

# DISEÑO DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE NODO CON SENSORES INALÁMBRICOS: UNA PROPUESTA PARA LOS INGENIEROS DE SISTEMAS COMPUTACIONALES

## DESIGN OF AN EXPERIMENTAL PROTOTYPE OF NODE WITH WIRELESS SENSORS: A PROPOSAL FOR ENGINEERS OF COMPUTED SYSTEMS

Christian Omar Picón Farah<sup>1</sup> ([christian.piconf@ug.edu.ec](mailto:christian.piconf@ug.edu.ec))

Ronald Alfredo Barriga Díaz<sup>2</sup> ([ronal.barrigad@ug.edu.ec](mailto:ronal.barrigad@ug.edu.ec))

Roberto Carlos Crespo Mendoza<sup>3</sup> ([roberto.crespom@ug.edu.ec](mailto:roberto.crespom@ug.edu.ec))

### RESUMEN

El presente artículo muestra el trabajo desarrollado por docentes y estudiantes de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. Forma parte de un proyecto de investigación que está encaminado a resolver un problema estructural en una de las vías de la ciudad afectada por los movimientos sísmicos. Dentro de las soluciones que se proponen en el proyecto se encuentra implementar un prototipo de red de sensores inalámbricos distribuidos a lo largo del puente, para su monitoreo en tiempo real. Ello permite identificar comportamientos inusuales en el lugar específico, determinar su ubicación exacta y aplicar medidas para solventar el problema. El sistema está basado principalmente en la recolección de datos por medio de sensores, acelerómetro y la transmisión de estos mediante enlaces inalámbricos. Finalmente, se construyó mediante lenguaje de programación un módulo para la adquisición de datos, para su análisis y visualización a través de una interfaz gráfica.

**PALABRAS CLAVES:** Wireless body area network, aprendizaje basado en problemas, sensores, web.

### ABSTRACT

This article shows the work developed by teachers and students of the Faculty of Mathematical and Physical Sciences of the University of Guayaquil, Ecuador. It is part of a research project that is aimed at solving a structural problem in one of the roads of the city affected by seismic movements. Among the solutions proposed in the project is to implement a prototype network of wireless sensors distributed

---

<sup>1</sup> Magister en Informática de Gestión y Nuevas Tecnologías, Universidad Técnica Federico Santa María. Ingeniero en Ciencias Empresariales con concentración en Sistemas de Información Gerencial, Universidad particular de Especialidades Espíritu Santo. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Ecuador.

<sup>2</sup> Magister en Sistemas de Información Gerencial (ESPOL). Ingeniero en Sistemas Computacionales, Universidad de Guayaquil. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Ecuador.

<sup>3</sup> Magister en Sistemas de Información Gerencial (ESPOL). Ingeniero en Computación (ESPOL). Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Ecuador.

along the bridge, for real-time monitoring. This allows to identify unusual behavior in the specific place, determine its exact location and apply measures to solve the problem. The system is based mainly on the collection of data by means of sensors, accelerometer and the transmission of these through wireless links. Finally, a module for the acquisition of data was constructed by programming language, for its analysis and visualization through a graphical interface.

**KEY WORDS:** Wireless body area network, problem based learning, sensors, web.

Con el paso de los años las estructuras civiles han causado un sin número de desastres al colapsar, lo cual ha despertado el interés de comunidades que se dedican a las investigaciones relacionadas con las técnicas de construcción y mantenimiento de dichas estructuras.

En el presente trabajo se expone el estudio para realizar el diseño de un prototipo experimental de nodo de sensores inalámbricos, el cual permite adquirir datos que serán procesados y visualizados para conocer el estado, comportamiento y firmeza del puente “Rafael Mendoza Avilés”, complejo vial del puente de la unidad nacional, Ecuador.

Este trabajo es de suma importancia, ya que el deterioro de los puentes se vuelve inevitable con el paso del tiempo y las afectaciones del clima, de tal manera que pierden su utilidad y beneficio para el ser humano y se convierten en un riesgo potencial para su integridad.

Ante esta situación es importante preguntar: ¿Existe alguna forma de conocer estos daños con el fin de prevenirlos, corregirlos y conocer el tiempo de vida útil que posee la estructura?

