa una función periódica respecto al tiempo. Asumiendo que por el cuerpo de la culebra pasan varias ondas solitónicas, entonces se supone un *tren de biones*. Teóricamente esto es realizable porque existe un método para formar múltiples solitones mediante una transformación aplicada a uno solo, llamado *Backlund*.

Finalmente se realizó un cálculo numérico de la ecuación (3) en el rango paramétrico para la existencia del bion (explicada más adelante). Los resultados experimentales se obtienen para los puntos de contacto y la velocidad de huida terrestre de ambas especies de culebras. La amplitud y longitud de onda solo será estimada en *T. eques*, ya que sólo en ésta fueron significativas estadísticamente (Correlación de Pearson entre amplitud y longitud de onda como variables dependientes y velocidad como variable independiente).

Figura 1. Forma del bion para valor fijo del tiempo representado por x .



Respecto a la solución del solitón tipo bion, su aparición en sistemas no lineales ha sido estudiada por Petoukhov (1999) y tiene la siguiente fórmula matemática:

$$y(x, t) \approx -4 \tan^{-1} \left[\frac{m}{\sqrt{1 - m^2}} \cdot \frac{\sin(\omega t + a_2)}{\cosh(mx + a_1)} \right] \tag{5}$$

donde m es una variable indispensable para que puedan existir los biones y que está en función del tiempo y del espacio. La forma del bion se muestra en la figura 1 para valor fijo de tiempo.

Entonces, para que existan biones se necesitan conocer los parámetros definidos en la ecuación anterior, los cuales satisfacen ciertas relaciones algebraicas. En particular, para que existan biones es necesario que: $m^2 < 1$.

2. 2. Metodología experimental

Los experimentos se realizaron en dos especies de culebras del género *Thamnophis* que se desplazan en forma ondulatoria rápida (*T. melanogaster* y *T. eques*). Se buscan encontrar los parámetros del modelo tipo bion involucrados en su locomoción.

2. 2. 1. Sujetos experimentales

Los experimentos se efectuaron en 10 de culebras de la especie *T. melanogaster* y 10 de la especie *T. eques* procedentes de las localidades de Acambay, San Pedro Tlaltizapan, Santa María Atarasquillo, Xonacatlán y El Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México. Las culebras utilizadas en el experimento fueron adultas, mayores de 30 cm de longitud hocico-cloaca (LHC) para *T. melanogaster* y mayores de 39.5 cm de LHC para *T. eques*. Las culebras se mantuvieron dentro del laboratorio en un terrario individual de vidrio de 50 cm × 25 cm × 30 cm, se les colocó un fondo de papel, un recipiente con agua y un refugio de barro con un fotoperiodo de 12/12h (luz-obscuridad). La alimentación consistió en 2 peces de diversas especies, que se les ofrecían quincenalmente en un recipiente con agua.

Las culebras fueron sometidas a un ayuno aproximado de 12 días antes del inicio de las pruebas, el tiempo aproximado en digerir su alimento en zonas templadas (Secor y Diamond, 2000), para evitar que la adición de la masa corporal o alimenticia influyera en la reducción de la movilidad y de la eficiencia de huida (Garland y Arnold, 1983; Ford y Shuttlesworth, 1986; Martín, 1996).

La temperatura ambiental repercute en la locomoción rápida de las culebras porque determina el éxito para atrapar

a sus presas o escapar de sus depredadores (Rossman *et al.*, 1996). Por consiguiente, la temperatura del laboratorio y de las culebras se mantuvo constante entre los 25 °C y 29 °C, intervalo de temperatura de actividad natural de estas especies (Manjarrez y Drummond, 1996).

Finalmente, en cuanto a la longitud corporal se esperaba que las serpientes de mayor longitud fueran más rápidas. Sin embargo, los trabajos realizados de Heckrotte (1967) y Finkler y Claussen (1999) mostraron que la longitud corporal no fue directamente proporcional al incremento de la velocidad. No obstante en este trabajo sí fueron controladas como se describe en los resultados.

