

# Las nuevas tecnologías para la medición de niveles de agua subterránea

*Dardo Guaraglia*<sup>1,2</sup>, *Leandro Rodríguez Capítulo*<sup>1,3</sup>, *Eduardo Kruse*<sup>1,3</sup>  
*y Jorge Pousa*<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería (UNLP) Av. 1 y 47 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) Av. 60 y 122 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina

Mail de contacto: [dguaragl@ing.unlp.edu.ar](mailto:dguaragl@ing.unlp.edu.ar)

---

## RESUMEN

La medición de niveles de aguas subterráneas representa un procedimiento frecuente en hidrogeología. En este trabajo se intenta concientizar acerca de los recaudos que se deberían tener, antes, durante y con posterioridad a la utilización de registradores de niveles con sensores de presión. Se han realizado experiencias bajo distintas condiciones y se han examinado sus resultados. Se utilizan en forma comparativa los datos obtenidos con 5 registradores de presión sometidos a similares variaciones. Se analizan las características de estos registradores y se identifican posibles fuentes de error. Teniendo en cuenta las condiciones de campo en las que se realizan estas mediciones, se describe la influencia de la presión atmosférica en la calidad de los datos, los efectos de los cambios de la temperatura, la estabilidad de la calibración y la recalibración. Se resalta la necesidad de verificación del comportamiento del instrumento, en relación a la aplicación a realizar, y la estimación cuantitativa del error en las mediciones.

Palabras clave: aguas subterráneas, registradores de nivel, sensores de presión, calibración, errores.

---

## ABSTRACT

Groundwater level measurements are a common practice in hydrogeology. This work intends the users to be aware about some matters that should be taken into account before, during and after the use of level loggers with pressure sensors. Experiments have been carried out under different conditions and their outcomes have been analyzed. Data from five pressure sensors subject to similar variations have been used comparatively. The characteristics of these sensors have been examined and possible sources of error have been identified. The influence of atmospheric pressure on data quality, the effect of temperature changes, calibration stability and recalibration are described taking into account the field conditions under which usual measurements are performed. The need for verifying the behavior of the instrument as regards the application to be carried out and the quantitative estimation of error are highlighted.

Keywords: groundwater, level loggers, pressure sensors, calibration, errors.

---

## Introducción

Una gran variedad de nuevos instrumentos electrónicos se encuentra al alcance de los profesionales e investigadores que efectúan actividades hidrogeológicas (Yilmaz et al., 2004; Guaraglia et al., 2009; Taniguchi et al., 2007; Devlin et al., 2009; Rusello et al., 2006). En los últimos años se ha avanzado en la exactitud con la que estos instrumentos miden, así como en la capacidad de almacenar, transmitir y procesar datos. Estos instrumentos han facilitado significativamente la recolección de información de campo. Lamentablemente, debido a que los usuarios carecen en general de una formación básica en electrónica, las ventajas que estas nuevas tecnologías

proporcionan, así como sus potencialidades y también sus limitaciones permanecen aún un tanto desconocidas.

La utilización adecuada de los instrumentos modernos requiere entender como éstos funcionan para evitar interpretaciones erróneas de los resultados. Es necesario que los operadores del instrumental posean los conocimientos básicos sobre los principios de su funcionamiento, ya que ello les permitirá juzgar si el instrumento está adecuadamente seleccionado y utilizado.

Con frecuencia los fabricantes de instrumentos tienen una tendencia a mostrar las virtudes de sus productos sin explicar claramente sus limitaciones. A veces, las especificaciones son presentadas de forma

tan complicada que sólo un experto puede descifrarlas. En esos casos, más que atender las indicaciones de los vendedores, es conveniente recurrir al apoyo de profesionales formados en la temática que puedan verificar que el comportamiento del instrumento es el deseado para determinada aplicación.

