

Muestreo de aguas

Una guía técnica para garantizar la calidad



Aida Alejandra Guerrero de León
José de Jesús Bernal Casillas
Luis Alberto López Tejeda
Walter Ramírez Meda

Muestreo de aguas

Una guía técnica para garantizar la calidad



Muestreo de aguas

Una guía técnica para garantizar la calidad

Aida Alejandra Guerrero de León

José de Jesús Bernal Casillas

Luis Alberto López Tejeda

Walter Ramírez Meda



Muestreo de aguas: Una guía técnica para garantizar la calidad. **Autores:** Aida Alejandra Guerrero de León, José de Jesús Bernal Casillas, Luis Alberto López Tejeda y Walter Ramírez Meda—Jalisco, México. 2025.

202 p. 23 cm.

Primera edición

ISBN: 979-13-87837-86-0

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20257705>



D. R. © copyright 2025. Aida Alejandra Guerrero de León (Centro Universitario de Tonalá); José de Jesús Bernal Casillas (Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería); Luis Alberto López Tejeda (Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería); Walter Ramírez Meda (Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería)

Edición y corrección: **Astra ediciones**



Todos los contenidos de esta obra se comparten bajo la licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (**CC BY-NC-SA 4.0**). Esto implica que no está autorizado el uso comercial de la obra original ni de las eventuales obras derivadas, las cuales deberán distribuirse bajo la misma licencia que rige la obra original. No obstante, se permite a terceros compartir el contenido siempre y cuando se reconozca debidamente la autoría y la publicación original en esta editorial.

HECHO EN MÉXICO | MADE IN MEXICO

Agradecimientos

Al Dr. Marco Pérez Cisneros, rector del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), por su apoyo institucional en la publicación de este libro.

A la Dra. Ruth Padilla Muñoz, directora del Instituto Transdisciplinar de Investigación y Servicios (ITRANS), por su apoyo al fortalecimiento de la Unidad de Análisis Ambiental.

Al Dr. José Roberto Galaviz González, director de la División de Ingenierías de CUCEI, por su apoyo y gestión de recursos para la impresión del libro.

Al Dr. César Octavio Monzón, jefe del Departamento de Ingeniería de Proyectos, por el apoyo para el fortalecimiento del Laboratorio Centro de Estudios y Proyectos Ambientales (CEPA), el cual brinda servicios especializados en materia ambiental y calidad de agua. Así como al Cuerpo Académico CA-UdeG-622-Ingeniería Ambiental, del cual forman parte los autores.

Así mismo, a todas las personas involucradas en la elaboración del manual de los laboratorios de CEPA e ITRANS. Muchas gracias.

*“Solo quién tiene un por qué es capaz de soportar el cómo”.
F. Nietzsche*

Contenido

Agradecimientos	7
Prólogo	17
Definiciones	19
Siglas.....	26
Relación de métodos citados.....	29

Capítulo 1

El marco jurídico mexicano y la calidad del agua	31
--	----

Capítulo 2

Planeación del muestreo	43
Etapas del proceso de planeación	44
Tipo de muestra.....	51
Volumen de la muestra	57
Frecuencia de muestreo.....	59
Métodos de recolección de muestras	61
Procedimientos en campo	63

Capítulo 3

Muestreo de aguas.....	69
Muestreo simple aleatorio.....	70
Muestreo aleatorio estratificado.....	71
Muestreo aleatorio sistemático	71
Muestreo no aleatorio	72
Técnica del gradiente espacial	73
Aguas residuales municipales	75
Aguas residuales industriales	79
Aguas superficiales y sedimentos.....	84
Descargas agrícolas.....	86
Agua subterránea.....	88
Agua para uso y consumo humano	99
Muestreador bailer	101

Bombas de altura de aspiración	102
Bombas portátiles sumergibles	103
Muestreadores que elevan agua con aire	104
Pretratamiento del equipo de muestreo.....	105

Capítulo 4

Importancia del muestreo microbiológico	107
Consideraciones generales de muestreo microbiológico	114
Procedimiento general de muestreos para análisis microbiológico.....	117
Preparación previa al muestreo	121
Proceso de la toma de muestra.....	121
Muestreo de agua de la llave o grifo	122
Muestreo de agua de pozo somero o fuente similar.....	125
Muestreo de aguas residuales	126
Muestreo en ríos y arroyos.....	129
Etiquetas para las muestras	130
Muestreo en lagos, lagunas, presas y embalses	132
Muestreo para análisis de Giardia lamblia en agua potable.....	133
Muestreo para microcistinas	135
Muestreo para huevos de helmintos en aguas residuales.....	137
Muestreo para pruebas de toxicidad con Vibrio fisheri.....	139

Capítulo 5

Preservación de muestras.....	143
Métodos de preservación	144
Recipientes.....	151
Tiempo de retención.....	155
Compuestos orgánicos volátiles.....	159
Compuestos orgánicos purgables.....	159
Compuestos orgánicos semivolátiles	160
Diferencias entre métodos de muestreo para compuestos orgánicos	161

Capítulo 6

Muestreo para análisis de radiactividad.....	167
Consideraciones para el muestreo.....	169
Procedimiento general de muestreo	174
Capacidad de detección.....	174

Seguridad radiológica	178
Capítulo 7	
Cadena de custodia y aseguramiento de la calidad.....	181
Identificación de la muestra	182
Cadena de custodia	183
Aseguramiento de la calidad del muestreo.....	188
Capacitación del personal	192
Criterios de aceptación y rechazo de muestras	193
Bibliografía	195

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparativa entre el sistema mexicano y otros sistemas jurídicos.....	34
Tabla 2. Ejemplos de diferencias entre las legislaciones de México, EE. UU. y la Unión Europea.....	37
Tabla 3. Cuadro comparativo del marco normativo sobre muestreo de agua en México.	39
Tabla 4. Resumen comparativo entre normas para uso y consumo humano y su relación con la calidad del agua y el muestreo.	40
Tabla 5. Ejemplo de información preliminar para el plan preliminar de muestreo.	47
Tabla 6. Ejemplo de datos necesarios para el plan de muestreo.	49
Tabla 7. Diferentes tipos de programas de muestreo (22).....	49
Tabla 8. Métodos para muestras compuestas. Modificado de (22). ...	52
Tabla 9. Forma de reportar el valor promedio diario de algunos parámetros de aguas residuales en función del caudal de muestreo (16).	55
Tabla 10. Ventajas y desventajas del muestreo manual y del muestreo automático (22).	62
Tabla 11. Sitio sugerido de muestreo por tipo de parámetro biológico o químico (26).	72
Tabla 12. Mediciones comunes en el muestreo de aguas superficiales, organismos acuáticos y sedimentos. Traducido de (22).	85
Tabla 13. Sugerencias para la preservación de muestras para análisis de nutrientes, demandas de oxígeno y microbiológico. Modificado de (22).....	88
Tabla 14. Análisis microbiológico y tipo de muestreo según el uso de agua. Elaboración propia considerando las normas mexicanas y otras fuentes.	113
Tabla 15. Recipientes requeridos, técnicas de preservación y tiempos de almacenamiento. Traducido de (26).....	147
Tabla 16. Comparación entre los recipientes de vidrio y plástico. Modificado de (26).....	152

