

# Detector de parámetros temporales en señales sísmicas utilizando enlaces de radiofrecuencia multipunto

Aldo M. Bucio Ibarra\*, Israel Reyes Ramírez, Jorge Fonseca Campos

UPIITA-IPN, Ciudad de México

\*dracobucio@gmail.com

**Resumen** — Las ondas sísmicas están compuestas por varias componentes, tanto de frecuencia, distintas velocidades de propagación y amplitudes, particularmente, las ondas sísmicas primarias (ondas P) viajan a mayor velocidad que las ondas secundarias sísmicas (ondas S) que son más destructivas; esta propiedad permite detectar con antelación un sismo en progreso. Este trabajo consiste en estimar la velocidad de propagación de las ondas P, para realizar una detección de un sismo, apoyándose de un sistema de comunicaciones multipunto que transmite en la banda de ultra alta frecuencia (UHF por sus siglas en inglés), las señales de la onda sísmica por detectores en dos puntos distantes que transmiten los datos de sensores sísmicos mediante un transceptor hacia un tercer nodo central donde se procesan las señales de manera simultánea. Para ello, se estima el retardo temporal a través del cálculo de correlación cruzada, y con la información de distancia y tiempo de retraso entre los nodos se puede determinar la velocidad de propagación de la onda, con la finalidad de mejorar la detección temprana de eventos sísmicos.

**Palabras Clave** – Alarma sísmica, Enlace por radiofrecuencia, Red de sensores.

**Abstract** — Seismic waves are made up of several components, both of frequency, different propagation speeds and amplitudes, particularly, primary seismic waves (P waves) travel faster than secondary seismic waves (S waves) that are more destructive; This property allows an earthquake in progress to be detected in advance. This work consists of estimating the speed of propagation of P waves, to detect an earthquake, relying on a multipoint communications system that transmits in the Ultra-High Frequency band, the signals of the seismic wave by detectors at two distant points that transmit the data from seismic sensors through a transceiver to a third central node where the signals are processed simultaneously. To do this, the time delay is estimated through the cross-correlation calculation, and with the information on the distance and delay time between the nodes, the wave propagation speed can be determined, in order to improve the early detection of events seismic.

**Keywords** — Seismic alarm Radio frequency link, Sensor network.

cuales tienen focos localizados en las vecindades de la costa del Océano Pacífico. Esto se logra aprovechando características de las ondas P, como son: mayor velocidad de propagación que las de las ondas destructivas, baja intensidad y su aparición temprana antes de las ondas destructivas debido a la distancia entre la Ciudad de México y la zona epicentral [2]. El proyecto encabezado por el Fis. José Antonio Peralta fue únicamente de alcance interpolitécnico, y que para enviar la señal de alarma en diversas áreas del Instituto Politécnico Nacional (IPN) se implementó un sistema de comunicación vía internet.

El sistema de alarma creado en ESFM tiene algunas características que pueden ser mejoradas; la primera es con respecto a la detección de algunos eventos sísmicos, ya que este sistema no es capaz de diferenciar entre ondas primarias (ondas P) y ondas secundarias (ondas S), pues cuando las ondas primarias son de intensidad muy baja no son detectadas, este hecho causa que las ondas secundarias sean confundidas con ondas primarias provocando que la alarma se active innecesariamente; un sismo de esa magnitud no representa un peligro, ni tampoco pone en riesgo vidas, por lo que se requiere evaluar un parámetro que ayude a evitar esta situación. Otro punto importante por considerar es que la señal de alarma se transmite mediante Internet, así como algunos datos que son utilizados para desplegar gráficas en algunos puntos del IPN donde está presente el sistema, señalando que al existir una dependencia en servicios de internet eventualmente estos datos podrían sufrir de interrupciones, retardos o suspensión. En ese sentido, se pretende utilizar un canal dedicado para impedir en la medida de lo posible lo antes mencionado. Finalmente, el trabajo en cuestión fue desarrollado en un software bajo licencia de uso comercial (LabVIEW), lo que significa que hay necesidad de pagar por el uso de esa aplicación una vez caducado su periodo de prueba, pero el precio de la licencia no es económicamente viable, en consecuencia, se debe buscar un software libre de licencia para asegurar la operación del sistema para un largo periodo de tiempo.