Por otra parte, los investigadores que utilizan estos instrumentos suelen tener una visión un tanto distorsionada sobre ellos, y confunden sus deseos acerca de cómo sería deseable que el instrumento funcionase, con su real funcionamiento. Ello puede conducir a errores en la recolección de datos o a una interpretación errónea de ciertos fenómenos.

La medición de niveles de aguas subterráneas representa uno de los procedimientos más frecuentes en la actividad hidrogeológica, ya que permite, entre otras cosas, la interpretación del flujo subterráneo, la cuantificación de las propiedades del acuífero y la calibración de modelos de flujo.

Este trabajo intenta plantear los recaudos que se deberían tener antes, durante y con posterioridad al uso de los instrumentos en aplicaciones hidrogeológicas. Para ello se ha realizado una experiencia en la cuál se analizaron las características de una herramienta muy utilizada en hidrogeología (registradores de nivel con sensores de presión), con el fin de identificar sus posibles fuentes de errores.

## **Metodología**

Se deseaba realizar un trabajo de investigación en el cuál era muy importante medir las variaciones en el nivel freático de varios pozos. Los avances en el campo de la electrónica y la computación permiten contar en la actualidad con instrumentos que facilitan la medición continua y el almacenamiento de este dato tan elemental. Para realizar esta tarea se contó con

registradores de nivel con sensores de presión que tenían poco uso. Como práctica habitual, antes de utilizar equipos que no han sido usados por un tiempo es conveniente efectuar algunas mediciones de valores conocidos, en un ambiente controlado, para asegurar su correcto funcionamiento antes de emplearlos en condiciones de campo.

Con el objeto de verificar la calidad de los datos que se podían obtener con estos registradores de nivel se efectuaron algunas pruebas simples que se describirán seguidamente. En total se utilizaron cinco registradores, cuyas especificaciones de fábrica son las siguientes:

Rango: 9 m

Resolución: 0.2 cm

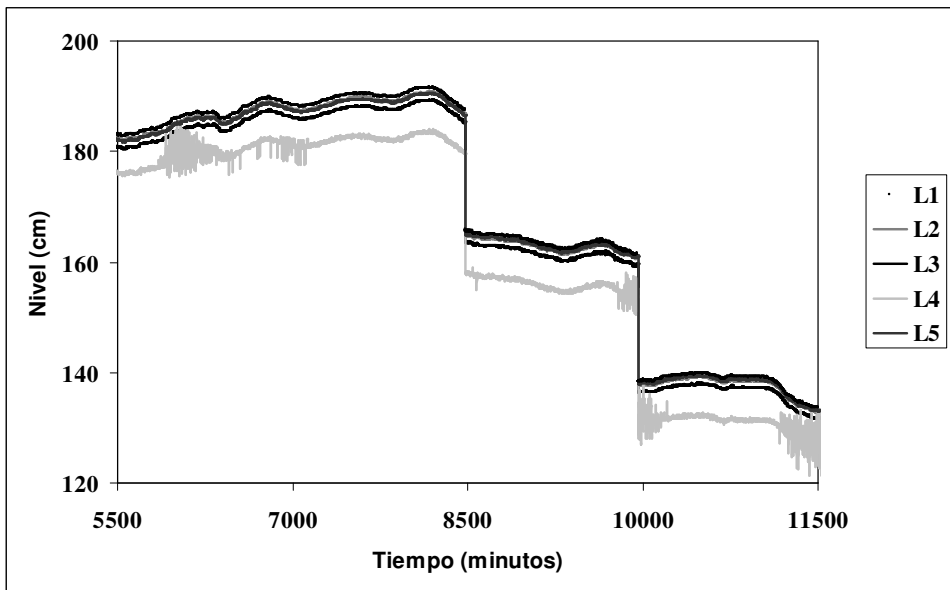
Exactitud: 0.1 % de la escala total.

Exactitud del reloj interno:  $\pm 1$  minuto al año.