2. 2. 2. *Aparato experimental*

Los experimentos se realizaron en un carril de acrílico traslúcido de 2.8 × 0.160 × 0.2 m (figura 2), que contaba con un fondo de pasto sintético para que las culebras tuvieran una superficie adecuada y marcada cada 100 mm con cinta adhesiva para referencia. Las paredes laterales del carril estaban forradas con papel negro y así evitar que las culebras se desviarán durante su recorrido. Al final del carril se colocó un refugio de barro para que ahí trataran de esconderse. Con el objetivo de filmar dorsalmente la locomoción, se colocó una cámara de video Sony modelo TRV 830 en una posición fija sobre del carril, iluminado además con luz artificial para que la filmación resultara más nítida.

2. 2. 3. *Diseño experimental*

Las culebras habitaron en una pecera hasta que alcanzaron de 25 a 29 °C de temperatura corporal, ideal cuando están en un periodo de actividad (Manjarrez y Drummond, 1996). Posteriormente, en el inicio del carril de acrílico, la huida de las culebras fue estimulada con golpes ligeros en la sección caudal con una vara de madera o metal. La grabación se dio por terminada en el momento en que la culebra llegó al final del carril o bien cuando se detuvo sin que su recorrido fuera igual o mayor a su LHC. Cada prueba se repitió en dos ocasiones como mínimo y cuatro como máximo para cada individuo.

Las filmaciones descartadas fueron cuando la culebra se detenía completamente, mostraba conductas de ataque o defensa o permanecía en las paredes del carril. Las que sí se conservaron se transfirieron a un formato de video digital, del cual se obtuvieron imágenes cuadro por cuadro con el programa Pinnacle Studio DC10 plus. A partir del video se estimó la distancia (mm) recorrida, el tiempo del recorrido (s), la velocidad (mm/s), el número total de ondulaciones del cuerpo, las cuales se refieren

al movimiento periódico ondulatorio simple, el número total de puntos de contacto del cuerpo con el sustrato, la amplitud de cada ondulación (mm), la altura de la cresta o bien, profundidad del seno de una onda, la longitud de las ondulaciones (mm), que es la distancia que existe entre la cresta de una onda y la siguiente. Al tener varias mediciones en un cuadro, se procedió a obtener los promedios por recorrido y por organismo. Una vez obtenidos los resultados, se condujo a compararlos con el modelo solitónico tipo bion.

2. 2. 4. *Análisis estadístico*

La relación del número total de puntos de contacto, la frecuencia ondulatoria, la proporción corporal y la longitud de onda como variables dependientes con la velocidad como variable independiente fue determinada con el coeficiente de determinación, respectivamente. Se obtuvo, además la relación entre velocidad y amplitud de la curvatura del cuerpo por medio de regresiones lineales y la frecuencia ondulatoria con la fórmula (4), la cual se refiere al número de ondulaciones (*w*) que lleva a cabo una culebra durante un cierto periodo. La probabilidad utilizada para dichas pruebas fue de 95% de confiabilidad; las pruebas estadísticas se consiguieron gracias al programa Statgraphics plus 5.0 y Microsoft Excel 2000.

3. **Resultados**

El cuerpo de la culebra pasó por todos los puntos de contacto; la frecuencia fue visible durante el recorrido de huida terrestre (figura 3). De acuerdo con la predicción en *T. melanogaster* y en *T. eques* el número total de puntos de contacto durante su trayecto disminuyó significativamente en función de la velocidad, lo que sugiere que el modelo ondulatorio

Figura 2. Carril utilizado para medir la actividad locomotora de las culebras *T. melanogaster* y *T. eques*.