Tabla 17. Comparaciones entre recubrimientos de tapas de recipientes. Modificado de (26).	153
Tabla 18. Tiempo máximo de retención según tipo de compuestos: compuestos orgánicos volátiles (COV) o compuestos orgánicos semivolátiles (COSV).....	157
Tabla 19. Diferencias en la elección de recipientes de muestreo y condiciones de llenado para compuestos orgánicos (44) (45).	162
Tabla 20. Diferencias en las técnicas de preservación.	163
Tabla 21. Diferencias en el manejo de muestra en campo para análisis de compuestos orgánicos (46).....	163
Tabla 22. Diferencias entre los tiempos máximos de retención para compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y purgables (46).	164
Tabla 23. Contraste de las técnicas analíticas asociadas a los compuestos orgánicos.	164
Tabla 24. Volúmenes de muestra mínimos sugeridos por EPA (26).....	172
Tabla 25. Resumen de la documentación requerida para la cadena de custodia.	187
Tabla 26. Ejemplos de criterios de aceptación y rechazo de muestras considerando condiciones de muestreo y análisis de las muestras.	194

Índice de Figuras

Figura 1. Esquemas de muestreo (a) con línea que parten desde un punto de origen en embalses, lagos y aguas costeras; (b) por cuadrícula en ríos. Modificado de (22).	72
Figura 2. Use la técnica del gradiente espacial para el espaciamiento máximo entre las estaciones de muestreo. Modificado de (22).	74
Figura 3. Factores de la operación de una planta que deben considerarse en el diseño de un programa de muestreo.	81
Figura 4. Red de monitoreo ideal para un relleno. Modificado de (26).	96
Figura 5. (a) Muestreador Kemmerer modificado. (b) Bailer de teflón.	102
Figura 6. (a) Bomba de altura de aspersión. (b) Bomba portátil sumergible para muestreo de aguas.	104
Figura 7. (a) Bolsa microbiológica <i>Whirl-Pak</i> ® con tiosulfato, capacidad 120 mL y 300 mL. (b) Bolsas de muestra estériles <i>Whirl-Pak</i> ® de 250 mL. (c) Frasco de vidrio tapa rosca azul <i>Schott</i> ®, capacidad 100 mL y 500 mL.	121
Figura 8. Manejo de las bolsas de muestreo microbiológico.	124
Figura 9. Ejemplo de botella Van Dorn (37).	130
Figura 10. Ejemplo de identificación de una muestra en su frasco de muestreo, asegurar que no sufra alteraciones por la muestra misma u otro factor externo.	131
Figura 11. Ejemplos de recipientes para recolectar muestras destinadas al análisis de compuestos orgánicos.	158
Figura 12. Los procedimientos de cadena de custodia en el análisis de la calidad del agua.	184

Prólogo

La regulación ambiental ha cambiado debido al incremento del interés público y gubernamental sobre los peligros de la contaminación, los riesgos a la salud y a la prosperidad de la humanidad. El aire nocivo, el agua contaminada y la tierra dañada son trágicos testimonios del deterioro de nuestro ambiente natural. La complejidad de ese ambiente y la interacción entre sus componentes requieren de un ataque específico y orientado al problema.

La investigación y desarrollo es el primer paso necesario en la solución e involucra la definición del problema, la medición de su impacto y la búsqueda de soluciones. Algunos organismos y agrupaciones internacionales han desarrollado nuevas tecnologías y mejorado otras. Además de sistemas para la prevención, tratamiento y administración de descargas de aguas residuales, sólidos y residuos peligrosos de fuentes municipales y comunitarias, para la prevención y tratamiento de las fuentes de agua para beber y para minimizar los efectos económicos, sociales, de salud y estéticos adversos de la contaminación.

Este libro se centra en el planteamiento de métodos y técnicas para el muestreo de aguas residuales, potables y naturales, y sedimentos, así como los procedimientos para la recolección, manejo, almacenamiento y registro de las mismas para asegurar la calidad de los resultados. Los métodos de muestreo expuestos aquí fueron seleccionados por sus autores para proveer protección máxima al recolector de la muestra, tomar muestras representativas y almacenarlas, identificarlas, preservarlas y manejarlas adecuadamente. Este libro tiene como propósito servir como base para todos aquellos profesionales y estudiantes que se han involucrado en el mundo del monitoreo, control y eliminación de la contaminación de las aguas continentales. Este libro tiene como referencias importantes las sugerencias y lineamientos que establece la *Environmental Protection Agency* (EPA) de EE. UU. y las Normas Oficiales Mexicanas

vigentes publicadas en el Diario Oficial de la Federación a la fecha de la publicación de este libro, así como otras fuentes de organizaciones e instituciones de reconocido prestigio. Con respecto a las normas mexicanas, es necesario que el lector consulte la referencia más actual porque están en constante cambio para adaptarse a las necesidades y políticas ambientales de México.

Definiciones

Las definiciones encontradas en este apartado sirven de apoyo para comprender los alcances de la normalización y estandarización de la calidad del agua. Los términos incluidos en este vocabulario pueden ser idénticos a los que están contenidos en los vocabularios publicados por organizaciones internacionales, pero las definiciones pueden diferir a causa de las variaciones de objetivos para los que han sido establecidos (Secretaría de Economía, 2010). En algunos casos, la definición es enriquecida de otras fuentes para dar al lector un panorama más amplio del concepto.

Agua cruda. Agua que no ha recibido ningún tipo de tratamiento, o agua que entra a una planta para tratamiento posterior.

Agua de abastecimiento. Agua que ha sido usualmente tratada para pasar a distribución o almacenamiento.

Agua de lluvia. Agua resultante de precipitaciones atmosféricas y que aún no ha captado materia soluble directamente de la superficie terrestre.

Agua de riego. Agua suministrada a los suelos o a los soportes de cultivo de las plantas a fin de incrementar su contenido de humedad, de suministrar el agua necesaria para el crecimiento normal de las mismas plantas o evitar la acumulación de un excedente de sales en el suelo o ambas.

