

## Medidor de súper turbidez: el LISST-AOBS combina turbidez óptica y acústica

YOGESH C AGRAWAL, HC POTTSMITH, D. DANA Y OLE A. MIKKELSEN

Sequoia Scientific, Inc.,  
2700 Richards Road, Bellevue, Washington, EE. UU. 98005  
yogi.agrawal@sequoiasci.com; Ole.mikkelsen@sequoiasci.com

### RESUMEN

La turbidez óptica es un método ampliamente utilizado para verificar la presencia de sólidos en el agua. La turbidez, como sustituta de la concentración de sólidos en suspensión (CSS), tiene una calibración que varía según el tamaño del sólido. En consecuencia, los medidores de turbidez requieren una calibración frecuente para unos sólidos específicos. El nuevo sensor acústico de retrodispersión LISST-ABS emplea una retrodispersión acústica de 8MHz para medir la CSS. Si bien tiene una respuesta casi constante de ~ 30-500 micras según el tamaño del sólido, también requiere calibración para sólidos que están por debajo de las ~ 30 micras de tamaño. Las dos tecnologías tienen tendencias opuestas en el cambio de sensibilidad según el tamaño del sólido, por ejemplo, Voltios / [mg/L]. La combinación de las dos medidas produce un súper medidor de turbidez: el LISST-AOBS. Este presenta una sensibilidad mínima a los cambios de tamaño del sólido y, por ende, rara vez requiere que se tenga que volver a calibrar.

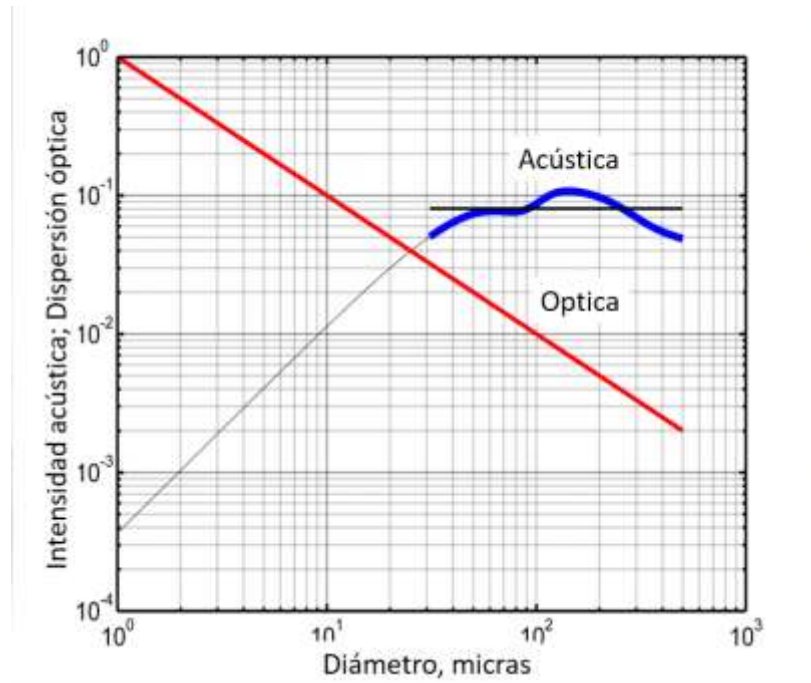
### 1. INTRODUCCIÓN

La turbidez óptica ha sido un método de medición predilecto para la verificación de la presencia de sólidos. Es simple, ya que produce un único resultado a partir del cual se puede calibrar. Esto implica la medición de la luz dispersada por partículas en una dirección elegida, p. ej., retrodispersión o dispersión lateral, entre otros. Sin embargo, esta turbidez generalmente se expresa en unidades UNT o UFT, que son unidades de aparente 'turbiedad'. Estas no corresponden a la concentración de sólidos en suspensión (CSS). A partir de la turbidez medida, se debe calibrar el dispositivo para determinar la CSS. Esta calibración depende del tamaño de los sólidos. En consecuencia, cada medidor de turbidez se debe calibrar según el tamaño específico de los sólidos presentes en el sitio de medición. Si el tamaño del sólido cambia, la calibración, por su parte, lo debe hacer también. ¿Y dónde, en la naturaleza, se encuentra una distribución fija del tamaño del sólido en el espacio o el tiempo?

La dependencia del tamaño del sólido de los medidores de turbidez varía según  $1/d$  (diámetro); es decir, por ejemplo, los sólidos de un tamaño de 15 micras producen señales de turbidez 10 veces más fuertes en comparación con los sólidos de 150 micras (p. ej., Sutherland et al., 2000). Estos tamaños son a menudo típicos del rango que se observa en sistemas fluviales; los tamaños más finos ocupan la columna completa de agua del río, los tamaños más gruesos suelen ser la carga resuspendida. En efecto, los medidores de turbidez a menudo no perciben los tamaños más gruesos, dando así la apariencia errónea de una columna de agua bien mezclada (Laguione et al., 2007).