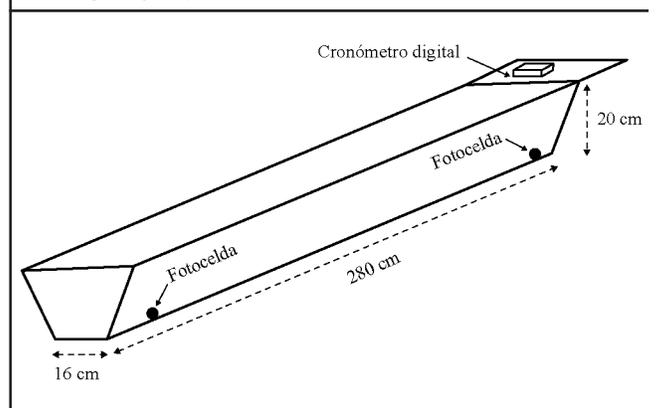
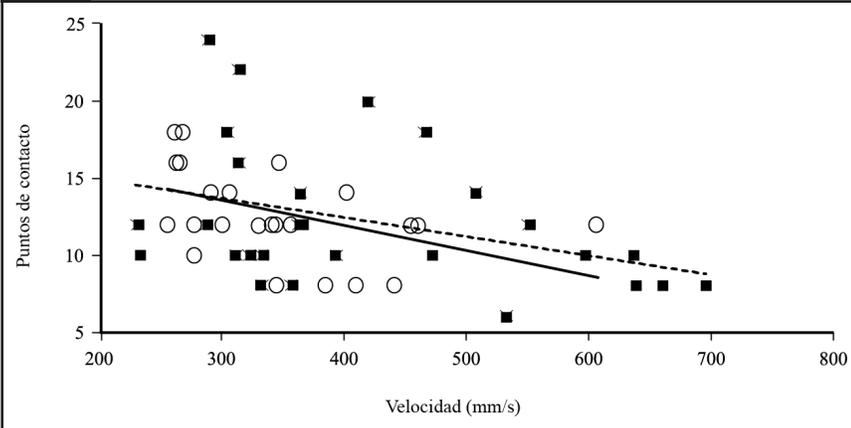
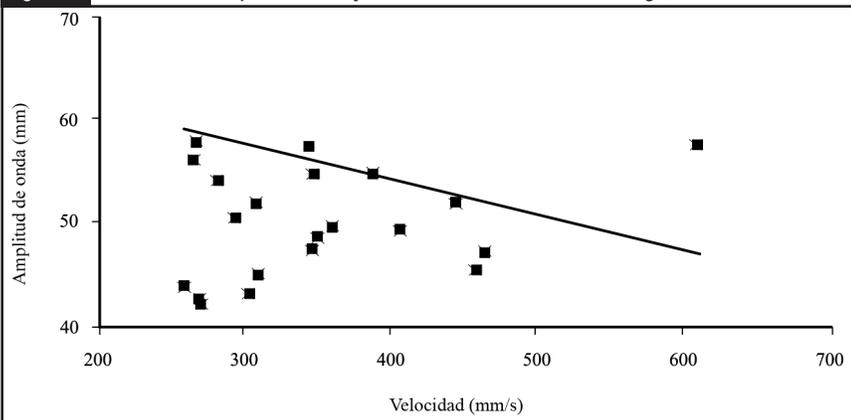


Figura 3. Relación de los puntos de contacto y la velocidad de la culebras *T. melanogaster* (■) y *T. eques* (○).



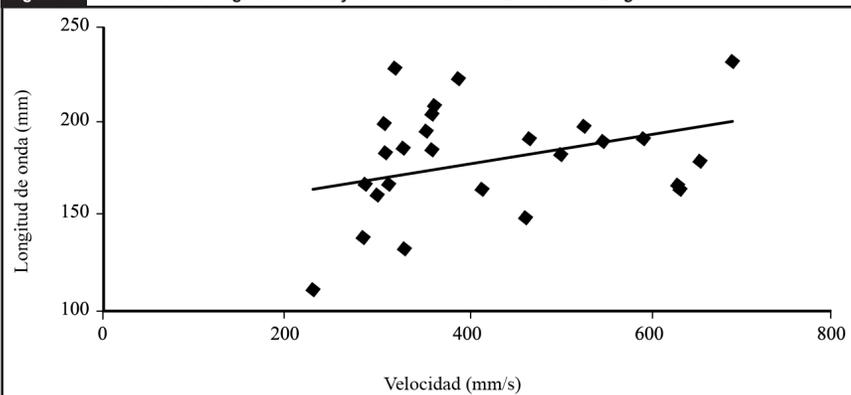
Nota: $R^2 = 25.5, p < 0.05$ (*T. melanogaster*), $R^2 = 17.2, p < 0.05$ (*T. eques* respectivamente).