Agua de tormenta residual. Mezcla de agua residual y de agua superficial proveniente de tormentas o de deshielos.

Agua de tormenta. Escurrimiento torrencial de agua superficial que fluye hacia un cauce de agua como resultado de una lluvia intensa.

Agua estancada. Cuerpo de agua superficial a través del cual existe poca o nada de corriente y le pueden ocurrir cambios de calidad desfavorable después de un largo período.

Agua industrial. Toda agua utilizada para un proceso industrial o durante el transcurso de este.

Agua mineral natural. Agua que se caracteriza por un contenido de-

terminado de sales minerales y sus proporciones relativas. Obtenida directamente de manantiales o fuentes perforadas procedentes de estratos acuíferos.

Agua para uso y consumo humano. Agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos, y que no causa efectos nocivos para la salud. También se denomina agua potable.

Agua potable. Ver agua para uso y consumo humano.

Agua residual doméstica cruda. Agua residual doméstica no tratada.

Agua residual doméstica tratada. Agua residual doméstica que ha recibido un tratamiento parcial o total, a fin de remover o mineralizar las sustancias orgánicas y otros materiales que esta contenga.

Agua residual doméstica. Agua proveniente de los desechos de una comunidad.

Agua residual industrial. Agua descargada resultante de un proceso industrial, y que no tiene ningún valor inmediato para este.

Agua subterránea. Agua filtrada y retenida en el subsuelo que puede ser aprovechada.

Agua superficial. Agua que fluye o se estanca en la superficie terrestre.

Analito. Componente específico o elemento medido en el análisis químico.

Arroyo. Agua que fluye continua o intermitentemente según un curso bien definido como el de un río, generalmente en una escala más pequeña.

Bitácora. Cuaderno de laboratorio debidamente foliado e identificado, en el cual los analistas anotan todos los datos de los procedimientos que siguen en el análisis de una muestra, así como todas las informaciones pertinentes y relevantes a su trabajo en el laboratorio. A partir de las bitácoras, los inspectores pueden reconstruir el proceso de análisis de una muestra, tiempo después de que se llevó a cabo.

Blanco de campo. Muestras libres del analito, pero similar a la matriz de la muestra a ser transferida desde un recipiente a otro o expuesta al ambiente de muestreo del sitio. Empleados para medir contaminación casual o accidental de la muestra durante todo el proceso, desde el muestreo, transporte, preparación de la muestra y análisis.

Canal aforador. Canal artificial de forma y dimensiones bien determinadas que permite la medición del flujo.

Canal. Cauce artificial de agua, habitualmente construido para unir ríos, lagos o mares, de tamaño generalmente apropiado para la navegación; la mayoría de los canales tienen un flujo lento y características pobres de mezclado.

Contaminación. Cualquier cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del medio ambiente que pueda ser perjudicial para la salud humana u otros seres vivos.

Contaminantes patógenos y parasitarios. Microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna.

Coordenadas geográficas. Sistema de referencia que permite localizar un punto en la superficie de la Tierra y que emplea para ello dos coordenadas angulares: Latitud (N o S) y Longitud (O o E), expresadas en grados sexagesimales en sus tres componentes “Grados (°), minutos (′) y segundos (″)” y referenciadas al Datum WGS84.

Datum. El Datum sirve para hacer que un Sistema de Coordenadas Geográficas represente fielmente la superficie de la Tierra y salve las irregularidades de la misma, ya que esta no es esférica. Aunque existe un Datum global, cada continente o país ha definido su propio Datum para adaptar mejor el Sistema de Coordenadas Geográficas a su superficie. Por tanto, las coordenadas geográficas no suelen ser universales, sino que son relativas al datum de referencia elegido. De esta manera, un mismo punto se expresa con coordenadas geográficas diferentes en función del datum seleccionado.

Efluente. Agua descargada proveniente de procesos industriales o sistemas de tratamiento.

Efluentes de aguas residuales domésticas tratadas. Descarga de las aguas residuales domésticas tratadas en un sistema de tratamiento.

Embalse. Vaso de formación artificial que se origina por la construcción de un bordo o cortina o vaso de formación natural, ambos alimentados por uno o varios ríos, o por agua subterránea o pluvial.

Estuario. Tramo del curso o corriente de agua bajo la influencia de las mareas que se extiende desde la línea de costa hasta el punto donde la concentración de cloruros en el agua es igual o mayor a 250 mg/L.

Informe de resultados de muestreo y análisis. Documento que realiza un laboratorio, ya sea en forma física o en sistema electrónico, en

el cual informa los datos del muestreo y el resultado de los análisis realizados.

Intercambio iónico. Proceso mediante el cual ciertos aniones o cationes del agua son reemplazados por otros iones, mediante el paso a través de un lecho de materia intercambiadora de iones.

Lago. Cuerpo de agua de gran extensión tierra adentro. A los grandes lagos salados con frecuencia se les llama mares.

Laguna costera. Cuerpos de agua alargados y someros separados del mar por una barra de arena o un sistema de islas en barrera, con su eje mayor paralelo a la costa, que tienen comunicación con el mar por una o varias bocas que se mantienen abiertas por la acción de las olas y mareas, y con un efímero o inexistente aporte de agua dulce.

Laguna para aguas residuales. Estanque natural o artificial o depósito poco profundo utilizado con fines diversos, tales como decantación, descomposición, enfriamiento y almacenamiento de las aguas residuales y lodos.

Laguna. Cuerpo de agua poco profunda, tal como un estanque, lago o balsa, alimentado por una fuente de agua subterránea o superficial.

Línea de muestreo. Conducto que une la sonda de muestreo al punto de distribución de la muestra o al equipo de análisis.

Lodo. Acumulación de sólidos sedimentados separados de varios tipos de aguas, como resultado de procesos naturales o artificiales.

Medición. Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud.

Muestra. Porción, idealmente representativa tomada de un cuerpo de agua definido, de manera intermitente o continua, con el propósito de examinar diversas características definidas.

Muestra compuesta. Mezcla intermitente o continua, en proporciones adecuadas, de por lo menos dos muestras o submuestras a partir de la cual se puede obtener el valor medio de la característica deseada. Las proporciones de las muestras se calculan generalmente a partir de mediciones de tiempo o flujo.

Muestra puntual o simple. Muestra discreta tomada de un cuerpo de agua de manera aleatoria, en lo que concierne al momento, al sitio o a ambos.

Muestreador. Aparato utilizado para tomar una muestra de agua, de manera intermitente o continua, con el propósito de examinar diversas características definidas. También puede referirse a la persona que realiza la acción de muestrear.

Muestreo automático. Proceso mediante el cual las muestras son tomadas en forma intermitente o continua, independientemente de la intervención humana y de acuerdo con un programa preestablecido. Generalmente, con la ayuda de equipo automatizado.