Para responder esta pregunta se ha desarrollado un área de investigación conocida actualmente como Motorización de Salud Estructural (Structural Health Monitoring o SHM), que se define como un proceso cuyo objetivo es proporcionar, con precisión y a tiempo, información concerniente a la condición y desempeño de una estructura, a través de diversos parámetros que indican el estado de esta, como lo consideran A. E. Aktan y K. A. Grimmelsman (1999); W. G. Meza, C. A. Eras e I. Torres (2017).

A su vez, dichos parámetros dependen de varios factores, como: el tipo de estructura, su propósito, los materiales de construcción, las condiciones ambientales presentes en su entorno, entre otros.

Al hacer una analogía, en el comportamiento humano el sistema nervioso detecta anomalías en el funcionamiento del cuerpo y envía dicha información al cerebro, luego el paciente acude al médico para ser examinado, obtener un diagnóstico y finalmente una cura.

De manera similar, lo mismo ocurre en una estructura monitoreada, ya que el objetivo del monitoreo es detectar comportamientos inusuales que indiquen el inadecuado funcionamiento de una estructura, esta detección de comportamientos inusuales requerirá una inspección, un diagnóstico y finalmente reparación, en opinión de B. Glisic y D. Inaudi (2007).

La investigación desarrollada en este artículo consistió en realizar el diseño de los nodos sensoriales con sus características y configuraciones, el análisis previo del lugar donde se desplegará la red sensorial para determinar la correcta ubicación de cada nodo, el diseño de la interfaz de usuario para visualizar los datos obtenidos y el procesamiento de las señales para determinar posibles daños o el buen estado en el que se encuentran los puentes.

El éxito del monitoreo depende, en gran medida, de la correcta interpretación de la información que se obtiene a través de los sensores. Es por ello que la selección del tipo de sensores, la ubicación de estos, la configuración del sistema de adquisición de datos (frecuencia de monitoreo) y el procesamiento de datos, son fundamentales para obtener información suficiente, pero no excesiva, para poder identificar cambios que pudieran estar asociados con condiciones de daño o falla.

Debido al volumen de datos que se pueden obtener es importante tener estrategias de análisis y reducción de estos, lo que permite calcular indicadores de desempeño que sirvan, a largo plazo, para identificar variaciones críticas.

El objetivo del presente artículo es monitorear la salud estructural del puente “Rafael Mendoza Avilés”, mediante el diseño de una red de sensores inalámbricos y el desarrollo de un prototipo, para adquirir datos en tiempo real, los que serán visualizados bajo una interfaz gráfica con el propósito de conocer el comportamiento de dicha estructura.

De manera general, la aparición de estructuras cada vez más esbeltas y robustas provoca que los periodos propios de oscilación sean más largos. Este factor hace que cargas que en otra época podían considerarse estáticas, adquieran un carácter dinámico y por tanto, cambien por completo la forma de analizar y calcular la estructura. En este sentido, el puente “Rafael Mendoza Avilés”, que actualmente no es monitoreado en tiempo real, presenta serios problemas que se evidencian, de alguna forma, solo cuando la situación es extrema, y muchas veces, costosa e irreversible.

De ahí que, se ha escogido este puente por ser considerado una estructura crítica y por su importancia para las personas, también debido a su relativa antigüedad y a la carga que soporta a diario. Esto unido a factores ambientales, en especial a la humedad constante a la que están sometidas las bases, hace que su vida útil se vea afectada. Por ello se propone este método de monitoreo, que se basa en la utilización de una red sensorial inalámbrica, junto al análisis de vibraciones para obtener parámetros que ayuden a conocer su estado y comportamiento.

**Materiales:** entre las partes que se usan en la implementación están:

**Vibraciones:** la medición y análisis se llevan a cabo en base a las vibraciones. En este sentido, P. N. Saavedra (2006), las determina como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación, por lo que constituye el principal instrumento para la medición y el análisis.

**Acelerómetro:** son sensores inerciales que miden la aceleración lineal en m/s sobre el eje de las X, Y y Z, según J. D. Bernal (2010).