Figura 4. Relación de la amplitud de onda y la velocidad de la culebras *T. melanogaster*.



Nota: $R^2 = 49.3, p < 0.05$.

Figura 5. Relación de la longitud de onda y la velocidad de la culebra *T. melanogaster*.



Nota: $R^2 = 23.8, p < 0.05$.

Tabla 1. Valores estimados de los parámetros.

	<i>Thamnophis melanogaster</i>	<i>Thamnophis eques</i>
u (mm/s)	347.078	419.259
u^2 (mm ² /s ²)	120 463.370	175 777.902
c (mm ² /s ²)	340 000.000	340 000.000
c^2 (mm ² /s ²)	1.156 ¹¹	1.156 ¹¹

de las culebras se comporta como un fenómeno solitónico tipo bion con un ahorro de energía y característico de los bio-solitones (figura 3).

En *T. melanogaster* la amplitud de onda disminuyó significativamente conforme la velocidad de huida terrestre aumentó (figura 4).

En este experimento, para las serpientes *T. melanogaster* el número de puntos de contacto disminuyó al reducirse la amplitud de onda, mientras que para la misma variable independiente la longitud de onda aumentó (figura 5). Tal relación no fue significativa para la especie *T. eques*.

Las regresiones lineales de la proporción corporal (que se obtuvo dividiendo la distancia recorrida por la culebra y su LHC) respecto a la velocidad de huida terrestre no fueron directamente proporcionales al incremento de la velocidad: la talla o proporción corporal de las culebras no es un factor determinante.

Las estimaciones de los parámetros para obtener B para las especies *T. melanogaster* y *T. eques* fueron calculadas usando el valor promedio u de la velocidad en las repeticiones de cada especie (tabla 1).

Comparando la velocidad de las culebras con la del sonido, podemos observar que $\frac{u^2}{c^2} \ll 1$ por lo tanto, al sustituir los valores de u^2 y c^2 en la fórmula (3) los valores del parámetro B estarán restringidos y podemos considerar que $B > -1$ para *T. melanogaster* y para *T. eques*, que es el intervalo en el cual se podrían encontrar solitones tipo bion.

Una vez determinados los valores posibles de esta constante, se obtiene la frecuencia mediante la fórmula (4) en donde se requiere que $m^2 < 1$. Para validar la existencia de biones.

El valor de w para ambas especies fue de $w = 1.4142213562$ ondas/s. Para un valor fijo de x , esta solución representa

una función periódica respecto al tiempo. Para ambas especies se ajustó el modelo solitónico tipo bion y el intervalo de valores iguales.

4. Discusión

El desempeño locomotor de huida de las culebras puede depender de factores como su morfología, fisiología y hábitos (Cundall, 1987; Jayne y Bennett, 1990). En este estudio se evaluó el desempeño locomotor terrestre de huida como un fenómeno no lineal de dos especies de culebras semiacuáticas del género *Thamnophis*. Las ondas de locomoción de huida terrestre, caracterizadas en la forma de puntos de contacto, la amplitud de onda, la longitud de onda y la proporción corporal, fueron las variables dependientes y la velocidad como variable independiente en todos los casos. También se realizó un cálculo numérico para la existencia del modelo solitónico tipo bion durante la locomoción de huida terrestre de ambas especies.

En medios activos biológicos y químicos se han observado que las características de las ondas estacionarias dependen de condiciones iniciales como la velocidad, longitud de onda y amplitud de onda. Los resultados sugieren que estas variables estuvieron fuertemente relacionadas con el número de puntos de contacto, condiciones de frontera y de dimensiones lineales del sistema (Davydov, 1984). La relevancia de estos resultados radica en que permiten afrontar las condiciones de modelaje matemático bidimensional sobre la locomoción de huida terrestre de las culebras, ya que se estudió como un fenómeno no lineal. Estos fenómenos de surgimiento de ondas se determinaron solamente por la posibilidad del régimen ondulatorio, como en el caso del caracol (Gray, 1968), en la manta raya (Guess, 1957), en el pez *Xenomystus nigris* y en serpientes (Petoukhov, 1999). Sin embargo, en estudios anteriores, en la modelación no se consideraron la influencia de las fuerzas de resistencia en los puntos de contacto que contribuirían en la dinámica no lineal haciéndola más realista, que se considerará para futuros trabajos.