Muestreo continuo. Proceso mediante el cual una muestra se toma de manera continua de un cuerpo de agua.

Muestreo isocinético. Técnica que consiste en hacer pasar la muestra de una corriente de agua a través del orificio de una sonda de muestreo con una velocidad igual a la de la corriente en la proximidad inmediata de la sonda.

Muestreo proporcional. Técnica de obtención de una muestra a partir de una corriente de agua en la que la frecuencia de recolección (en el caso de muestreo intermitente), o la velocidad de flujo de la muestra (en el caso de un muestreo continuo), es directamente proporcional a la velocidad de flujo del agua muestreada.

Muestreo. Acción que consiste en tomar un volumen considerado como representativo de un cuerpo de agua a fin de examinar diversas características definidas.

Parámetros básicos. En lo que corresponde a las normas mexicanas, se consideran los siguientes: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, carbono orgánico total, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno total Kjeldahl, de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/L de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

Porción de pruebas. Fracción discreta de una muestra que será sometida a análisis.

Preservación de la muestra. Proceso en el cual, por medio de adición de productos químicos o la modificación de las condiciones físicas o ambas, se reducen al mínimo los cambios de las características de la muestra a terminar durante el tiempo que transcurre entre el muestreo y el análisis.

Preservador. Sustancia adicionada a la muestra para así poder mantener los componentes en un estado en particular.

Programa de control; monitoreo. Proceso programado de muestreo, mediciones y el subsecuente registro o transmisión, o ambos, de las diversas características de agua con el propósito de evaluar su conformidad con objetivos establecidos.

Promedio diario (PD). Valor que resulta del análisis de una muestra compuesta o el resultado del promedio ponderado en función del caudal o de la media geométrica o del promedio aritmético, según corresponda al parámetro conforme a las normas mexicanas.

Promedio mensual (PM). Valor que resulta de calcular el promedio ponderado en función del caudal de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (promedio diario) colectadas en un mismo mes calendario. Los caudales que se deben considerar para el citado promedio ponderado serán el resultado del promedio aritmético de los caudales de las muestras simples que conforman cada una de las muestras compuestas.

Punto de distribución de la muestra. Punto situado en el extremo de una línea de muestreo, generalmente alejado de la sonda de muestreo, del que se toma una muestra, de manera intermitente o continua, para ser analizada.

Punto de muestreo; estación de muestreo. Posición precisa en una zona de muestreo donde son tomadas las muestras.

Red de muestreo. Sistema de zonas de muestreo preestablecidas a fin de monitorear uno o más lugares definidos.

Repetibilidad. Similitud entre los resultados obtenidos con el mismo método en un material idéntico sometido a prueba en las mismas condiciones (analista, laboratorio, aparatos) y realizados en serie. En ausencia de alguna indicación especial la repetibilidad debe caer dentro del 95 % de la probabilidad estadística. En otros campos de aplicación la repetibilidad se expresa como la precisión dentro de una serie de determinaciones y el 95 % de probabilidad estadística como ± 2 desviaciones estándar.

Reproducibilidad. Similitud entre resultados individuales obtenidos con el mismo método en un material idéntico sometido a prueba, pero en

condiciones diferentes (analista, aparatos, laboratorios) realizados en ocasiones diferentes. En ausencia de alguna indicación especial, la reproducibilidad debe caer dentro del 95 % de la probabilidad estadística.

Río. Cuerpo de agua que fluye de modo continuo e intermitente a lo largo de un curso bien definido hacia el océano, mar, lago depresión interior, pantano u otro curso de agua.

Sistema de abastecimiento. Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obra de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación de cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

Sitio de muestreo. Lugar específico de una zona de muestreo. En México los términos zona y sitio no se emplean como sinónimos. Una zona de muestreo es el área general de un cuerpo de agua donde se toman muestras.

Sonda de muestreo. Parte de un equipo de muestreo que es insertado en un cuerpo de agua y por la que pasa inicialmente la muestra.

Trazabilidad. Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón por la cual pueda ser relacionado a referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

Vertedero. Estructura de rebose que puede usarse para controlar el nivel superficial aguas arriba o para medir la descarga o ambos.

Zona de muestreo. Área general de un cuerpo de agua donde se toman muestras. En México los términos zona y sitio no se emplean como sinónimos por lo cual se propone definir además sitio de muestreo: lugar específico de una zona de muestreo.

WGS84. Sistema Geodésico Mundial 1984, es uno de varios Marcos de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) existentes. Otro ITRF es el Datum Norteamericano de 1927 (NAD27).

Siglas

Sigla	Descripción
APHA	<i>American Public Health Association</i> , es una asociación estadounidense de salud pública
ARIMA	Media móvil integrada autorregresiva, siglas del inglés <i>Autoregressive Integrated Moving Average</i> .
BLP	Buenas prácticas de laboratorio
CG	Cromatografía de gases
CL	Cromatografía de líquidos
CNSNS	Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias requiere que los laboratorios que realicen análisis radiológicos estén acreditados ante la
CONAGUA	Comisión Nacional el Agua. En las citas de las normas mexicanas a este organismo se hace referencia como la “Comisión”
COP	Compuestos orgánicos purgables
COSV	Compuestos orgánicos semivolátiles. Con frecuencia se usa la sigla SVOC del inglés <i>Semi-Volatile Organic Compounds</i>
COV	Compuestos orgánicos volátiles. Con frecuencia se usa la sigla VOC del inglés <i>Volatile Organic Compounds</i>
DBO5	Demanda bioquímica de oxígeno, el número en subíndice indica el número de días de incubación
DNAPL	Líquido no acuoso de fase densa, siglas en inglés de <i>Dense Non-Aqueous Phase Liquid</i> . Contaminantes líquidos que son más densos que el agua y que tienden a hundirse y formar depósitos en el fondo de los acuíferos
DQO	Demanda química de oxígeno
DSM	Detector selectivo de masas
EE. UU.	Estados Unidos de América
EMA	Entidad Mexicana de Acreditación
EM-PAI	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> es una agencia ejecutiva independiente del gobierno federal de EE.UU.
FDA	Food and Drug Administration es una agencia EE.UU. responsable de la regulación de alimentos, medicamentos, cosméticos, aparatos médicos, productos biológicos y derivados sanguíneos