**Arduino:** plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador, compuesto de una placa electrónica que posee 14 pines digitales (6 que se pueden usar como salidas PWM y 6 de entradas analógicas), un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

**Procesisng:** lenguaje de programación de código abierto basado en Java. Permite representar de manera gráfica los estados del dispositivo conectado, en este caso por medio de la conexión de arduino posibilita visualizar los datos obtenidos del acelerómetro.

**Módulos Xbee:** son módulos de radio frecuencia usados en conexiones a redes inalámbricas y aplicaciones de comunicaciones de datos. Son de pequeño tamaño y fácil programación.

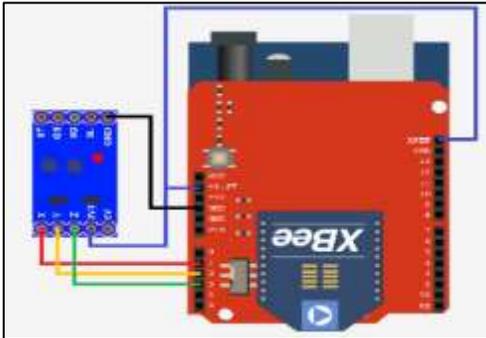
Según M. Obando y T. Pazmiño (2012), utiliza velocidades de transmisión de 20 Kbps y 250 Kbps, con un alcance de 100 metros, bajo el estándar 802.15.4 IEEE 802.15.4 o ZigBee, además, ofrece la capacidad de operar en tres bandas de frecuencias libres ISM, no sujetas a las regulaciones y reservación explícita de los canales:

- 868 MHz (banda libre europea), lo que permite un canal de 20 Kbps.
- 902-928 MHz, que por ser más ancha (26 MHz), permite 10 canales de 40 Kbps.
- 2.4-2.48 GHz, aún más ancha que la anterior (83.5 MHz), por lo que da la posibilidad de 16 canales de 250 Kbps.

## Diseño

Una vez precisados los elementos anteriores, se grafica el diseño y se detalla la conexión entre las partes que intervienen:

### Ilustración 1: Interconexión de prototipo



Elaborado por: W. Choez

## Pruebas Realizadas

- Prueba N°1: Pruebas de transmisión inalámbrica

Se realizaron pruebas de transmisión inalámbrica, que presentaron inconvenientes en la transmisión de datos, los cuales se adquieren de manera correcta en el nodo

emisor y se logran transferir sin contratiempos al momento de recibir los datos. El módulo XBee los recibe en formato ASCII, lo que altera el valor de los datos originales, además de presentar lentitud al momento de representarlos en la interfaz gráfica.

- Prueba N°2: Adquisición de datos localmente

Se realizaron pruebas de adquisición de datos en un nodo local, el cual resulta exitoso, asimismo se visualiza que los datos son graficados de manera exacta en cada uno de los ejes.

- Prueba N°3: Almacenamiento de datos en archivos (.txt)

Luego de realizar las pruebas de adquisición de datos, se verificó que estos se almacenaron correctamente en archivos (.txt), con un formato predeterminado que incluye la fecha y hora de almacenamiento.

### Ilustración 2: Almacenamiento de datos

```
linux-ly1z:/home/antonio/medicion # ls -lrt *.txt
-rw-r--r-- 1 root root 5781859 oct 30 17:57 ejes_20161030_17.txt
-rw-r--r-- 1 root root 3732225 oct 30 18:59 ejes_20161030_18.txt
-rw-r--r-- 1 root root 5177339 oct 30 19:59 ejes_20161030_19.txt
-rw-r--r-- 1 root root 2690363 oct 30 20:40 ejes_20161030_20.txt
-rw-r--r-- 1 root root 22837 oct 30 21:08 ejes_20161030_21.txt
-rw-r--r-- 1 root root 1231802 nov 1 11:55 ejes_2016111_11.txt
-rw-r--r-- 1 root root 2584576 nov 1 17:52 ejes_2016111_17.txt
-rw-r--r-- 1 root root 6368096 nov 9 17:58 ejes_2016119_17.txt
-rw-r--r-- 1 root root 3871954 nov 9 18:59 ejes_2016119_18.txt
-rw-r--r-- 1 root root 9903448 nov 9 19:30 ejes_2016119_19.txt
-rw-r--r-- 1 root root 222440 nov 16 07:55 ejes_20161116_7.txt
-rw-r--r-- 1 root root 3450314 nov 16 08:57 ejes_20161116_8.txt
-rw-r--r-- 1 root root 448694 nov 16 09:15 ejes_20161116_9.txt
-rw-r--r-- 1 root root 1251122 nov 16 19:34 ejes_20161116_19.txt
-rw-r--r-- 1 root root 388577 nov 16 20:38 ejes_20161116_20.txt
-rw-r--r-- 1 root root 801967 nov 16 23:59 ejes_20161116_23.txt
-rw-r--r-- 1 root root 56344 nov 17 00:22 ejes_20161117_0.txt
linux-ly1z:/home/antonio/medicion #
```

