1. Objetivo

Establecer los lineamientos para la identificación de fuentes y estimación de incertidumbre de los métodos de ensayo y etapa de muestreo en aguas superficiales en el Grupo de Laboratorio de Calidad Ambiental (GLCA) del IDEAM dando cumplimiento a lo establecido en la norma ISO/IEC 17025:2017.

2. Alcance

Este instructivo aplica a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, incluido las mediciones in situ (pH, oxígeno disuelto, conductividad, y temperatura) del alcance de medición del GLCA, inicia con la identificación de las fuentes de incertidumbre y contempla criterios de incertidumbre tipo A, tipo B, estándar y expandida, documenta el cálculo y reporte de incertidumbre.

3. Definiciones

En el presente procedimiento se aplican las definiciones de la norma ISO 17000:2020 y del Vocabulario internacional de metrología (VIM), 2012: Conceptos fundamentales, generales y términos asociados.

- **Incertidumbre de medida:** Es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza dispersión de los valores que puedan atribuirse razonablemente al mesurando.
- **Mesurando:** Es la magnitud particular objeto de una medición, en análisis químico corresponde a la concentración de un analito.
- **Incertidumbre Combinada (Uc):** Es la estimación de la desviación estándar igual a la raíz de la varianza total obtenida por combinación de todos los componentes de la incertidumbre.
- **Incertidumbre Expandida (U):** Proporciona el intervalo en el cual el valor de la medida se encontrará con un alto nivel de confianza. Se obtiene por la

multiplicación de las incertidumbres estándar combinadas por un factor de cubrimiento por X que es el valor de la concentración del patrón o muestra calculada por el valor. El factor es basado en el nivel de confianza deseado. Para un nivel de confianza del 95%, k es 2 (valor crítico de t para el análisis de más de seis datos).

- **Errores sistemáticos:** Son errores relacionados con la forma en la que se utiliza el instrumento de medida. Se caracterizan por una desviación sistemática en relación con el valor verdadero; es decir, todas las medidas individuales son demasiado grandes o pequeñas. Un error sistemático positivo produce un valor central mayor que el valor verdadero y un error sistemático negativo da lugar a un valor central menor que el valor verdadero. Tanto los errores sistemáticos positivos como los negativos pueden afectar el resultado del análisis, con un efecto acumulativo que conduce a un error sistemático positivo o negativo neto.
- **Error tipo I (también llamado error alfa):** La probabilidad de determinar que un constituyente está presente cuando realmente está ausente.
- **Error tipo II (también llamado error beta):** La probabilidad de no detectar un constituyente que realmente está presente.
- **Incertidumbre:** Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mesurando, a partir de la información que se utiliza.
- **Duplicado de campo:** Muestra independiente recolectada en el mismo punto, bajo condiciones lo más homogéneas posibles, con el fin de evaluar la variabilidad del proceso de muestreo.
- **Incertidumbre por muestreo:** Componente de la incertidumbre total asociada a la variabilidad introducida durante la toma de muestra.

4. Siglas

- **GLCA:** Grupo de Laboratorio de Calidad Ambiental

- **RPD (Relative Percent Difference):** Diferencia porcentual relativa entre duplicados, utilizada como indicador de precisión del muestreo.
- **INM:** Instituto Nacional de Metrología

5. Documentos relacionados en el SGI

- SLC-I038 Instructivo de verificación y validación de método analíticos.
- SLC-F060 Plan e informe de validación y verificación de métodos analíticos.

6. Desarrollo de la actividad

6.1. Desarrollo

La estimación de incertidumbre es propia de cada uno de los ensayos dada su naturaleza y especificidad, esta estimación considera las contribuciones significativas que afectan el resultado y puede apoyarse en los datos obtenidos durante la verificación o validación del método, por lo que ambos procesos se encuentran estrechamente relacionados. En las siguientes secciones se ilustrará sobre la ejecución de cada una de las etapas, su importancia y la consolidación de la información en el formato SLC-F060.