Sigla	Descripción
GC-MS	Cromatografía de gases y espectrometría de masas, siglas del inglés <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i>
GC-MS/MS	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas en tándem, de las siglas en inglés <i>Gas Chromatography - Tandem Mass Spectrometry</i>
GUM	Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medición, siglas del inglés <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HTO	Agua tritiada; siglas de Hidrógeno, Tritio y Oxígeno
ITRF	Marcos de Referencia Terrestre Internacional, siglas del inglés <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, máxima ley de derecho ambiental en México
LNAPL	Líquido no acuoso de fase ligera, siglas en inglés de <i>Light Non-Aqueous Phase Liquid</i> . Contaminantes líquidos que son menos densos que el agua y que tienden a flotar en la superficie del agua subterránea
LSC	Contador de centelleo líquido, siglas del inglés <i>Liquid Scintillation Counting</i>
NMP	Número más probable
NMX	Norma mexicana de observancia voluntaria
NOM	Norma oficial mexicana de observancia obligatoria
NPOC	Carbono orgánico no purgable, siglas del inglés <i>Non-Purgeable Organic Carbon</i>
OCDE	<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PIB	Producto Interno Bruto
PID	Detector de fotoionización, siglas del inglés <i>Photoionization Detector</i>
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
SAAM	Sustancias activas al azul de metileno
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SFCI	Secretaría de Fomento y Comercio Industrial
SSA	Secretaría de Salud

Sigla	Descripción
SST	Sólidos suspendidos totales
TOC	TOC: Carbono orgánico total, siglas del inglés <i>Total Organic Carbon</i>
UE	Unión Europea
WGS84	El Sistema Geodésico Mundial 1984, siglas del inglés <i>World Geodetic System 1984</i>

Relación de métodos citados

El siguiente listado contiene la descripción de los métodos de muestreo, análisis y otros procedimientos citados en este libro.

Referencia	Descripción
EPA 816-F-09-004	Normativa nacional sobre agua potable primaria.
EPA Method 524.2	Medición de compuestos orgánicos purgables en agua mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas.
EPA Method 8270E	Determinación de compuestos orgánicos semivolátiles en agua mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas.
EPA-EAD Method 624.1	Determinación de contaminantes orgánicos purgables en vertidos industriales y otras muestras ambientales mediante cromatografía de gases combinada con espectrometría de masas.
ISO 113483:2007	Calidad del agua. Determinación del efecto inhibidor de muestras de agua sobre la emisión de luz de <i>Vibrio fischeri</i> (prueba de bacterias luminiscentes). Parte 3: método que utiliza bacterias liofilizadas.
ISO 15189:2022	Laboratorios clínicos. Requisitos para la calidad y la competencia.
ISO 5667-1:2023	Calidad del agua. Muestreo. Parte 1: orientación sobre el diseño de programas de muestreo y técnicas de muestreo.
ISO 7899-2:2000	Calidad del agua. Detección y recuento de enterococos intestinales. Parte 2: método de filtración por membrana.
ISO 9308-1:2014	Calidad del agua: recuento de <i>Escherichia coli</i> y bacterias coliformes. Parte 1: método de filtración por membrana para aguas con baja flora bacteriana de fondo.
ISO/IEC 17025	Estándar que permite a los laboratorios demostrar que operan de manera competente y generan resultados válidos, promoviendo así la confianza en su trabajo tanto a nivel nacional como mundial.
NMX-AA-003-1980	Establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas.
NMX-AA-004-2013	Análisis de agua. Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.

NMX-AA-014-1993	Lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, excluyendo aguas estuarinas y aguas marinas.
NMX-AA-042-SC-FI-2015	Análisis de agua. Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y <i>Escherichia coli</i> . Método del número más probable en tubos múltiples.
NMX-AA-112-SF-CI-2017	Análisis de agua y sedimentos. Evaluación de toxicidad aguda con <i>Vibrio fischeri</i> . Método de prueba.
NMX-AA-113-SC-FI-2012	Análisis de agua. Medición del número de huevos de helmineto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica. Método de prueba.
NMX-AA-120-SC-FI-2006	Análisis de agua. Medición del número de huevos de helmineto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica. Método de prueba.
NOM-001-SEMAR-NAT-2021	Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
NOM-002-SEMAR-NAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMAR-NAT-1997	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas para reuso en servicios al público.
NOM-127-SSA1-2021	Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
NOM-201-SSA1-2015	Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias.
NOM-210-SSA1-2014	Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.
NOM-230-SSA1-2002	Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
NOM-245-SSA1-2010	Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas.
SW-846 8260	Compuestos orgánicos volátiles por cromatografía de gases y espectrometría de masas.

Capítulo 1

El marco jurídico mexicano y la calidad del agua

En México, el máximo instrumento normativo que regula las conductas humanas y logra una convivencia armoniosa entre las actividades de los mexicanos es la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; su papel es estructural, ya que establece los principios, derechos y obligaciones que deben regir en estos ámbitos.

A partir de la Constitución se desprenden las leyes relacionadas con la protección ambiental, a saber, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General de Vida Silvestre, la Ley General de Cambio Climático, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la Ley de Transición Energética, la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, la Ley General de Salud y la Ley de Aguas Nacionales, que en conjunto constituyen la política del Estado mexicano en protección ambiental. En forma particular, establecen las bases para los criterios técnicos y legales de los métodos de prueba y muestreo indispensables para la evaluación de la calidad del agua.

La evolución de la legislación ambiental en México refleja tensiones entre modelos de desarrollo económico, presiones internacionales y demandas sociales por justicia ecológica. Este proceso, iniciado formalmente en la década de 1970, ha consolidado un corpus jurídico que oscila entre enfoques conservacionistas, utilitaristas y críticas biocéntricas, particularmente visibles en la regulación de la calidad del agua.

La institucionalización ambiental mexicana emergió en 1971 con la creación de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, respuesta a la Conferencia de Estocolmo (1). Sin embargo, el hito fundacional ocurrió en 1988 con la LGEEPA, que incorporó principios del desarrollo sostenible promovidos por el informe Brundtland (2). Este marco se amplió en 1992 con la Ley de Aguas Nacionales, que centralizó la gestión hídrica en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (3).

La reforma constitucional de 2012, que reconoció el derecho humano al agua, y la Ley General de Cambio Climático de ese mismo año, evidenciaron la influencia de acuerdos internacionales como el Protocolo de Kioto (2). No obstante, como advierte el análisis de las reservas de la biósfera en la sierra de Manantlán, estas normas frecuentemente priorizaron la conservación ecológica sobre los derechos de las comunidades locales (4).

Tres corrientes han moldeado la política ambiental mexicana:

1. Conservacionismo tecnocrático

Visible en la creación de áreas naturales protegidas bajo criterios de “uso sustentable”, pero criticado por su disociación de realidades socioeconómicas. En Cerro Grande, Jalisco, las restricciones al aprovechamiento local contrastaron con la autorización de extracciones hídricas para abastecer a Colima (4).