Elaborado por: W. Choez

### Prueba N°4: Visualización de datos almacenados

Se comprobó que los datos se almacenan correctamente con la hora exacta en la que fueron adquiridos.

### Ilustración 3: Visualización de datos almacenados

```
linux-ly1z:/home/antonio/medicion # cat ejes_20161030_21.txt
-----Nueva Lectura-----
577,581,677 21:8:20
576,580,680 21:8:20
576,579,681 21:8:20
577,579,681 21:8:20
576,579,680 21:8:20
577,579,680 21:8:20
577,579,680 21:8:20
577,578,681 21:8:20
576,580,681 21:8:20
577,580,680 21:8:20
576,580,681 21:8:20
576,579,680 21:8:20
576,580,679 21:8:20
577,579,680 21:8:20
576,579,680 21:8:20
577,579,681 21:8:20
577,579,681 21:8:20
```

Elaborado por: W. Choez

## Resultados

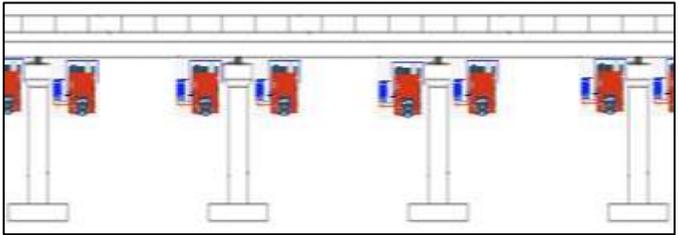
- Planteamiento del diseño para el monitoreo en tiempo real.

Este diseño se lleva a cabo para el puente “Rafael Mendoza Avilés” (primer y segundo puente), el cual tiene una longitud de 2,5 km, lo que permite la conexión de los tramos Guayaquil-La Puntilla-Durán, construidos desde 1970.

El primer puente sobre el río Daule posee 11 pilas y en el segundo puente sobre el río Babahoyo, 37 pilas. Dichas pilas se encuentran separadas unas de otras por 42 metros, según lo expuesto por J. Calero (2012).

Según la entrevista realizada al ingeniero civil P. A. Calderón, se puede determinar a las pilas y a la parte central de un puente como las más propensas a sufrir daños. Por ende, en base a esta investigación, los nodos sensoriales irán ubicados en cada pila para poder conocer su comportamiento en tiempo real y a lo largo de la pila se ubicarán dos nodos a cada extremo de esta. De este modo, el primer puente tendrá un total de 22 nodos sensoriales y el segundo puente un total de 74 nodos sensoriales.

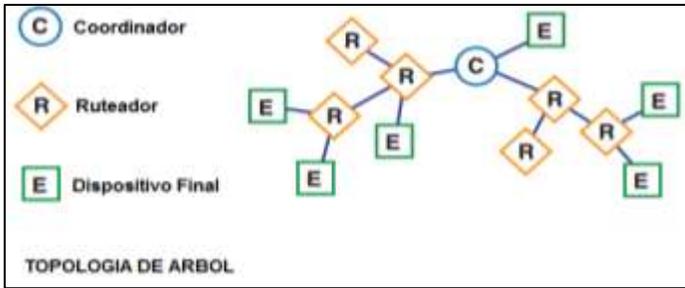
### Ilustración 4: Simulación de sensores en el puente



Elaborado por: M. G. Holguín

Para que los nodos sensoriales logren su funcionamiento deben tener una fuente de alimentación de 5 voltios, la que se recomienda sea en base a paneles solares para disminuir el costo en cableado e implementación de este. Para lograr la intercomunicación entre cada nodo, el módulo XBee XB24 permite el paso de la información de manera inalámbrica, la que se realiza bajo el estándar IEEE 802.15.4, con el protocolo ZigBee, al trabajar en la banda 2.4 GHz, a una tasa de velocidad de datos de 250 kbps, con un alcance de 100m aproximadamente en línea de vista.