En contraste, el LISST-ABS, un nuevo instrumento de retrodispersión acústica de alta frecuencia de 8MHz fabricado por Sequoia Scientific, Inc. de Bellevue, Washington (EE. UU.), tiene un mejor desempeño. Su sensibilidad para sólidos de ~ 30 a 500 micras es bastante constante. Sin embargo, para sólidos que están por debajo del tamaño de 30 micras, la sensibilidad disminuye rápidamente a medida que disminuye el tamaño del sólido. En efecto, la tendencia del cambio de sensibilidad según el tamaño del sólido para la turbidez óptica es opuesta a la de la turbidez acústica. Esto se muestra en la Figura 1.

Tenga en cuenta las tendencias opuestas de las dos tecnologías y también que el LISST-ABS tiene una sensibilidad casi constante de ~ 30 - 500 micras de tamaño del sólido, en la que la sensibilidad óptica cambia en un *factor de 16*.



**Figura 1:** Dispersión característica por volumen de sólidos para sensores ópticos de retrodispersión (OBS, por sus siglas en inglés) y el LISST-ABS, un sensor acústico de retrodispersión (ABS, por sus siglas en inglés) de 8MHz.

## 2. EL SÚPER SENSOR DE TURBIDEZ LISST-AOBS

El concepto de Súper Turbidez implica una suma ponderada de la señal de turbidez óptica  $CSS_O$  con el indicador de  $CSS_A$  del LISST-ABS. Para tal fin, se calcula un factor de peso para que la suma de  $CSS_A + \gamma CSS_O$  tenga la menor varianza en función del tamaño del sólido. En otras palabras,  $\gamma$  es la solución para:

$$\delta/\delta\gamma [CSS_A + \gamma CSS_O]^2 / < CSS_A + \gamma CSS_O > = 0$$

Para derivar la solución a este requisito, comenzamos con la señal combinada  $s$ , como la suma de la intensidad óptica y acústica, respectivamente, de modo que:

$$s = \alpha M/d + \beta f^2 M/d \quad (1)$$

donde las letras griegas  $\alpha$  y  $\beta$  son simplemente algunas constantes de calibración,  $M$  es la concentración de masa,  $d$  es el diámetro del sólido y  $f$  es un *factor de forma* acústica [Thorne y Hanes, 2002]. El factor de forma es una función del tamaño del sólido y  $f^2$  es la contrapartida acústica de la eficiencia de dispersión óptica  $\sigma$ .

En una dispersión de múltiples tamaños, lo anterior se vuelve:

$$s = \sum_i [\alpha / d_i + \beta f_i^2 / d_i] M_i \quad (2)$$

Como deseamos una sensibilidad uniforme para todos los tamaños, la forma deseada es:

$$s = C \sum M_i \quad (3)$$

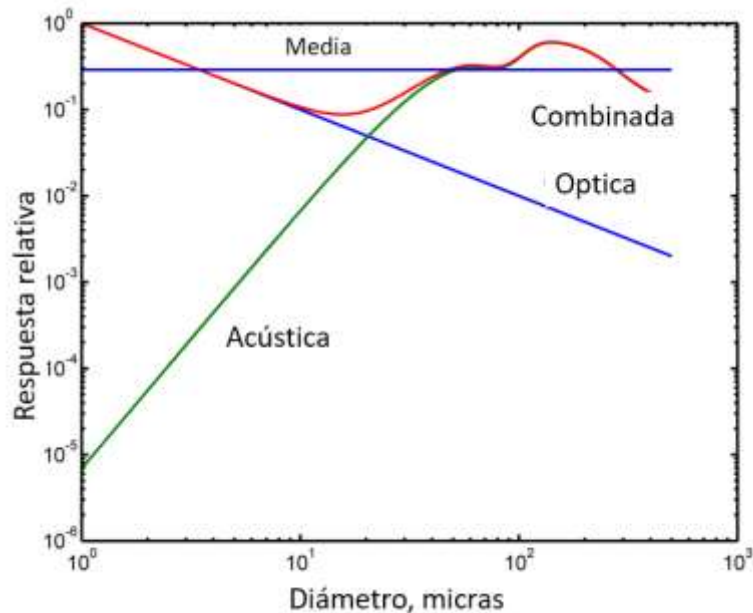
En otras palabras, la cantidad entre corchetes en la ecuación (2) debe llevarse a un valor constante o lo más cercano posible a un valor constante. Esto se logra reescribiendo primero la ecuación 2, introduciendo un factor  $\gamma$  para dar peso relativo a uno de los dos indicadores, así:

$$s \sim \sum_i [1 / d_i + \gamma f_i^2 / d_i] \quad (4)$$

El factor de peso  $\gamma$  minimiza la varianza de la cantidad entre corchetes de la ecuación (4), normalizada por el valor de su media  $\langle s \rangle$ , es decir,

$$[\delta s / \delta \gamma]^2 / \langle s \rangle = 0; \quad (5)$$

La realización de esta optimización lleva a este simple resultado: igualar la respuesta de la *intensidad* óptica y acústica con partículas de 30 micras (intersección de 'acústica' y 'óptica') y luego simplemente agregar los dos resultados (negro, flecha). Esta es el resultado que se muestra en la Figura 2. Ahora se ve que el resultado combinado varía dentro de un factor de 2 de la media (magenta), en todo el rango de tamaño de entre 3-500 micras.