6.1.1. Descripción del método

Esta actividad permite que el analista deje expresado el paso a paso del desarrollo del método de manera concisa y haciendo énfasis en las etapas más importantes de la medición, incluyendo, la preparación de la muestra, cantidades, y desempeño del método en términos de precisión, controles de calidad analítico, entre otros. Se sugiere que esta descripción no sea mayor de un párrafo y todo sea muy descriptivo.

6.1.2. Identificación del método

Esta actividad debe ejecutarse siempre y permite concluir si el método es directo o indirecto; un método directo es aquel que no tiene la necesidad de una curva

de calibración, estos métodos pueden ser aquellos como las gravimetrías, volumetrías, potenciometrías entre otros. Por otro lado; un método indirecto es aquel que emplea curva de calibración y requiere una regresión que involucra parámetros de regresión (pendiente e intercepto) para estimar la concentración, estos métodos pueden ser los cromatográficos, espectrofotométricos, espectrométricos entre otros. Esta información indicara si el método debe tener estimación de error por regresión o no para lo cual se debe hacer un cálculo adicional a los métodos directos.

6.1.3. Determinar el modelo matemático del método

Esta actividad permite establecer cuál es el modelo para la estimación del analito de una muestra, las variables de entrada, los factores de corrección, entre otros. En la tabla 1 se muestra ejemplos de modelos matemáticos según si es directo o indirecto.

Tabla 1. Modelo matemático según el método.

	Modelo matemático
Método directo	$solidos\ totales = \frac{(peso\ final\ cápsula - peso\ inicial * 1000) * 1000}{Volumen\ de\ muestra}$
Método indirecto	$Concentración\ Cd\ \frac{mg}{L} = \frac{Señal\ muestra - intercepto}{pendiente} \cdot \frac{Volumen\ final}{masa\ muestra}$

Fuente: Propia, 2026

Los modelos de la Tabla 1 describen matemáticamente para estimar el valor del mesurando o analito de interés, a partir de otros mesurando de entrada o estadísticos de prueba.

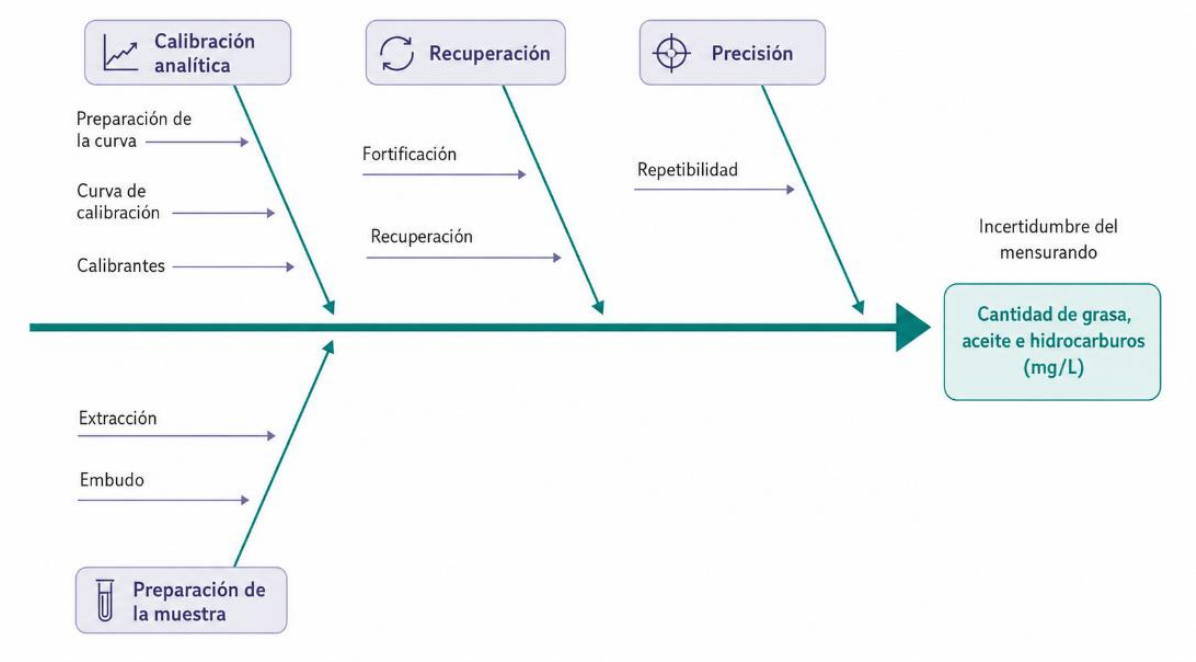
6.1.4. Identificación fuentes de variación