2. Desarrollismo neoliberal

Manifestado en la Ley de Inversión Extranjera de 1993 y el Tratado entre México, EE. UU. y Canadá (T-MEC), que subordinan la regulación ambiental a atractivos comerciales. Estudios sobre la industria petrolera en el Golfo de México revelan cómo estas políticas facilitaron la privatización de recursos acuáticos, afectando a pescadores artesanales (5) (6).

3. Biocentrismo moderado

Propuesto por teóricos como Jorge Riechmann, busca integrar justicia social y ecológica. Aunque influyó en la reforma al Artículo 4.º constitucional (2012), su aplicación práctica sigue siendo limitada (4).

La contradicción entre marco normativo y realidad operativa se agrava por la coexistencia de 43 organismos operadores de agua con estándares dispares, frente a modelos integrados como el de la Agencia Federal Alemana de Medioambiente (UBA), que coordina calidad hídrica a nivel nacional (3) (7). Investigaciones recientes destacan cuatro limitaciones estructurales:

1. Antropocentrismo jurídico. La legislación prioriza usos productivos sobre integridad ecosistémica. El caso del río Santiago, Jalisco, ilustra cómo presas hidroeléctricas como Juanacatlán alteraron flujos dentro del cuerpo de agua sin evaluar impactos acumulativos (8).

2. Fragmentación institucional. La CONAGUA concentra facultades normativas, pero delega operación a entidades locales sin capacidades técnicas suficientes, replicando problemas denunciados, como la cuenca del Río Grande (9).

3. Inercia de estándares. Los criterios microbiológicos siguen basándose en indicadores bacterianos (*E. coli*), pese a evidencia de que no co-

relacionan con presencia de protozoos como *Giardia lamblia* (3) (7).

4. Conflictos de interés. El 68 % de los consejos de cuenca incluyen representantes de sectores industriales, frente al 12 % de comunidades indígenas, según estudios en la Laguna de Metztitlán (10).

Mientras la Unión Europea aplica el principio “quien contamina paga” mediante impuestos ecológicos (Directiva Marco del Agua 2000/60/CE), México mantiene subsidios cruzados que en 2022 representaron 0.3 % del PIB en apoyos a usuarios industriales (2). Todos estos contrastes se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparativa entre el sistema mexicano y otros sistemas jurídicos.

Parámetro	México	Alemania	EE. UU.
Muestreo de patógenos	Ocasional NMX-AA-042-SC-FI-2015	Semanal Reglamento <i>TrinkwV</i>	Diario <i>Safe Drinking Water Act</i>
Límite nitratos (mg/L)	10 NOM-127-SSA1-2021	50 <i>TrinkwV</i> 2001	10 EPA 816-F-09-004
Participación social	Consulta pública no vinculante	Cogestión en consejos fluviales	Acción ciudadana (CWA §505)

Esta comparación revela que México cuenta con estándares técnicos equivalentes, pero carece de mecanismos de exigibilidad judicial similares a las *Citizen Suits* de la *Clean Water Act* (CWA) de EE. UU. (2) (7).

La historia ambiental mexicana demuestra que las normas sobre calidad del agua han evolucionado reactivamente, influenciadas por coyunturas internacionales más que por diagnósticos locales. Como señala el análisis de la mercantilización de recursos acuáticos de Reyes G. (5), se requiere transitar de un modelo basado en estándares de contaminación a uno que incorpore:

- Indicadores ecosistémicos como macroinvertebrados, peces, bioindicadores, como propone la experiencia canadiense (3).
- Mecanismos de justicia hídrica que reconozcan derechos bioculturales, siguiendo el modelo de Nueva Zelanda para el río Whanganui.

- c) Sistemas de monitoreo comunitario validados científicamente y legalmente, como los observatorios participativos del norte de México (3).

Solo mediante esta integración de saberes técnicos, tradicionales y jurídicos podrá superarse la paradoja mexicana “contar con un marco normativo avanzado en papel, pero incapaz de garantizar agua segura para el 43 % de la población rural” (7).

Las leyes ambientales mexicanas han mejorado considerablemente en las últimas décadas, pero aún les falta peso. Los recursos insuficientes para el monitoreo y su cumplimiento han frenado su influencia en donde se requieren. Hay varias áreas que requieren atención específica del gobierno.

1. Permisividad normativa y estándares obsoletos.
 - a. Límites de contaminación laxos. Las NOM-001/002/003-SEMARNAT permiten concentraciones de contaminantes superiores a las internacionales (ej., el cadmio hasta 0.2 mg/L, que contrasta con 0.01 mg/L en EE. UU.), facilitando daños ecosistémicos (11).
 - b. Indicadores desactualizados. Las normas se basan en parámetros bacterianos (*E. coli*) que no correlacionan con patógenos emergentes como *Giardia* o metales y metaloides, un problema señalado en estudios como el del río Santiago (11).
2. Fragmentación institucional y aplicación deficiente.
 - a. Duplicidad de funciones. La CONAGUA (gestión hídrica) y SEMARNAT (protección ecológica) operan con criterios contradictorios, como evidencian los conflictos en la cuenca del río Bravo (11).
 - b. Capacidad técnica limitada. Los organismos operadores locales carecen de recursos para cumplir normas, lo que genera plantas de tratamiento que incumplen parámetros microbiológicos en el 60 % de los casos (11).
3. Influencia de intereses económicos.
 - a. El T-MEC y estándares ambientales. El capítulo ambiental del T-MEC no ha logrado homologar regulaciones, permitiendo que industrias mexicanas operen con umbrales de plomo 20 veces mayores que los canadienses (2).
 - b. Subsidios cruzados. El Estado subsidia a usuarios industriales con hasta 0.3 % del PIB anual, desincentivando prácticas sostenibles (11).

4. Participación social simbólica.
 - a. Consultas no vinculantes. La LGEEPA (Art. 28) establece procesos participativos sin poder decisorio, contrastando con mecanismos como las *Citizen Suits* de la *Clean Water Act* de EE. UU. (11).
 - b. Exclusión de común. En la Laguna de Metztitlán, el 68 % de los consejos de cuenca están dominados por industriales, marginando a grupos indígenas (11).
5. Ideología ambiental occidentalizada.
 - a. Antropocentrismo normativo. La legislación prioriza el “aprovechamiento sustentable” sobre derechos bioculturales, ignorando cosmovisiones locales. Estudios en reservas, como en la sierra de Manantlán, revelan cómo las restricciones afectan economías comunitarias mientras permiten concesiones extractivas (12).
 - b. Imposición de modelos globales. El concepto de “desarrollo sustentable” se aplica sin adaptarse a contextos locales, generando conflictos como los documentados en Chiapas con proyectos eólicos (12).
6. Desempeño legislativo reciente.
 - a. Inacción en propuestas clave. Durante el gobierno de la “Cuarta Transformación” (2018-2024), solo el 15 % de las iniciativas ambientales fueron aprobadas, y ninguna abordó temas críticos como fractura hidráulica o deforestación (11).
 - b. Enfoque reactivo. Las reformas suelen responder a crisis mediáticas, como los derrames tóxicos, en lugar de prevenir riesgos, una tendencia analizada en la legislación sobre calidad del aire (11).