### Ilustración 5: Diseño y topología de red



Elaborado por: W. Choez

- Implementación de prototipo

Una vez efectuada la implementación del nodo sensorial, se logró evidenciar que efectivamente se logran visualizar los valores deseados, para ello se toma como muestra las pruebas realizadas en el prototipo, lo que garantiza que el diseño planteado manifieste los resultados esperados.

### Ilustración 6: Prototipo de nodo sensorial



Elaborado por: G. Holguín

Las funciones del monitoreo del prototipo permiten observar los resultados de la estructura monitoreada en diferentes ejes. Al no presentarse ningún tipo de alteración en la estructura, el software que permite ver la gráfica monitoreada se presentará de manera lineal, sin movimientos en sus ejes.

### Ilustración 7: Monitoreo de los ejes sin movimiento



Elaborado por: G. Holguín

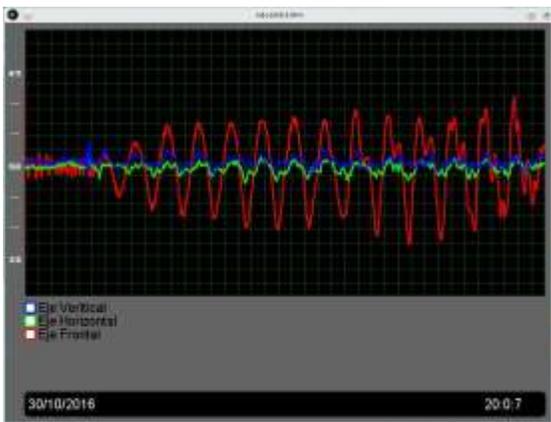
En caso de que exista algún tipo de movimiento en la estructura monitoreada, se presentará en sus diferentes ejes X, Y o Z.

### Ilustración 8: Movimiento en el eje Y



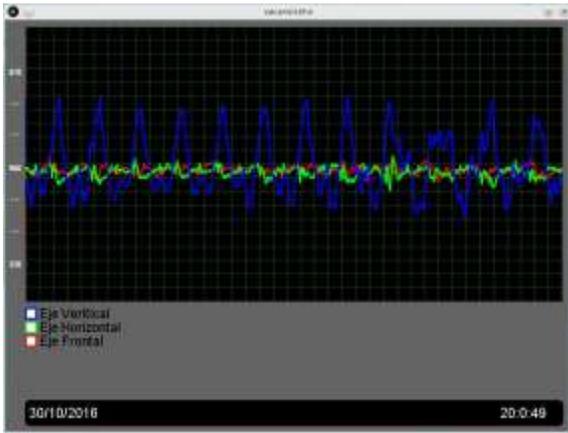
Elaborado por: G. Holguín

### Ilustración 9: Movimiento en el eje Z



Elaborado por: G. Holguín

### Ilustración 10: Movimiento en el eje X



Elaborado por: G. Holguín

### Interpretación de resultados

El acelerómetro MMA7361 posee la opción en su puerto de GSelect (GS) para ubicarse en:

- LOW: sensibilidad de +/-1.5G, con 800mv/G
- HIGH: sensibilidad de +/-6G con 260 mv/G

Para este proyecto se usará el puerto en GS=LOW en la que su salida está entre 0 y 3v en teoría. El Data Sheet del acelerómetro determina que para esta sensibilidad de +/- 1G la salida va entre 0.85v y 2,45v y que para la sensibilidad de 0G la salida vale 1,65v. El conversor Arduino representa valores de conversión entre 0 y 1024.