En medios conservativos, la energía de las ondas se conserva o se dispersa débilmente; en cambio en nuestros experimentos hechos en medios activos, donde la energía además de mantenerse constante también puede incrementar, la longitud de onda estará fuertemente relacionada con las dimensiones del sistema, tal como se observó en los resultados obtenidos en *T. eques*, donde la longitud de onda aumentaba y la amplitud de onda disminuía conforme la velocidad se incrementaba. Esto se podría interpretar como una constancia de la energía, y por lo tanto de la velocidad

del solitón, que es la velocidad de las ondulaciones de las culebras durante su huida terrestre.

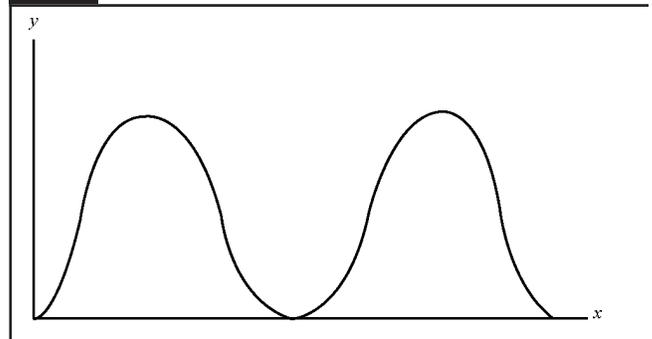
En fenómenos biológicos, como la búsqueda activa de presas, se debe gastar la mínima cantidad de energía posible (en este caso el mecanismo natural que podría reunir este tipo de cualidades pertenece a los solitones). Las ondas musculares que hacen reptar u ondular el cuerpo de las culebras pueden tener naturaleza solitónica, ya que los solitones se trasladan sin pérdida de forma o velocidad y mantienen constante la energía (Agüero *et al.*, 2002).

En este trabajo se observó que la forma ondulatoria del cuerpo de las culebras se mantenía constante en cada punto de contacto, fricción y gasto de energía, pero también se observó que estos puntos disminuían conforme la velocidad de las ondas de las culebras, o solitón, aumentaba. Esto se traduce en un ahorro o conservación de la energía, que es una de las características de los solitones (Makhankov 1990). Las soluciones tipo auto-ondas, o cercanos a los biones, son las responsables de las formas ondulatorias de las culebras que se mueven rápidamente sobre el sustrato (Gans, 1975). Estas soluciones tipo biones son una de las muchas soluciones de la ecuación de Sine-Gordon.

Para explicar mejor este punto, supongamos que las culebras se comportan como una cuerda. El análisis teórico está ligado a la teoría de la elasticidad, pero nosotros consideramos la versión más simplificada posible de la modelación matemática. Si cortáramos en muchos segmentos a la cuerda, o culebra, y ésta no se mueve, su cuerpo determinará el eje x , y, suponiendo que la tensión de la cuerda es constante a lo largo de su cuerpo, se designaría al desplazamiento como perpendicular respecto a x de un segmento; se obtendría un valor y para hacer la modelación simple (véase gráfica 1).

Siguiendo la hipótesis de Petoukhov (1999), consideramos como primera aproximación no lineal a la forma ondulatoria de la locomoción de huida terrestre de las culebras la determinada por la ecuación tipo bion. La no linealidad en el cuerpo de las culebras se debe a las propiedades elásticas

Gráfica 1. Tensión de la cuerda.



de su cuerpo, al mismo tiempo la dispersión es causada por una sección acotada de área. Las ondulaciones, entonces, son una serie de ondas solitónicas que se propagan a través del cuerpo de las culebras y el desplazamiento.

Nuestros experimentos permitieron determinar el rango de integración B sin recurrir a una suposición sobre qué tipo de condiciones iniciales podrían aplicarse al sistema para determinar las constantes de integración. Es decir, cuando una culebra inicia su locomoción de huida terrestre, origina una perturbación en su cabeza y que después se va convirtiendo en un tren de ondas solitónicas tipo biones.