Como ejemplos internacionales que evidencian las carencias de la legislación mexicana está en la Unión Europea (UE), la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), que exige restaurar el “buen estado ecológico” mediante indicadores biológicos, ausentes en las normas oficiales mexicanas. Otra comparación es Nueva Zelanda, donde el reconocimiento del río Whanganui como persona jurídica (2017) ofrece un modelo de protección biocultural, inexistente en México (11). Algunas diferencias entre la legislación de México, EE. UU. y la Unión Europea se muestran en la Tabla 2.

Las críticas a la legislación ambiental mexicana se centran en su carácter antropocéntrico, la influencia de grupos de poder y la desconexión entre normas avanzadas y capacidades operativas. Como señala un análisis del T-MEC, la homologación con estándares internacionales requiere reformas estructurales, no solo ajustes cosméticos.

Tabla 2. Ejemplos de diferencias entre las legislaciones de México, EE. UU. y la Unión Europea.

Parámetro	México	Alemania	EE. UU.
Límites de descargas	NOM-001 (2021): Cd 0.2 mg/L	CWA: Cd 0.01 mg/L (EPA)	Directiva 2008/105/ CE: 0.08 mg/L
Metales permitidos	18 parámetros regulados	126 contaminantes prioritarios (EPA)	45 sustancias prioritarias (UE)
Participación social	Consultas no vinculantes (LGEEPA Art. 28)	<i>Citizen Suits</i> (CWA §505)	Derecho a denuncia (Directiva 2003/35)
Sanciones económicas	Multas hasta 50 000 UMA	Hasta \$ 50 000 USD diarios (CWA)	Hasta 10 % de facturación (UE)

En México, el manejo y control de la calidad del agua es un tema de alta prioridad debido a su estrecha relación con la salud pública, la protección del medioambiente y el desarrollo sostenible. Para asegurar una gestión adecuada de los recursos hídricos y garantizar que el agua utilizada por la población y las industrias cumpla con los criterios de calidad establecidos, existe un marco normativo robusto que regula el muestreo, análisis y monitoreo de distintos tipos de agua: naturales, potables de uso y consumo humano, residuales y residuales tratadas.

Este marco está compuesto por leyes, reglamentos y normas mexicanas que se encuentran en vigor y que establecen los criterios técnicos y legales que deben seguirse durante los procesos de muestreo y análisis de agua. Entre estas disposiciones legales están:

1. Ley de Aguas Nacionales. Esta ley, administrada por la CONAGUA, establece las bases para la conservación, distribución y control del agua en México. En su reglamento se especifican las condiciones para el monitoreo y muestreo de cuerpos de agua y descargas (13).

2. Ley General de Salud. A través de esta ley, la Secretaría de Salud regula la calidad del agua destinada al uso y consumo humano. Su reglamento en materia de control sanitario establece disposiciones específicas para el muestreo y análisis de agua potable (14).
3. Normas mexicanas. Son instrumentos técnicos que contienen especificaciones obligatorias o voluntarias. Algunas de las más relevantes en materia de muestreo de agua son:
 - NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Requisitos sanitarios que debe cumplir el proceso de muestreo para la toma de muestras de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento públicos y privados durante su manejo. Esta norma describe los procedimientos para la toma de muestras de agua potable, incluyendo aspectos como la limpieza de los frascos, transporte, almacenamiento y registro de datos (15).
 - NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Esta norma establece parámetros de calidad para el agua residual y especifica requisitos sobre el muestreo, frecuencia y metodología (16).
 - NOM-002-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Aunque más antigua, aún se encuentra vigente y contiene directrices sobre el muestreo representativo de aguas residuales (17).
 - NOM-003-SEMARNAT-1997. Requisitos que debe cumplir el agua residual tratada que se reutiliza en servicios al público. Define parámetros para el uso de aguas residuales tratadas y establece criterios para su muestreo (18).
 - NMX-AA-003-1980, NMX-AA-004-2013. Entre otras normas mexicanas de carácter voluntario, pero frecuentemente utilizadas como referencia técnica para procedimientos de muestreo en aguas naturales y residuales (19) (20).
 - NMX-AA-014-1993. Contiene los lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, excluyendo aguas estuarinas y aguas marinas (21).

- NOM-230-SSA1-2002. En el ámbito de salud ambiental, este documento está enfocado en especificar los requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua; y que dentro de su descripción establece procedimientos sanitarios para el muestreo (15).

Tabla 3. Cuadro comparativo del marco normativo sobre muestreo de agua en México.

Tipo de agua	Norma o ley aplicable	Institución responsable	Enfoque principal	Vigencia
Agua potable	NOM-230-SSA1-2002	Secretaría de Salud	Requisitos sanitarios y técnicos para la toma de muestras	Vigente desde 2005
	Ley General de Salud y su Reglamento	Secretaría de Salud	Control sanitario de agua para uso y consumo humano	Vigente
Aguas naturales	Ley de Aguas Nacionales	CONAGUA	Protección de cuerpos de agua nacionales	Vigente
	NMX-AA-003-1980, NMX-AA-004-1993	CONAGUA / SEMARNAT	Métodos de muestreo en cuerpos de agua	Referenciales
Aguas residuales	NOM-001-SEMAR-NAT-2021	SEMARNAT / CONAGUA	Límites permisibles de contaminantes en descargas a cuerpos receptores	Vigente desde 2022
	NOM-002-SEMAR-NAT-1996	SEMARNAT	Descargas en sistemas de alcantarillado municipal	Vigente desde 1998
Aguas residuales tratadas	NOM-003-SEMAR-NAT-1997	SEMARNAT	Reuso de aguas residuales tratadas en servicios al público	Vigente desde 1998

Estos instrumentos legales y técnicos establecen una base clara y detallada para asegurar que los procedimientos de muestreo de agua sean confiables, comparables y técnicamente sólidos. El cumplimiento de estas disposiciones es esencial para evaluar la calidad del agua, detectar contaminantes, prevenir riesgos sanitarios y garantizar la consumación de las obligaciones ambientales por parte de particulares e instituciones. En la Tabla 3 hay un cuadro comparativo del marco normativo sobre muestreo de agua.