## I. INTRODUCCIÓN

En la Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM) se ha desarrollado una alarma sísmica con base en la detección temprana de ondas P [1] que es capaz de alertar con algunas decenas de segundos de anticipación la aparición de la fase destructiva de sismos en la Ciudad de México, los

## II. METODOLOGÍA

La propuesta planteada para mejorar las debilidades del sistema antecesor de ESFM, es estimar la velocidad de propagación de las ondas P, pues, de esa manera se puede realizar una detección de un sismo independiente a la amplitud de las ondas. Para hallar este parámetro, se apoya de

un sistema de comunicaciones multipunto para transmitir mediante la banda UHF del espectro radioeléctrico, las señales generadas por una misma onda sísmica adquiridas por detectores en diferentes puntos de monitoreo distribuidos geográficamente tal como ilustra la Figura 1, para que posteriormente se realice un acondicionamiento de señal con el fin de discriminar que las perturbaciones adquiridas provengan de un fenómeno telúrico, y no de otra fuente que puede perturbar a los sismómetros; tras acondicionar a las señales adquiridas y asegurar que están dentro de la banda frecuencial de interés sísmica (0.1 -10 Hz), se procede a obtener un retardo temporal tras comparar la similitud de cada una de las señales en cuestión, a través de la operación de la correlación cruzada; al ser conocida la distancia y el tiempo de retraso entre los nodos detectores, se puede estimar la rapidez de propagación de la onda.

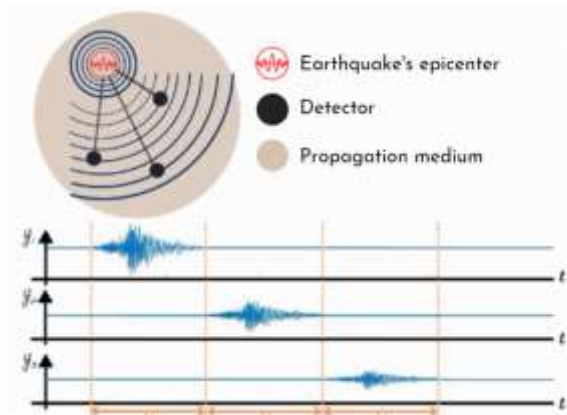


Fig. 1. Solución propuesta.

Si la rapidez detectada es cercana a los 7 km/s, significará que se trata de una onda P propagándose por los puntos de monitoreo y se deberá realizar un aviso de la detección de un sismo. Simultáneamente, se hace la presentación inmediata de los datos recabados en un nodo por medio de una interfaz gráfica sencilla e intuitiva, desarrollada en software libre de licencias para asegurar un largo periodo de operación, y no se vea comprometido a interrupciones o pausas a causa de una cuestión económica; y que sólo en caso de una detección de un evento se proceda a almacenar la información de las señales involucradas.

### Motivación

La idea de esta configuración está inspirada en el modelo biológico del escorpión de arena que exponen Brownell y Hemmen [3] [4], pues este, es capaz de determinar la dirección de una presa detectando la vibración causada por el movimiento en la arena con base en la diferencia de tiempo captada en cada uno de ocho sensores localizados en la configuración circular que conforman sus ocho patas (ver Figura 2).

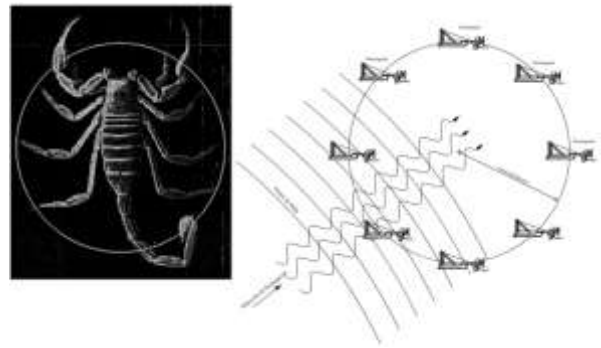


Fig. 2. Modelo biológico del cual se inspiró la propuesta de solución.

Este proyecto propone trabajar con sólo tres detectores, siendo la meta dejarlo como antecedente para trabajos futuros y sirva como base para lograr escalar a más nodos detectores como lo señala el modelo biológico, solo en caso de que sea necesario y represente una mejora significativa. Bajo esta idea, la metodología que sigue este trabajo es modular y consiste en desarrollar independientemente las siguientes unidades que conforman al sistema en general:

- Módulo de adquisición de datos.
- Módulo de transmisión de datos.
- Módulo de procesamiento de datos.