En esta etapa del proceso se debe hacer una inspección del modelo matemático para identificar las fuentes de error asociada a esos parámetros. Estos pueden ser de índole experimental o mediante certificado/información inclusive una misma variable puede tener diferentes fuentes de error. Siendo así, en el modelo de ejemplo de la Tabla 1 el peso final de la cápsula puede tener varias fuentes de error: **i)** error por tara de la balanza, **ii)** resolución de la balanza, **iii)** repetibilidad del valor pesado o en el ejemplo del método indirecto, se puede estimar errores asociados a la regresión lineal (estimación de la pendiente y el intercepto) que tiene como error **i)** el cuadrado medio del error por estimación lineal, **ii)** error por preparación de curva de calibración que a su vez tiene el error por uso de un material de referencia, material volumétrico y balanza.

Es de observar que esta etapa es fundamental para la estimación de incertidumbre y una buena identificación de fuentes permite tener un valor de incertidumbre mejor calculado y por lo tanto más real del ensayo de interés. Para esta identificación de fuentes se cuenta con la hoja "Fuentes de incertidumbre" en el formato SLC-F060, en la cual se muestra un diagrama conocido como espina de pescado, el cual permite agrupar y a su vez desenglobar aportes a un fenómeno dado que se ve afectado por todas las fuentes.

El objetivo de este diagrama es poder organizar las fuentes principales y sus aportantes, en la Figura 1 se muestra un ejemplo, en el cual se puede observar 4 fuentes principales (Calibración analítica, Recuperación, Precisión y Preparación de la muestra) la mayoría de los métodos indirectos tendrán estas fuentes principales y las secundarias si dependerá de la especificidad del método, es por esto que esta identificación de fuentes se recomienda que sea realizada por la persona que más conozca el método y su desempeño.

Figura 1. Identificación de fuentes de incertidumbre, diagrama Ishikawa.



Fuente: Propia, 2026

6.1.5. Categorizar los errores identificados

Dado que hay dos tipos de incertidumbre tipo a y tipo b las fuentes identificadas se deben categorizar de la siguiente forma:

- La incertidumbre Tipo A corresponde a aquella que se evalúa mediante análisis estadístico de datos experimentales obtenidos por medición repetida y se caracteriza por **i)** se basa en resultados experimentales, **ii)** utiliza herramientas estadísticas, **iii)** refleja la variabilidad aleatoria del proceso de medición y **iv)** está asociada principalmente a la precisión del método. Generalmente esta se calcula empleando la desviación estándar dividido la raíz cuadrada de n donde n es el número de réplicas de la población asociada a esta desviación estándar.
- La incertidumbre Tipo B corresponde a aquella evaluada mediante información distinta a mediciones repetidas, basada en conocimiento previo o fuentes

documentales, tales como certificados de calibración o de medición, esta no requiere análisis estadístico directo, se fundamenta en información técnica disponible, representa incertidumbres sistemáticas o estimadas.

Algunas fuentes típicas de incertidumbre tipo b son:

- Certificados de calibración de equipos.
- Incertidumbre de materiales de referencia certificados.
- Especificaciones del fabricante de instrumentos.
- Resolución de balanzas o equipos volumétricos.
- Experiencia previa o datos históricos validados.