Temperatura de operación: -20 a 80 °C

Se instalaron los equipos en una pileta de natación en la cual era posible cambiar la profundidad de los instrumentos en valores conocidos. Inicialmente se los colocó a 0.93 m de profundidad durante una semana, luego se cambió a 0.72 m durante un día y finalmente a 0.48 m durante otro día. Los datos registrados en los sensores denominados L1, L2, L3, L4 y L5 se pueden ver en la Figura 1. El gráfico muestra aproximadamente los últimos cuatro días de registros. Los cambios de profundidad se ven claramente a los 8.500 y 10.000 minutos.

En la Figura 1 se observa que las variaciones de presión atmosférica son similares para cuatro de los sensores ensayados. El sensor L4 se comporta bastante diferente del resto; no sólo mide valores menores, sino que además presenta oscilaciones rápidas que tienen una amplitud de hasta 0,08 m. Por lo tanto el sensor L4 debería descartarse para el trabajo de campo que se desea realizar debido a que las oscilaciones que presenta podrían enmascarar el fenómeno a medir.



**Figura 1.** Registro de los sensores en los cuatro últimos días de la experiencia. Se observan claramente las variaciones de la presión atmosférica y los cambios de profundidad.

## Resultados

### Importancia de la presión atmosférica

Aún cuándo la profundidad a la que se encontraban los sensores era constante, se reconocen ondulaciones en los registros que son debidas a los cambios de presión atmosférica. Se observa que la mayoría de los registros siguen en forma similar dichas variaciones. La diferencia entre el máximo y el mínimo de las ondulaciones durante los nueve días que duró el experimento fue de 0,2 m. Esto indica que si se deseara medir el nivel freático en un pozo, resultaría necesario descontar el efecto de la presión atmosférica, ya que ésta introduce cambios que podrían confundirse con variaciones reales del nivel.

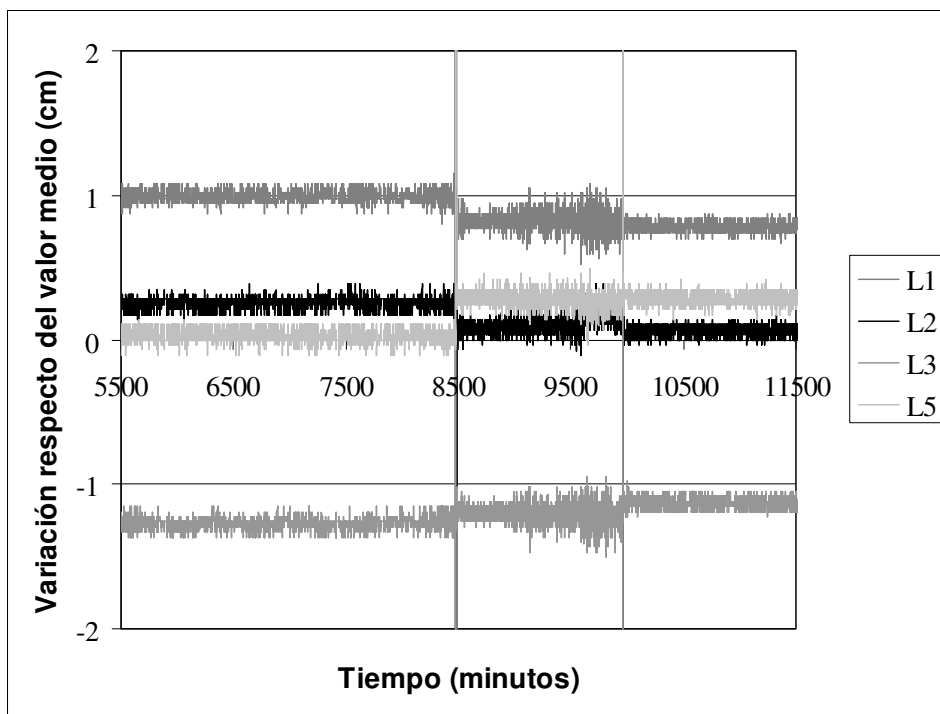
En la investigación en la que se desean utilizar los registradores de nivel, todos ellos estarán colocados a poca distancia unos de otros, por lo cual la presión atmosférica que soportarán será la misma. Además, para este estudio, sólo interesa la diferencia de nivel. Por lo tanto, si todos los sensores respondieran aproximadamente igual a la

presión atmosférica, bastaría con medir la diferencia de presión entre los equipos, ya que la presión atmosférica se sumaría a la presión hidrostática de igual manera en todos ellos.