Después de conseguir que cada uno de los bloques funcionen correctamente, se proceda a la integración de todos los módulos, en la Figura 3 se muestra el diagrama general del sistema; todos los nodos transmisores son idénticos en cuestión a sus elementos físicos y operación, estos nodos están constituidos por los módulos de adquisición y transmisión de datos; el nodo receptor a diferencia del transmisor contiene un módulo de procesamiento de datos, además de sus propios módulos de adquisición y transmisión de datos.

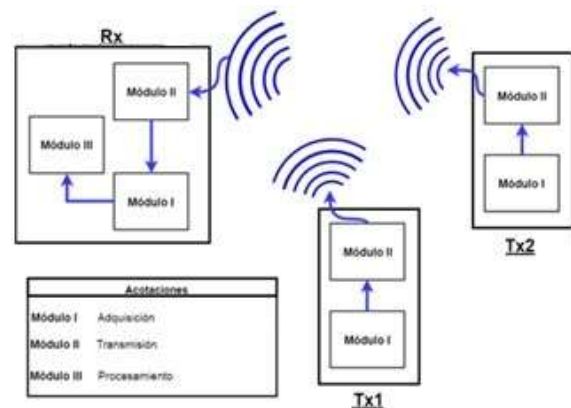


Fig. 3. Diagrama general del sistema.

### Módulo de adquisición de datos

Es el encargado de generar una señal eléctrica tras detectar las ondas sísmicas mediante un péndulo, construido

específicamente para entrar en resonancia con las frecuencias características de los sismos, esta señal atraviesa por una etapa de acondicionamiento que consiste prácticamente en eliminar armónicos frecuenciales ajenos al objeto de estudio. Finalmente, se digitaliza con un ADC que se comunica por un protocolo serie con una tarjeta de desarrollo, la cual, en este módulo se le llamará tarjeta de adquisición de datos.

#### *Módulo de transmisión de datos*

La función principal de este módulo es el envío y recepción de la información adquirida por el módulo de adquisición de datos, este usa un protocolo de comunicación punto a multipunto basado en la multiplexación por división de tiempo (TDMA) y frecuencia (FDMA), evitando colisiones de datos e interferencias con respecto a sus propios nodos y otros sistemas de comunicación por radiofrecuencia. En sus elementos físicos encontramos la integración de un transceptor con la tarjeta de desarrollo que se comunica por vía de un protocolo serie, un amplificador de potencia y una antena direccional que opera específicamente en la banda UHF

#### *Módulo de procesamiento de datos*

Luego de ser recibidas las señales eléctricas provenientes de los nodos transmisores, y asociadas con la adquirida por el péndulo del nodo receptor, se procede a aplicar la operación de correlación cruzada para hallar el retraso temporal entre las señales, utilizando la abscisa del punto máximo del resultado, ya que esta se interpreta como el retraso temporal de acuerdo con la máxima similitud entre las señales comparadas. Después de realizar cálculos, la información es presentada a través de una interfaz gráfica y almacenada en archivos, para su posterior análisis. El módulo de procesamiento sólo se encuentra en el nodo receptor.

### III. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

#### *Sismómetro*

Se construyó un péndulo tipo Lehman que fue diseñado para detectar vibraciones horizontales de la tierra debidas a eventos sísmicos (ver Figura 4) [5] en forma de señales de voltaje utilizando el principio de inducción magnética. Su operación se basa en la propiedad de mantener quieta la masa que está posicionada en un brazo casi horizontal en correspondencia con un movimiento transversal de la tierra; cuando las ondas sísmicas llegan al péndulo, el imán y la bobina se mueven uno con respecto al otro, con lo cual, se varía el flujo magnético a través de la bobina; la frecuencia de resonancia depende de la longitud del brazo y del ángulo de incidencia de la estructura con respecto al plano horizontal [5]. Las señales eléctricas generadas son posteriormente filtradas, digitalizadas y gestionadas por una tarjeta de adquisición de datos con objeto de ser transmitidas por el siguiente módulo



Fig. 4. Péndulo Lehman construido.