Para su cálculo se debe tomar el valor de fuente de variación (incertidumbre tipo a o tipo b) y dividirlo por su tipo de distribución bien sea triangular o rectangular en la Tabla 2 se detalla los usos y denominador que debe ser usado para cada una de las distribuciones con una guía de la información de donde puede derivar esa distribución.

Tabla 2. Tipos de distribución

Tipo de distribución	Cuando se usa	Información disponible	Factor de división
Normal (Gaussiana)	Cuando el valor proviene de datos estadísticos o certificados con k conocido	Desviación estándar o incertidumbre expandida	k (factor de cobertura)
Rectangular (Uniforme)	Cuando solo se conocen límites máximos ±a y todos los valores son igualmente probables	Tolerancias, resolución de equipos, especificaciones del fabricante	√3
Triangular	Cuando los valores centrales son más probables que los extremos	Estimaciones técnicas con valor más probable conocido	√6

Tipo de distribución	Cuando se usa	Información disponible	Factor de división
Rectangular discreta (resolución digital)	Error debido al redondeo o último dígito de un equipo digital	Resolución instrumental	√12
Datos experimentales (Tipo A)	Mediciones repetidas	Resultados experimentales	√n

Fuente: Propia, 2026.

6.1.6. Estimar la incertidumbre de manera independiente para cada una de las fuentes

En este paso se deben calcular cada una de las incertidumbres, para esto se toma la fuente de variación identificada, bien sea una desviación estándar para el tipo a o el error por resolución y/o calibración para el tipo b y se divide por su distribución identificada en uno de los pasos anteriores, luego de esto se registran los valores y se documentan en la tabla del formato SLC-F060.

6.1.7. Combinación de fuentes de incertidumbre

En esta etapa se procede a realizar la combinación de todas las incertidumbres, para esto se recomienda que la incertidumbre esté en los términos de incertidumbre estándar (adimensional) o en porcentuales, para lo cual solo se debe volver la incertidumbre relativa al dividir por el valor nominal de la propiedad en ese error. Luego de esto se realiza la raíz cuadrada de la sumatoria de cuadrados de cada una de las fuentes y se obtiene el valor de la incertidumbre relativa combinada del método. El formato SLC-F060 Realiza esta combinación.

$$u_{total} = \sqrt{u_{fuente\,1}^2 + u_{fuente\,2}^2 + u_{fuente\,3}^2}$$

6.1.8. Cálculo de aportes

Luego de tener este cálculo se procede a determinar el aporte de cada una de las fuentes, esto con el propósito de establecer las variables más críticas del método y que debe ser controladas durante la medición, usualmente se espera que el mayor aporte sea de las fuentes experimentales provenientes de desviaciones estándar. El formato SLC-F060 realiza este cálculo y muestra de manera visual los aportes.

6.1.9. Expandir la incertidumbre

Finalmente, a la incertidumbre se le debe asignar un factor de cobertura, esto se realiza al multiplicar por un número tal que asegure un intervalo de confianza, para el GLCA se recomienda implementar un 95% de confianza con un factor de cobertura de 2 para todos aquellos ensayos que no se tenga la necesidad de implementar un factor de cobertura diferente, al igual que los otros cálculos el formato SLC-F060 realiza este cálculo, esta es la incertidumbre que se debe reportar.

6.1.10. Reporte de incertidumbre

Cuando sea necesario reportar el resultado acompañado de la incertidumbre de medición asociada, esta deberá estimarse y expresarse de acuerdo con los principios establecidos en la Guia para la estimación de incertidumbre (GUM) de la ISO/IEC. Cuando la incertidumbre disponible esté expresada de forma relativa, deberá convertirse a incertidumbre absoluta multiplicándola por el valor del resultado de medición. Para definir el número de cifras significativas, el resultado y su incertidumbre deberán expresarse de manera coherente, de modo que la incertidumbre corresponda a la misma posición decimal que la última cifra reportada del resultado. Por ejemplo, si el resultado se expresa sin cifras decimales, la incertidumbre deberá expresarse en unidades enteras, como **XX mg/L ± Z mg/L**; si el resultado se expresa con dos cifras decimales, la

incertidumbre deberá expresarse igualmente con dos cifras decimales, como **Y,YY mg/L ± 0,YY mg/L**.