Por ejemplo:

Si el valor de referencia (VREF) es igual a 3v, entonces la conversión:

$$N = V_{in} \times 1023 / 3v3$$

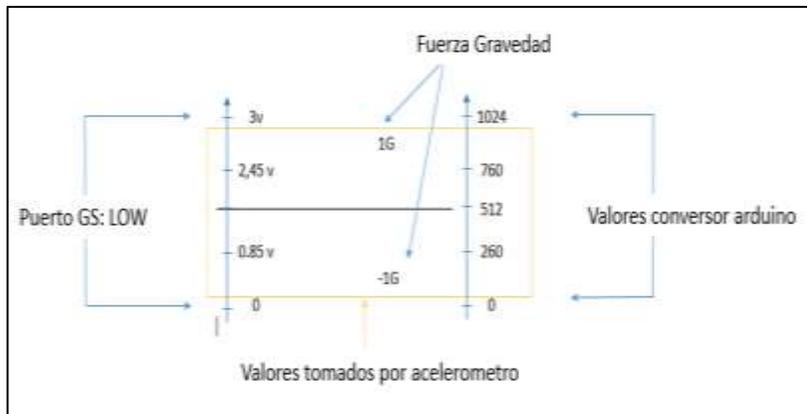
Donde,  $V_{in}$  es la señal a convertir y N la conversión de 0 a 1023.

Como  $V_{in}$  (entrada Ax de Arduino) es la salida del módulo sensor tenemos:

$$N = (0.8G + 1.65) \times 1023/3v3$$

Luego de lo expresado anteriormente los valores se obtienen de la siguiente tabla:

### Ilustración 11: Interpretación de valores acelerómetro



Elaborado por: G. Holguín

Los valores permitidos serían:

- 0G N=512
- +1G N=760
- -1G N=260

Al partir de los análisis desarrollados se cumple con el objetivo de monitorear la salud estructural del puente “Rafael Mendoza Avilés”, mediante el diseño de una red de sensores inalámbricos y el desarrollo de un prototipo, esto permite adquirir datos en tiempo real, los que serán visualizados bajo una interfaz gráfica para conocer el comportamiento de dicha estructura.

## REFERENCIAS

- Aktan, A. E. y Grimmelsman, K. A. (1999). The Role of NDE in Bridge Health Monitoring. *Nondestructive evaluation of bridges and highways HI*, S.B. Chase, ed., SPIE, 3587, pp. 2-15.
- Bernal, J. D. (2010). *Construcción de un sistema de control de voltaje y frecuencia del generador síncrono SIEMENS DM-SN/DG2240 Q4-R3 del laboratorio de máquinas eléctricas de la UPS, Sede Cuenca*. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/browse?type=author&value=Bernal+Iñiguez%2C+Juan...>
- Calero, J. (2012). *Ecuador a colores*. Recuperado de [http://www.ecuadoracolors.com/ed2012\\_feb/pages/nac\\_p07.html](http://www.ecuadoracolors.com/ed2012_feb/pages/nac_p07.html)
- Glisic, B. e Inaudi, D. (2007). *Introduction to Structural Health Monitoring*. Recuperado de [onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470517819.../summary](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470517819.../summary)
- Meza, W. G., Eras, C. A. y Torres, I. (2017). El uso de herramientas tecnológicas modernas en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Topografía. *Opuntia Brava*, 9(3). Recuperado de [opuntia.brava.ult.edu.cu](http://opuntia.brava.ult.edu.cu)

- Obando, M. y Pazmiño, T. (2012). *Diseño e implementación de un prototipo entrenador automático de ping pong controlado mediante comando de voz*. Riobamba, Chimborazo, Ecuador. Recuperado de [dspace.espoch.edu.ec](https://dspace.espoch.edu.ec) > ..>
- Saavedra, P. N. (2006). *Nuevas técnicas de mantenimiento predictivo mediante análisis de vibraciones aplicadas a máquinas críticas de la minería*. Recuperado de [w1.conicyt.cl/cgi-bin/proyecto\\_fondecyt.cgi?0\\_120031030\\_323](http://w1.conicyt.cl/cgi-bin/proyecto_fondecyt.cgi?0_120031030_323)