#### *Circuito de acondicionamiento de señal*

La señal de voltaje a la salida del embobinado del péndulo contiene componentes frecuenciales altos con respecto a los de interés desde el punto de vista sismológico (0.1 – 10 Hz), es decir, hay información irrelevante que debe ser despreciada, en consecuencia, la etapa de filtrado propuesta consiste en un filtro activo pasa-baja tipo Butterworth de tercer orden con ganancia unitaria y frecuencia de corte de 22 Hz. Sin embargo, antes debe tomarse en cuenta que al tratarse de una señal proveniente de un inductor es probable que exista una descarga, provocando picos repentinos de voltaje con una amplitud considerablemente alta con respecto a los niveles que el equipo electrónico digital es capaz de soportar, por lo que podrían dañar al equipo electrónico permanentemente. Para asegurar que los picos de voltaje transitorios serán eliminados se instalan diodos de marcha libre en la salida inmediata del solenoide. Al saber los valores del filtro, la configuración de los diodos de marcha libre y tener en consideración que la amplitud de la señal proveniente del solenoide es muy pequeña (en orden de milivolts), es importante resaltar que el circuito de acondicionamiento de señal lleva una etapa de amplificación en configuración diferencial antes de la etapa de filtrado, pero después del arreglo de diodos de marcha libre (ver Figura 5).



Fig. 5. Diagrama esquemático del circuito de acondicionamiento.

#### *Digitalización y transmisión de señal*

La digitalización de la señal se hizo mediante el módulo de la marca SparkFun, modelo ADS1115, este es un conversor analógico/digital de 16 bits de resolución y una tasa de muestreo de hasta 860 muestras por segundo, el mismo cuenta con la capacidad de comunicar sus datos hacia la

tarjeta de desarrollo vía protocolo I2C, dicha tarjeta es una modelo Teensy 4.0. Particularmente, la programación de la tarjeta de desarrollo realiza un muestreo cada 10 milisegundos, esta tasa de muestreo se consideraría un sobremuestreo con respecto a la frecuencia de Nyquist del propio fenómeno sísmico, siendo de 10 Hz, pero es elegida así para obtener un resultado útil por parte de los algoritmos de procesamiento, sin mermar el funcionamiento de los otros módulos del sistema en general a causa de la latencia. Posteriormente, la tarjeta de desarrollo utiliza el transceptor modelo CC1101 de la marca Texas Instrument mediante protocolo SPI para transmitir la señal previamente digitalizada en la banda UHF entre las frecuencias de 430-440 MHz, ya que según el cuadro nacional de atribución de frecuencias permite el uso de éstas bajo el título de aficionado (ver Apéndice).

### Antenas

Una de las intenciones más importantes del prototipo, es obtener la mayor diferencia temporal posible entre las señales sísmicas capturadas por los diferentes nodos distribuidos, con el afán de beneficiar a los algoritmos de detección; como consecuencia, la distancia de separación entre los nodos debe aumentar tanto como sea posible, es así, como se llega a la conclusión de utilizar una antena altamente direccional para transmitir información a largas distancias. Por lo tanto, el tipo de antena elegida es Yagi-Uda por sus características más particulares, como su patrón de radiación direccional, el orden de su ganancia, su operación dentro de la banda UHF y su relativa sencillez en su diseño para llevar a cabo su construcción comparada con otras antenas direccionales.

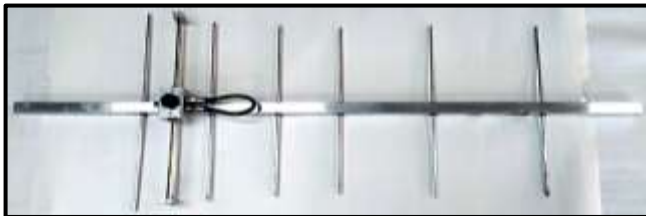


Fig. 6. Antena Yagi-Uda de 7 elementos construida.