6.2. Incertidumbre por muestreo

La estimación de la incertidumbre asociada al muestreo se realizará bajo un enfoque empírico (top-down), basado en la replicación del proceso completo de medición mediante duplicados de campo. Este enfoque permite capturar de manera integral las fuentes de variabilidad asociadas al muestreo, incluyendo:

- Heterogeneidad espacial y temporal del analito
- Variabilidad en la toma de muestra
- Efectos operacionales del personal
- Condiciones ambientales durante el muestreo

De acuerdo con la guía del Instituto Nacional de Metrología (INM), este enfoque experimental permite estimar directamente la contribución del muestreo sin necesidad de descomponer cada fuente individual de incertidumbre, siendo especialmente aplicable a matrices ambientales como aguas superficiales.

Se reconoce que la incertidumbre por muestreo es función directa de la representatividad de la muestra, por lo cual cualquier sesgo en la selección o recolección impactará directamente el resultado de medición.

El diseño del muestreo deberá garantizar que los duplicados:

- Sean muestras independientes, no submuestras.
- Representen el mismo volumen de control (misma masa de agua o punto hidráulico).
- Se obtengan bajo condiciones de repetibilidad operativa (mismo equipo, mismo operador, mismo método).

Consideraciones técnicas:

- El intervalo entre duplicados debe ser mínimo para evitar variabilidad temporal.
- Se debe evitar perturbación del cuerpo de agua (ej. Re-suspensión de sedimentos).

Para parámetros in situ:

- Se deben realizar mediciones independientes completas (no lecturas repetidas del mismo punto sin reiniciar el proceso).
- El número de duplicados debe ser estadísticamente suficiente para representar la variabilidad del sistema (recomendado ≥ 10 pares por parámetro para estimaciones robustas).

Este enfoque garantiza que la variabilidad observada incluya tanto la variabilidad del sistema como la del proceso de muestreo.

En concordancia con la guía del INM, se debe asegurar la trazabilidad metrológica del muestreo, registrando como mínimo:

- Plan y método de muestreo aplicado
- Identificación del punto y condiciones del cuerpo de agua
- Fecha, hora y condiciones ambientales
- Equipos utilizados y su estado de calibración
- Personal responsable

La documentación debe permitir reconstruir el proceso de muestreo y asociar cada resultado con sus condiciones de obtención, garantizando evidencia objetiva del origen de la incertidumbre.

Para cada par de duplicados se evaluará la variabilidad mediante indicadores de precisión:

- **Diferencia absoluta:**

$$d_i = X_{1i} - X_{2i}$$

- **Diferencia relativa porcentual (RPD):**

$$RPD_i(\%) = \frac{|\ X_{1i} - X_{2i}\ |}{\frac{X_{1i} + X_{2i}}{2}} \times 100$$

- **Varianza de duplicados:**

A partir de un conjunto de n duplicados:

$$s_d^2 = \frac{\sum(d_i - \bar{d})^2}{n-1}$$

Donde:

d_i: diferencia entre duplicados
$\bar{d}$: promedio de diferencias

- **Varianza de duplicados**

A partir de un conjunto de n duplicados:

$$s_d^2 = \frac{\sum(d_i - \bar{d})^2}{n-1}$$

Dónde:

d_i: diferencia entre duplicados
$\bar{d}$: promedio de diferencias

Este tratamiento permite cuantificar la dispersión atribuible al muestreo bajo condiciones reales de operación.

La incertidumbre estándar asociada al muestreo ($u_{muestreo}$)) se estima como:

$$u_{muestreo} = \frac{s_d}{\sqrt{2}}$$

Este factor se fundamenta en que la varianza observada en duplicados contiene la contribución de dos mediciones independientes.

Aspectos clave (según enfoque INM):

- Este valor integra simultáneamente la variabilidad del muestreo y parte del análisis.
- Si se desea separar la contribución analítica, se requiere un diseño experimental adicional (ej. replicados analíticos).