### Calidad de los datos obtenidos

Con los datos registrados por los cuatro instrumentos que no presentan problemas de oscilaciones rápidas y que sólo detectan variaciones de la presión atmosférica, se calculó el valor medio de la presión atmosférica para cada instante de muestreo. Luego se procedió a restar al valor medido por cada sensor el valor medio calculado. El resultado se observa en la Figura 2.

Se puede apreciar que, al restar el valor medio, las variaciones debidas a la presión atmosférica se compensan adecuadamente. Esto significa que los sensores miden de manera relativamente similar y que se pueden realizar medidas diferenciales con una influencia moderada de las variaciones de presión atmosférica. Es importante destacar que se pueden efectuar las mediciones diferenciales, siempre que en el



**Figura 2.** Curvas del valor medido al que se le ha restado el valor medio de la presión atmosférica. Se observa que el ruido de fondo tiene un valor similar a la resolución indicada por el fabricante.

área en la que se encuentran todos los sensores la presión atmosférica sea la misma.

Los sensores presentan un cierto ruido de fondo que es de alrededor de 0,002 m y que corresponde a la resolución mencionada en las especificaciones del sensor. En algunos casos, el ruido de fondo llega a 0,004 m. Los sensores L2 y L5 presentan diferencias de alrededor de 0,004 m respecto del valor medio, representado por la línea horizontal correspondiente al cero de las ordenadas. El sensor L1 presenta una diferencia de hasta +0,01m y el L3 una diferencia de -0,012 m. Entonces, se puede concluir que tomando en forma indistinta cualquiera de estos sensores se podría medir en forma diferencial con un error máximo esperable de 0,022 m.

Un punto importante de subrayar es que en este ejemplo, la profundidad máxima a la que se probaron los sensores fue de 0,93 m, por lo tanto, el error máximo esperable de 0.022 m es solamente válido para este

rango. En general, se debe tomar como una práctica saludable efectuar los ensayos de verificación de funcionamiento de los instrumentos en todo el rango de utilización de ellos. Como se verá no es posible extrapolar este resultado a otros rangos.

En la Figura 2, también se aprecia que las diferencias cambian a los 8.500 y los 10.000 minutos, en coincidencia con el cambio de profundidad de los instrumentos. Esto indica que cada registrador responde en diferente forma al cambio de profundidad. Este comportamiento es característico de instrumentos que tienen diferencias en las constantes de calibración.

Si se supone que los instrumentos tienen una transferencia lineal, las transferencias tendrían pendientes y/u ordenadas al origen ligeramente diferente. Por lo tanto, para reducir los errores en las medidas, sería recomendable ajustar la constante de calibración de los registradores mediante un ensayo de laboratorio que abarque todo el rango de uso del instrumento.

Como se advirtió previamente, el error de calibración para todo el rango podría ser bastante mayor que el máximo esperable para 0,93 m que es de 0,022 m. Por ejemplo, si se considerase que las diferencias encontradas fueran debidas a diferentes ganancias (pendientes de cada transferencia) y los instrumentos se utilizaran para medir 9 m de columna de agua, probablemente los errores aumentarían proporcionalmente y llegarían a ser de alrededor de 0,2 m.