### Protocolo de comunicación punto a multipunto

Se personalizó un protocolo de comunicación punto a multipunto que está orientado para evitar colisiones de datos e interferencias entre sus propios nodos e incluso otros sistemas de comunicaciones que utilicen radiofrecuencia. Con fin de conseguirlo, se hace uso de la técnica de multiplexación por división de frecuencia (FDMA) para fijar las señales portadoras de los nodos transmisores en dos diferentes frecuencias; teniendo como referencia el ancho de banda en el que funcionan las antenas, se decide poner la frecuencia de la señal portadora del nodo transmisor 1 (Tx1) a 433 MHz y al nodo transmisor 2 (Tx2) a 434 MHz, y la recepción de la información en nodo receptor estará conmutando entre estas dos frecuencias tomando turnos para

transmitir por el canal designado utilizando la técnica de multiplexación por división de tiempo (TDMA); también al añadir este protocolo se resuelven los problemas de sincronización que ocurren naturalmente en los relojes de las tarjetas de desarrollo localizadas en cada nodo, es decir, la información recibida estará sincronizada temporalmente, lo que cual es un factor fundamental en este trabajo para obtener un resultado útil en los algoritmos de procesamiento.

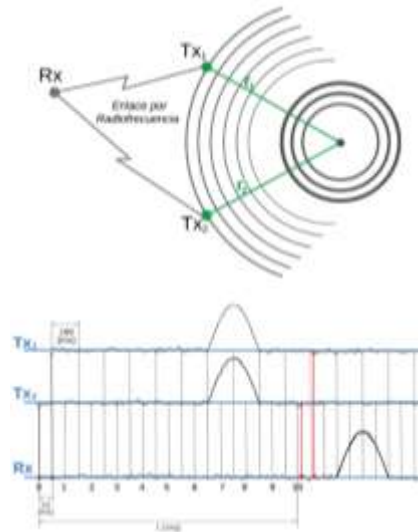


Fig. 7. Ejemplo de aplicación del protocolo de comunicación multipunto.

## IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

Por medio de señales controladas, se representó la información de perturbaciones en la interfaz gráfica desarrollada en Python 3 en un sistema operativo Linux Ubuntu 20.04 con afán de calcular un retraso temporal nulo y uno conocido; es así, que se propone utilizar dos fases para este experimento; la primera, consta de utilizar como sensores, ya no péndulos, sino fotorresistencias para monitorear el fenómeno lumínico del entorno, emulando a las señales que llegan al mismo tiempo; en la segunda, para garantizar que existan señales con un retraso controlado, se programa una tarjeta de desarrollo Teensy 4.0 como un generador de funciones de dos pulsos cuadrados para sustituir a los sensores y alimentar directamente a los nodos transmisores, cada uno con un pulso cuadrado diferente, con un retraso previamente sabido y controlado por código. Sabiendo que la rapidez de propagación de la luz se considera prácticamente instantánea, se colocan los nodos Tx1, Tx2 y Rx en un cuarto oscuro, después se activa el protocolo de comunicación para comenzar a monitorear y compartir información al nodo Rx; inicialmente todas las señales tenderán a ser constantes al no ser perturbadas por un fenómeno luminoso, es ahí donde se prende un foco, el cual, todos los nodos registrarán de manera simultánea, después se calcula la correlación cruzada entre dos señales, la Figura 8



expresa el éxito que se tuvo al medir el retraso nulo, dicho se verifica en la terminal de la izquierda.



Fig. 8. Prueba del protocolo de comunicación multipunto con fenómeno luminoso.

Así mismo, se continuó con la segunda fase del experimento, las salidas que entregaban los pulsos cuadrados del generador de funciones tenían un retardo controlado de 300 ms.

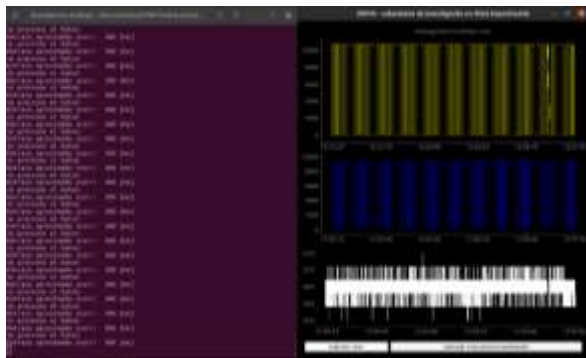


Fig. 9. Prueba del protocolo de comunicación multipunto con generador de funciones.

Cabe aclarar que el retraso entre señales fue medido con un osciloscopio con el fin de comprobar que los resultados obtenidos por el módulo de procesamiento de datos y que al igual que la anterior fase, se calcula con la correlación cruzada utilizando la interfaz gráfica tras recibir todos los paquetes de datos, generando un resultado totalmente esperado (ver Figura 9).