Cuando las culebras mantienen contacto con el sustrato, pueden tener fuerzas no isotrópicas debido a sus escamas ventrales y se arrastran hacia fuera; las fuerzas friccionales son mínimas, pero cuando un segmento del cuerpo resbala hacia atrás, las escalas crecen y las fuerzas friccionales podrían tornarse muy grandes. Por todo esto, en las ondas de la locomoción de huida terrestre de las culebras, se asume un gasto de energía, mínimo debido a que los puntos de contacto disminuyen conforme la velocidad aumenta, además de que la forma ondulatoria del cuerpo de las culebras se mantiene constante. Esto también podría ser un indicador de que las culebras utilizan respiración anaerobia para gastar la menor cantidad de energía posible (Nagy *et al.*, 1999).

El valor teórico del parámetro B es bastante amplio, lo cual nos permitiría adaptar los resultados experimentales para ajustar el modelo. Si existiera la posibilidad de que las culebras tuvieran un recorrido mucho más largo y no presentaran signos de cansancio, la velocidad se mantendría constante dentro del intervalo que se propone, como se observó durante los experimentos. El intervalo de posibles valores del parámetro B es amplio, pero se puede reducir según las velocidades mínimas y máximas que presenten cada una de las especies de las culebras; en este caso, sería 255 a 608 mm/s para *T. melanogaster* y de 231 a 695 mm/s para *T. eques*, donde se aseguraría la existencia de los biones.

La especie *T. melanogaster* presentó una disminución en los puntos de contacto mientras la velocidad aumenta; sin embargo, la longitud y amplitud de onda permanecieron casi constantes. Se encontró que la fórmula para el modelo solitónico tipo bion, se aplica para la locomoción de huida de ambas especies. El análisis teórico sobre estas materias será parte de una investigación futura.

Finalmente, los resultados de estudios sobre entidades solitónicas poseen la capacidad de aplicaciones importantes en la ciencia y tecnología. La idea básica en el cual nos apoyamos es que la materia viva en su devenir en el espacio-tiempo realiza sus actividades usando principios de conservación, en este caso es una gran ventaja que durante el desplazamiento de seres vivos se pierda la menor cantidad de energía.

En prospectiva podemos decir que usando solitones como portadores de información y de energía, sería sumamente importante realizar el análisis del comportamiento dinámico de otras especies como los peces. También se tiene planeado aplicar los métodos teóricos no lineales a estructuras complejas como el movimiento, la marcha, el trote, las ondulaciones, etc. en otros seres vivos. Se ha observado el fenómeno de creación de dominios en materia viva: de forma espontánea surgen dominios cuyas paredes se pueden interpretar como solitones topológicos. En este sentido, dentro del contexto de estructuras de dominios aparece la posibilidad de estudiar a las partes morfológicamente agrupadas como dominios biológicos separados por solitones topológicos. Con estas consideraciones, se podrían implementar procesos de desarrollo tecnológico-científico con enormes ventajas económicas, como está sucediendo en Japón. Además, desde un punto de vista científico estas entidades podrían ser los precursores de varios procesos naturales que ocurren en la naturaleza y no solo ahí, sino también en el área de ciencias sociales, tales como economía, historia, sociología, etc.; por ende, la propagación de pulsos solitónicos llevan en sí el resorte mismo de la evolución *a posteriori* con la perspectiva de diversas aplicaciones tecnológicas.



Bibliografía

- Agüero, A. (2001). Soliton Theory: a Pedagogical Introduction. *Hadronic Journal Supplement*. 17(1), 241-333.
- Agüero, M., Fujioka, J y Ceciliano, L. (2002). La antisoleidad de la onda solitaria. *CIENCIA ergo-sum*, 9(2), 197-201.
- Arnold, S. J. (1988). Quantitative Genetics and Selection in Natural Populations: Microevolution of Vertebral Numbers in the Garter Snake *Thamnophis elegans*, en B. S. Weir, E. J. Eisen, M. M. Goodman y G. Namkoong (eds.), *Proceedings of the Second International Conference on Quantitative Genetics*, 619-636. Sinauer: Sunderland, MA.
- Cundall, D. (1987). Functional Morphology, en R. A Seigel, J. T. Collins y S. S. Novak. (eds), *Snake: Ecology and Evolutionary Biology*. New York: McGraw-Hill.