En particular, en los registradores ensayados, se pudo determinar que las diferencias en las transferencias se deben a discrepancias tanto en la pendiente como en el cero (ordenada al origen). Esto se pudo verificar estudiando el escalón registrado en el instante en el cuál se cambia la profundidad del sensor (a los 8.500 y 10.000 minutos aproximadamente). Esos cambios, al introducir una diferencia respecto del valor anterior, permiten evaluar la ganancia de los instrumentos, independientemente del error

en el cero. Es decir, las diferencias entre los escalones registrados por los equipos se deberían sólo a la diferencia en la pendiente de la transferencia. La Tabla 1 presenta el cambio en la profundidad a la se encuentran los instrumentos, las mediciones de cada uno de ellos y la ganancia (G), entendida como el cociente entre el cambio medido por el instrumento y el cambio real.

Si no hubiese habido cambio en el cero, ambas ganancias deberían ser iguales. Dado que el método utilizado para verificar el funcionamiento de los instrumentos es muy elemental, no es posible cuantificar con exactitud cuál es el error de cero y cuál el de pendiente para cada uno de los equipos. Para cuantificar mejor los errores es necesario realizar otro tipo de ensayo como se describirá más adelante.

**Tabla 1** Ganancia de cada instrumento ante los dos sucesivos cambios de profundidad

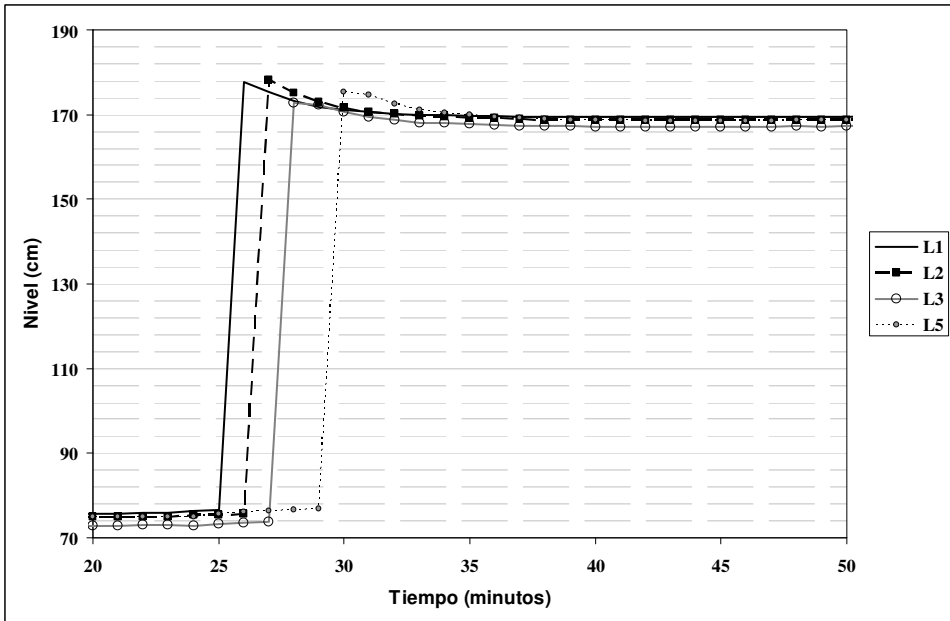
Tiempo (minutos)	8.500	10.000	G 1	G 2
Cambio real en la profundidad (m)	0,210	0,240		
Instrumento L1 (m)	0,220	0,231	1,047	0,963
Instrumento L2 (m)	0,220	0,232	1,047	0,965
Instrumento L3 (m)	0,217	0,230	1,034	0,957
Instrumento L5 (m)	0,215	0,231	1,026	0,960

### Efecto de los cambios de temperatura

Es interesante señalar que los cambios de profundidad medidos inicialmente al momento de sumergir los instrumentos no fueron tenidos en cuenta para el análisis porque antes de sumergirlos los instrumentos estaban a la temperatura del aire (25 °C) y fueron introducidos en el agua que tenía una temperatura inferior (11 °C). Entonces, el instrumento sufrió, simultáneamente con el cambio de presión, un cambio de temperatura que modificó la curva de transferencia (ganancia y corrimiento del cero). Como sucede con la mayoría de los

instrumentos un shock térmico modifica el comportamiento de los circuitos electrónicos.