### V. CONCLUSIONES

El algoritmo basado en la operación de correlación cruzada es suficientemente robusto contra ruido y atenuación, y cumple la función de detectar los retrasos temporales de señales que se estén tratando en el orden de decenas de milisegundos de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas, tanto con y sin módulo de transmisión, hay que destacar que este algoritmo tiene mayor eficiencia siempre y cuando sea activado con alguna especie de disparador, por ejemplo, el uso de la transformada rápida de Fourier podría ser utilizada en un futuro para calcular energía de la señal en cuestión para convertirse en disparador automático,

verificando tanto localizarse dentro del rango de frecuencias importantes desde el punto de vista sísmológico como superar un umbral de energía que signifique un movimiento telúrico riesgoso, estudio del cual ya se tiene conocimiento por el trabajo antecesor. De manera general, es posible decir de manera preliminar que este trabajo tiene potencial para resolver los defectos que tiene la alarma sísmica de la ESFM, debido a que se usa un canal dedicado para transmitir información sin dependencia de servicios de Internet, el uso de un software libre de licencia para el desarrollo de una interfaz gráfica y la confianza de algoritmos que ayudarían a detectar el parámetro de rapidez para discriminar ondas p de ondas s en un evento sísmico.

### APÉNDICE

Se añade el Cuadro Nacional de atribución de frecuencias con el fin de resaltar que algunas frecuencias dentro del espectro radioeléctrico pueden estar resguardadas por otro tipo de aplicaciones, y por ende, no se pueden realizar radioenlaces de acuerdo con la IFT.



Rango de Frecuencias: 410 - 450 MHz

SERVICIOS: Bina		SERVICIO
Región 1	Región 2	
410 - 420 FAS MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión: BIFASAL, excepto-estacion 0.200		410 - 420 MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión: BIFASAL, excepto-estacion 0.200
420 - 430 FAS MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión:		420 - 430 MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión:
0.200 0.275 0.277	430 - 435 APLICACIONES RADIOLOCALIZACIÓN	430 - 435 MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión: 0.276 Alarma Radioemisión:
0.277 0.279 0.279 0.279 0.279 0.277	435 - 440 APLICACIONES RADIOLOCALIZACIÓN Radioemisión de 10.700 101 canales de 10.700	435 - 440 MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión: 0.276 Alarma Radioemisión:
0.279 0.279 0.277	440 - 445 APLICACIONES RADIOLOCALIZACIÓN Radioemisión de 10.700 101 canales de 10.700	440 - 445 MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión: 0.276 Alarma Radioemisión:
0.279 0.279 0.277	445 - 450 APLICACIONES RADIOLOCALIZACIÓN Radioemisión de 10.700 101 canales de 10.700	445 - 450 MÓVIL, salvo móvil personal Radioemisión: 0.276 Alarma Radioemisión:

Fig. 8. Cuadro Nacional de atribución de frecuencias

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Laboratorio de Investigación en Física Experimental de la UPIITA por la oportunidad de realizar el proyecto, así como al M. en C. Álvaro Gordillo Sol por su ayuda incondicional en el desarrollo de este.

## REFERENCIAS

- [1] J. A. Peralta, P. Reyes Lopez, M. A. Bautista Moedano y A. Rudolf Navarro, «Alarma sísmica en base a la detección temprana de ondas P».
- [2] J. A. Peralta, P. Reyes López, A. Godínez Muñoz y J. M. Lara Bauche, «Sistema de transmisión remota por Internet para alarma sísmica basada en la detección temprana de ondas P,» Ciudad de México, 2006.
- [3] P. H. Brownell y J. L. v. Hemmen., «How the Sand Scorpion Locates Its Prey,» de APS March 2000 Meeting, Minneapolis, 2000.
- [4] P. H. Brownell y J. L. v. Hemmen., «Vibrational Sensitivity and a Computational Theory for Prey-Localizing Behavior in Sand Scorpions,» American Zoologist, n° 41, pp. 1229-1240, 2001.
- [5] J. Walker, «Cómo construir un sencillo sismógrafo para registrar en casa los temblores de la tierra,» Investigación y ciencia, pp. 119-124, 1979.