**Figura 2:** Respuesta acústica, óptica y combinada del sensor de súper turbidez AOBs ( $V / [mg/L]$ ) en sólidos de diámetro variable de 3 a 500 micras. La respuesta media se muestra como la línea horizontal

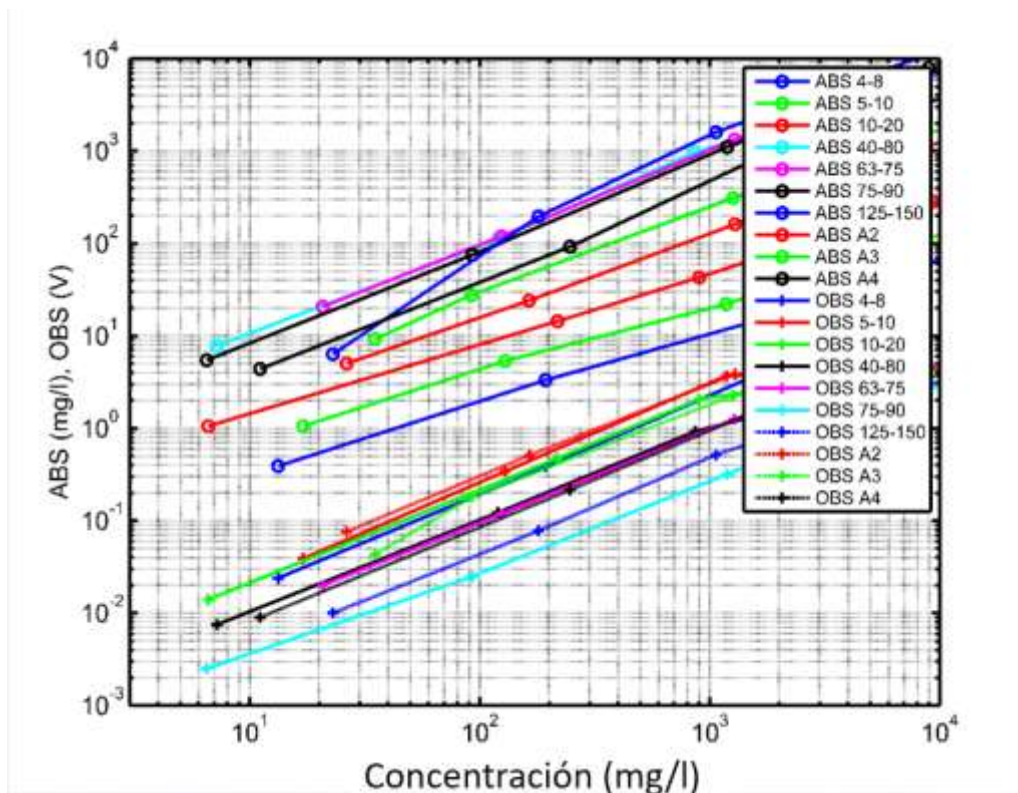
magenta. Tenga en cuenta que la respuesta combinada (negro) varía menos que un factor de 2 de la media en todo el rango de tamaño.

### 3. VERIFICACIÓN EN LABORATORIO

La implementación real de esta idea requiere la simple tarea de medir la respuesta de un sensor de dispersión óptica y el LISST-ABS a 30 micras para determinar el factor  $\gamma$  que los iguala a un tamaño del sólido de 30  $\mu\text{m}$ . De allí en adelante, para cualquier distribución de un tamaño dentro del rango de 3:500  $\mu\text{m}$  la sensibilidad combinada no variará en más de un factor de  $\sim 2$ .

Pese a que un factor de variación 2 en la sensibilidad parezca mucho, el beneficio de todo este trabajo reside en contrastarlo con un factor de variación 500 en el sensor óptico y un factor similar para señales acústicas en el rango de tamaño de sólido de 1 a 500 micras. Solo los métodos de difracción láser lo hacen de una mejor manera.