En la Figura 3 se muestran las variaciones de nivel registradas por los instrumentos en el momento en el cuál se introducen al agua. Se advierte que se requieren diez minutos, luego de sumergidos los instrumentos, para que comiencen a estabilizar su registro de presión. Este período de tiempo es el mismo que tardan todos los elementos que constituyen el registrador en adoptar la nueva temperatura. Esto se puede verificar por medio de los registros de temperatura que realizan los mismos instrumentos.



**Figura 3.** Variaciones de nivel de los instrumentos en el momento de su inmersión en el agua.

Afortunadamente, la temperatura de un acuífero se mantiene bastante constante y no varía significativamente en períodos cortos, por lo cuál no sería necesario tener en cuenta los cambios de ganancia debido a la temperatura. Pero si se deseara medir niveles en un medio cuya temperatura variase ampliamente, por ejemplo en una laguna de escasa profundidad, habría que sumar a los errores ya señalados, los errores debidos a los cambios de temperatura.

Se advierte que para un cambio de nivel de aproximadamente 1 m, el cambio en el nivel medio, debido al efecto de la temperatura es del orden de 0,05 m, es decir 5 %.

### Estabilidad de la calibración

En la Figura 2 se observa que durante los 9 días que duró el ensayo, los sensores presentan mediciones bastante constantes. Esto demuestra que su calibración se mantiene estable con el transcurso del tiempo. Este comportamiento hace pensar que podría ser conveniente recalibrar los sensores para reducir los errores ya que existen muchas probabilidades de que la

calibración se mantenga constante durante el período de las mediciones de campo.

### Recalibración

Para encontrar las nuevas transferencias de los registradores de nivel (es decir, efectuar una curva de entrada / salida que permita reducir el error en la medición de los niveles, se podría calibrar cada instrumento en forma independiente, aplicando presiones (altura de columna de agua) conocidas, y registrando los valores medidos por cada uno de ellos.

Una forma más eficiente y más exacta para detectar diferencias en las transferencias es calibrar los instrumentos simultáneamente. Para eso, habría que conectar las entradas de presión de todos los sensores en paralelo, obteniendo una entrada común para todos ellos, y posteriormente, colocarlos en un mismo plano (por ejemplo sobre un piso liso). Luego se debería conectar la entrada común de los sensores a una manguera con agua, y para aplicar distintas presiones a los instrumentos, ir variando de a pasos el nivel del agua dentro de la manguera. Hay que tener especial precaución de que no queden burbujas en el agua, por lo cuál sería

conveniente utilizar una manguera transparente.

En cada paso se debe anotar el valor real del nivel de agua en la manguera y el valor medido por los sensores. Así se confecciona una tabla con varios puntos dentro del rango de utilización de los sensores (un número razonable es utilizar entre 5 y 10 puntos). Finalmente, con los valores de la tabla se pueden calcular los coeficientes de corrección para que todos los sensores tengan una curva similar.

Un detalle importante es que el ensayo para determinar la transferencia de los sensores debe hacerse en un tiempo suficientemente corto como para que las variaciones de presión atmosférica y de temperatura sean despreciables. También, es prudente que si las mediciones deben ser muy exactas las calibraciones se realicen pocos días antes de las pruebas de campo, ya que aquéllas podrían variar con el tiempo.

Por último, si se desea tener una mayor certeza respecto de la calidad de los datos, con posterioridad a las pruebas de campo, se deberían repetir las calibraciones. Si ellas se mantuviesen constantes, sería razonable estimar que los errores permanecieron dentro de lo esperado.

Si las calibraciones posteriores a las mediciones de campo fueran muy diferentes a las iniciales, se deberían descartar los datos. Si en cambio, fueran ligeramente diferentes, se podría suponer que fueron variando linealmente en el tiempo y efectuar una corrección lineal de los datos medidos.