- Davydov, S. (1984). *Solitons in Molecular Systems*. Dumka, Kiev: Naukova.
- Finkler, M. S. y Claussen, D. L. (1999). Influence of Temperature, Body Size, and Interindividual Variation on Forced and Voluntary Swimming and Crawling Speeds in *Nerodia sipedon* and *Regina septemvittata*. *Journal of Herpetology*, 33 (1), 62-72.
- Ford, N. B. y Shuttlesworth, G. A. (1986). Effects of Variation in Food Intake on Locomotory Performance of Juvenile Garter Snakes. *Copeia*, 4, 999-1001
- Gans, C. (1970). How Snakes Move? *Scientific American*, 223, 82-96.
- Gans, C. (1975). Tetrapod Limblessness: Evolution and Functional Corollaries. *American Zoologist*, 15, 455-467.
- Garland, T. y Arnold, S. J. (1983). Effects of a Full Stomach on Locomotory Performance of Juvenile Garter Snakes (*Thamnophis elegans*). *Copeia*, 1092-1096.
- Gray, J. (1968). *Animal Locomotion*. London: William Clowes.
- Guess, (1957). *Tratados selectos sobre la naturaleza*. Moscow, Ac.
- Heckrotte, C. (1967). Relation of Body Temperature, Size and Crawling Speed of the Common Garter Snake, *Thamnophis sirtalis*. *Copeia*, 520-526.
- Hodgkin A. L. y Huxley, A. F. (1952). A Quantitative Description of Membrane Current and its Application to Conduction and Excitation in Nerve. *J. Physiol*, 117 (4), 500-544.
- Jayne, B. (1985). Swimming in Constricting (*Elaphe g. guttata*) and Nonconstricting (*Nerodia Fasciata Pictiventris*) Colubrid Snake. *Copeia*, 915-927.
- Jayne, B. C. y Bennett, A. F (1990). Selection on locomotor performance capacity in a natural population of garter snakes. *Evolution*, 44, 1204-1229.
- Kosevich, A. (2006). *The Crystal Lattice: Phonons, Solitons, Dislocations, Superlattices*. John Wiley & Sons.
- Makhankov, V. (1990). *Soliton, Phenomenology*. Kluwer Academic Publishers.
- Manjarrez, J. y Drummond, H. (1996). Temperature-Limited Activity in the Garter Snake *Thamnophis melanogaster* (colubridae). *Ethology*, 102, 146-156.
- Martin, J. (1996). Effects of Recent Feeding on Locomotor Performance of Juvenile *Psammodromus algirus* lizards. *Functional ecology*, 10, 390-395.
- Nagy, K. A., Girard, I. A. y Brown, T. K. (1999). Energetics of Free-Ranging Mammals, Reptiles, and Birds. *Annual review of nutrition*, 19, 247-77.
- Petoukhov, S. V. (1999). *Biosolitons-One Secret of Living Matter. The Bases of Solitonic Biology*. Moscow: GP Kimrskaja Typographia.
- Rossmann, D. A., Ford, N. B. y Seigel, R. A. (1996). *The Garter Snakes: Evolution and Ecology*. EE. UU.: University of Oklahoma Press. Norman.
- Secor, S. M. y Diamond, J. M. (2000). Evolution of Regulatory Responses to Feeding in Snakes. *Physiological and Biochemical Zoology*, 73, 123-141.
- Shine, R. y Shetty, S. (2001). Moving in Two Worlds: Aquatic and Terrestrial Locomotion in Sea Snakes (*Laticauda colubrina*, *Laticaudidae*). *Journal of Evolutionary Biology*, 14, 338-346.
- Zabusky, N. J. y Kruskal, M. D. (1965). Interaction of Solitons in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States. *Phys. Rev. Lett.*, 15, 240-243.



Título: Despertar
Técnica: acuarela/collage