En la práctica ambiental, este enfoque es aceptado como estimación conservadora del muestreo.

La interpretación de los resultados debe considerar:

- Altos valores de RPD indican:
- Alta heterogeneidad del sistema
- Problemas en la técnica de muestreo
- Influencia de condiciones ambientales
- Para matrices como agua superficial:
- Parámetros como oxígeno disuelto pueden presentar alta variabilidad por dinámica hidráulica.
- Parámetros como pH tienden a menor variabilidad.
- El laboratorio deberá analizar tendencias y no solo valores individuales, con el fin de evaluar la estabilidad del proceso de muestreo.

6.3. Integración de la incertidumbre total

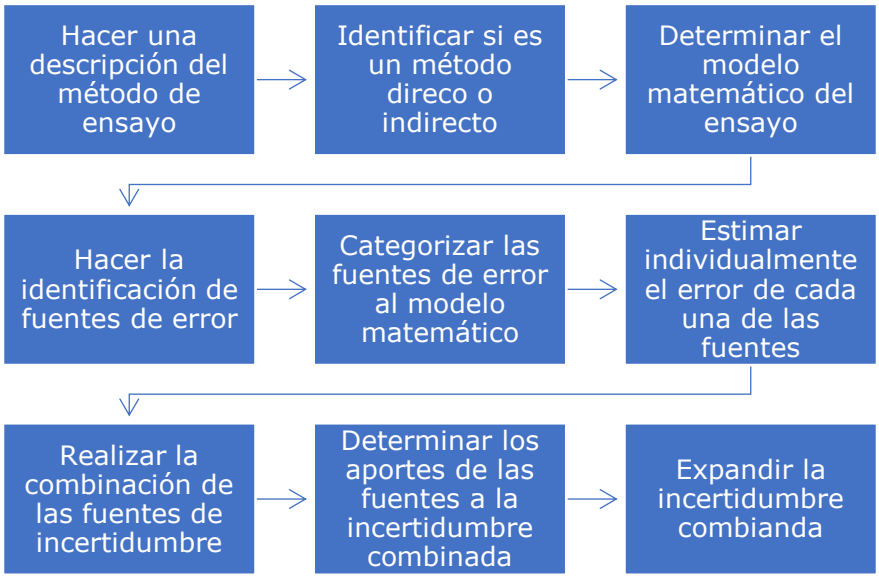
La incertidumbre por muestreo deberá integrarse, cuando aplique, con otros componentes (analítico, instrumental), mediante suma cuadrática:

$$u_{total} = \sqrt{u_{muestreo}^2 + u_{analitico}^2}$$

Es importante mencionar que esta combinación de incertidumbre se debe realizar en incertidumbres sin expandir y relativas (%) para que se facilite el uso de unidades

6.4. Diagrama

Figura 1. Diagrama de estimación de incertidumbre



Fuente: Propia, 2026

7. Documentos de referencia

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2005). *NTC-ISO/IEC 17000:2005: Evaluación de la conformidad. Vocabulario y principios generales*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2017). *NTC-ISO/IEC 17025:2017: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. ICONTEC.

JCGM. (2008). *Vocabulario internacional de metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)* (3.ª ed.). JCGM.

8. Control de cambios

Versión	Fecha	Descripción
01	03/12/2018	Creación del documento con base a la nueva estructura del SGI. Realizado por Carlos Martin Velásquez Martínez
02	21/10/2020	Nueva versión producto de la actualización de la documentación del Sistema Integrado de Gestión.
03	04/07/2025	Se actualiza el Formato de acuerdo con el memorando enviado por la OAP memorando 20251100097283 lineamientos para la actualización documental en el marco de la implementación del aplicativo suite visión. El código pasa de M-S-LC-I049 a SLC-I049.
04	20/10/2026	Se actualiza y reorganiza el instructivo para fortalecer la metodología de identificación, evaluación y estimación de la incertidumbre de medición de los métodos de ensayo del GLCA.