## **Resumen de la información obtenida del ensayo**

Se desea efectuar un resumen de la información que se pudo obtener de este simple ensayo.

1) Se determinó que uno de los instrumentos no era apto para las mediciones de campo, evitando así la recolección de datos erróneos que generalmente dificultan el análisis de los fenómenos que se desean estudiar.

2) Se comprobó que si las variaciones de nivel que se desean medir fueran menores que 1 m, el error en una medición de diferencia de nivel realizada con dos sensores seleccionados al azar podría llegar a ser aproximadamente 0,02 m. Si en cambio se seleccionaran los instrumentos L2 y L5, el error sería menor de 0,005 m.

3) No es posible medir variaciones de nivel menores de 0,004 m debido al ruido de fondo introducido por la resolución de los instrumentos y los ruidos ambientales.

4) Para medir niveles absolutos de la capa freática es necesario descontar las variaciones de presión atmosférica. En los nueve días de ensayo introdujeron variaciones en los registros de presión de 0,2 m.

5) Cuatro de los cinco instrumentos ensayados miden en forma similar la variación de presión atmosférica. Por lo tanto, es posible efectuar medidas diferenciales si ambos sensores se encuentran a una distancia tal que estén sometidos a la misma presión atmosférica.

6) La calibración de los cuatro sensores seleccionados es ligeramente distinta y si se deseara disminuir los errores de medición habría que recalcular las transferencias de los instrumentos.

7) La calibración de los instrumentos se mantuvo estable durante el período de ensayo (nueve días).

8) Un cambio de temperatura de 14 °C en el instrumento produjo una variación en la medición de aproximadamente 5 %. Es decir, en aquellos casos en los cuales el medio sufra variaciones de temperatura, el error aumentará.

## **Conclusiones**

Se advierte que una herramienta tan sencilla como son los medidores de nivel con sensores de presión, puede generar errores por diversas causas. Si el investigador utiliza los instrumentos como cajas negras, de características perfectas e invariables en el tiempo, es posible que los datos recogidos no sean adecuados para los objetivos del estudio que pretende realizar. Incluso, en algunas aplicaciones, estos errores pueden conducir a conclusiones erróneas.

Realizar ciertos ensayos sencillos con los instrumentos, en condiciones controladas y conocidas, pueden ayudar a comprender la verdadera utilidad de los instrumentos. Una actitud inquisidora acerca de las prestaciones reales de los instrumentos puede evitar ulteriores inconvenientes.

Se resalta la necesidad de verificación del comportamiento de los instrumentos en relación a la aplicación, ya que de lo contrario podrían obtenerse resultados erróneos. Además, sería recomendable que, en las publicaciones de hidrogeología, las

estimaciones cuantitativas del error de las mediciones de los niveles de agua subterránea se convirtieran en una práctica habitual, especialmente en estudios de sus fluctuaciones en el tiempo.

## Referencias

- Yilmaz, M., Bernard, E. and Migliacio, P. 2004. Broadband Vibrating Quartz Pressure Sensors for Tsunameter and Other Oceanographic Applications, Oceans 2004. Kobe, Japan.
- Guaraglia D., Pousa, J., Kruse, E. and Mayosky, M. 2009. A rotary thermal probe for measuring groundwater velocity, Instrumentation Science and Technology, 37: 1-16.
- Taniguchi, M., Ishitobi, T., Burnett, W., and Wattayakorn, G. 2007. Evaluating ground water-sea water interactions via resistivity and seepage meters. Ground Water, 45(6): 729-735.
- Devlin J.F., Tsofilias, G., McGlashan, M. and Shilling, P. 2009. An inexpensive multilevel array of sensors for direct water velocity measurements. Ground Water Monitoring and Remediation, 29: 73-77.
- Rusello, P.J., Lohrmann, A., Siegel, E. and Maddux, T. 2006. Improvements in Acoustic Doppler Velocimetry. The 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), Sep 10 – Sep 13, Philadelphia, USA.