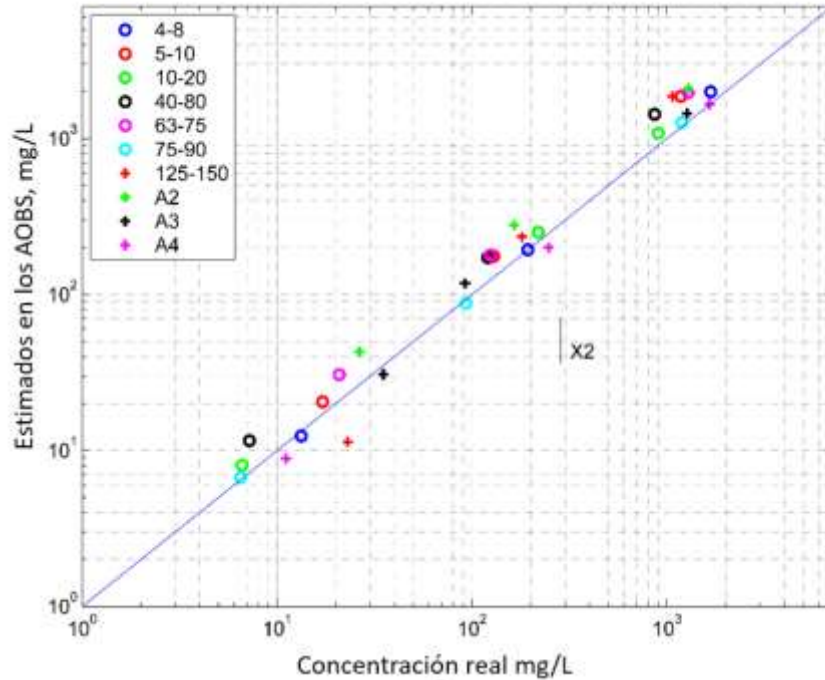
Para la verificación, medimos la respuesta de un rango de sólidos de tamaño fino, junto con la respuesta a los sólidos de distribución de tamaño grueso. La Figura 3 muestra las respuestas obtenidas vs. los estándares en un rango de concentraciones, de sensores individuales para un rango de sólidos de tamaño fino de 4-8 micras a 125-150 y para polidispersiones A2, A3 y A4 suministradas por *Powder Technology, Inc.* de Colorado, Estados Unidos.



**Figura 3:** Datos de calibración para el LISST-ABS (grupo superior, círculos), donde los tamaños aumentan de abajo hacia arriba, y otro medidor de turbidez (grupo inferior, cruces), los tamaños disminuyen de abajo hacia arriba. Los datos muestran una sensibilidad en el ABS casi idéntica para los tamaños más gruesos, 40-80, 63-75, 75-90 y

125-150 micras. La sensibilidad es menor para los sólidos finos de 4-8, 5-10 y 10-20 micras. La tendencia se invierte para la turbidez óptica, es decir, la sensibilidad es menor para los sólidos gruesos.

La Figura 3 muestra los resultados para un rango de concentración dada de CSS en la muestra. Como se muestra en la Figura 2, los datos confirman la sensibilidad significativamente menor de la acústica para los sólidos más finos dentro de la experimentación. La respuesta óptica generalmente sigue la forma  $1 / \text{diámetro}$ .



**Figura 4:** Resultado del sensor combinado de súper turbidez LISST-AOBS en una amplia gama de tamaños de sólidos y distribuciones de tamaños. La barra vertical ('X2') representa un factor de 2. Se ve que la variabilidad del tamaño está dentro de un factor de 2 para todos los sólidos de la experimentación.

En la Figura 4, mostramos la respuesta combinada del LISST-AOBS para una suma ponderada como se explica en la Figura 2. Los 10 tipos de sólidos se interpolan en una sola curva de calibración. La variación de la línea 1:1 es menor a un factor de 2 en un rango de concentraciones de 3 décadas (factores de diez).

## CONCLUSIÓN

Los sensores de turbidez requirieron calibración mientras se medía la concentración de sólidos en suspensión debido a la sensibilidad al tamaño de la partícula. El sensor acústico LISST-ABS tiene una mejor respuesta para percibir sólidos gruesos, pero carece de sensibilidad para percibir sólidos finos. El sensor combinado Super Turbidity LISST-AOBS logra casi una independencia entre los cambios en la calibración y los cambios en el tamaño del sólido.

## **REFERENCIAS**

Laguionie, P., A. Crave y A. Jigore (2007): Velocity and suspended sediment concentration profiles in rivers: in situ measurements and flux modeling, En: River Basin Management IV, pp 335-343. WIT Transactions on Ecology and the Environment, v 104, pp. 335-343.  
<https://doi.org/10.2495/RM070321>.

Sutherland, T.F., Lane P.M., Amos C.L., y J. Downing (2000): The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels; Marine Geology 162 2000 587–597.

Thorne, P. D., Daniel M. Hanes (2002): A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes; Continental Shelf Research 22 (2002) 603–632