En un rubro particular, las normas que están diseñadas para la calidad del agua para uso y consumo humano son la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-201-SSA1-2015, pero no regulan directamente el proceso de muestreo en sí, sino que se enfocan en los parámetros de calidad y los límites permisibles que debe cumplir el agua para el propósito establecido.

Así, la NOM-127-SSA1-2021 establece los valores máximos permisibles de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos en el agua potable. Es la referencia clave para los análisis de laboratorio, ya que define si una muestra es apta o no para el consumo humano. No especifica cómo tomar la muestra, sino qué se debe medir y qué límites no deben superarse. Para que un análisis con base en estos valores sea válido, debe usarse un procedimiento de muestreo adecuado, como el que establece la NOM-230-SSA1-2002.

Tabla 4. Resumen comparativo entre normas para uso y consumo humano y su relación con la calidad del agua y el muestreo.

Norma	Regula el muestreo	Regula la calidad del agua	Ámbito principal
NOM-230-SSA1-2002	Sí	No	Cómo se toman las muestras
NOM-127-SSA1-2021	No	Sí	Parámetros de calidad del agua potable
NOM-201-SSA1-2015	No	Sí	Agua envasada y hielo de consumo humano

La NOM-201-SSA1-2015 establece los requisitos sanitarios que deben cumplir el agua y el hielo envasado o distribuido a granel. Incluye

aspectos como el proceso de producción, almacenamiento, transporte, etiquetado y puntos de venta. También define los límites de calidad microbiológica y fisicoquímica, similares a los de la NOM-127-SSA1-2021, pero aplicados específicamente al sector comercial. Se refiere de manera general a que las muestras deben tomarse bajo condiciones sanitarias, pero no establece un procedimiento detallado de muestreo como sí lo hace la NOM-230-SSA1-2002. En la Tabla 4 se muestra un resumen de la comparación anterior y su ámbito de regulación.

A lo largo del libro se mencionan las normas mexicanas antes descritas y otras referencias metodológicas, además de lineamientos de relevancia para los temas que se tratan en cada capítulo. Para agilizar la lectura solo se mencionará el nombre corto de cada una de ellas.

Capítulo 2

Planeación del muestreo

El muestreo es un procedimiento mediante el cual una persona calificada para tal actividad colecta un volumen o masa necesaria de agua, suelo o aire, provenientes de descargas residuales, cuerpos de agua natural, aire atmosférico de una comunidad o centro de trabajo, suelo de uso doméstico, industrial o de ecosistemas, o de cualquier otro origen. El fin del muestreo es poder realizar un análisis en campo o en un laboratorio según corresponda a los parámetros contenidos en el plan de muestreo.

El plan de muestreo de agua es el proceso de selección de porciones de un cuerpo de agua u otra fuente definida que sirven para determinar las características previamente establecidas. Todo plan de muestreo incluye un procedimiento de muestreo y, junto con los criterios, sirve para tomar decisiones de tipo técnico, administrativo o normativo sobre un cuerpo o fuente de agua, basándose en el análisis del número prescrito de porciones, llamadas muestras, del tamaño indicado en los métodos aplicables. Un plan de muestreo adecuadamente diseñado define la probabilidad de detección de parámetros que puedan considerarse contaminantes, pero se debe tener presente que ningún plan de muestreo puede asegurar la ausencia de un contaminante no especificado. Los planes de muestreo deben ser administrativa y económicamente factibles.

Etapas del proceso de planeación

Las siguientes consideraciones pueden ayudar a planear un programa de muestreo apropiado. El proceso de planeación puede dividirse en cuatro etapas: el plan preliminar, evaluación del plan preliminar, el plan final y la evaluación del programa.

En esta etapa, el énfasis se hace en la recolección de información preliminar de la entidad a ser muestreada, los sitios de muestreo y las características del flujo. Esta información puede estar disponible de registros de estudios anteriores. Cuando no hay información disponible, debe llevarse a cabo una investigación de reconocimiento para familiarizarse completamente con las condiciones reales del sitio. En la Tabla 1 hay un ejemplo del tipo de información necesaria en la mayoría de los casos. Recolecte la información para la tabla y, con base en esta, bosqueje un plan preliminar de muestreo. Delinee los objetivos preliminares del muestreo

y los detalles del plan, como el tipo de parámetros según la muestra, el tamaño de la muestra y la frecuencia. Registre esta información en una tabla similar a la Tabla 2.

Realice un estimado de los recursos, mano de obra y equipo necesarios para el programa de muestreo. La Tabla 1 ilustra una forma para mantener los registros de los recursos disponibles y las necesidades estimadas de un programa de muestreo. Incluya en el plan preliminar de muestreo la preservación de la muestra y los procedimientos de la cadena de custodia.

Circule el plan preliminar entre otras divisiones involucradas, laboratorio personal de campo y la rama de aseguramiento de la calidad, que estén relacionadas con el programa, para tomar en cuenta sus consideraciones y deliberaciones antes de diseñar el programa final de muestreo.

El plan final

Tome como base para el plan final de muestreo: el plan preliminar y las deliberaciones subsecuentes y la coordinación con el personal involucrado. Delinee el plan final con detalle, incluyendo objetivos, sitios de muestreo, número y frecuencia de muestras, tipo de muestras, aseguramiento de la calidad de las muestras (ej., fortificación en campo, réplicas), preservación y procedimientos de la cadena de custodia, designación de las autoridades, procedimientos de campo y otra información pertinente para que el plan se ejecute de una manera bien coordinada y eficiente. En la Tabla 5 se muestra un formato ejemplo que sirve de ayuda para el diseño de un plan de muestreo, que en conjunto con los parámetros de análisis cubren la información mínima necesaria (ver ejemplo en Tabla 6). El informe de premuestreo debe ser un elemento clave en cualquier programa de muestreo.

Los datos recomendables que deben anotarse en la bitácora de campo al momento del muestreo son:

1. Datos generales.
 - a. El nombre de la persona que realizó el muestreo
 - b. Los datos de ubicación del sitio
 - c. La clave de identificación de cada una de las muestras tomadas y el punto de muestreo correspondiente

- d. La ubicación de los puntos de muestreo
- e. La fecha y hora de recolección de cada muestra
- 2. Características del sitio.
 - a. Coordenadas geográficas (datum)
 - b. Condiciones climáticas
 - c. Presencia de vegetación
 - d. Uso actual del suelo
 - e. Edificaciones e infraestructura
 - f. Actividades ajenas al proceso propio de contaminación que pudieran influir en la calidad del muestreo
 - g. Presencia de residuos o materiales de relleno
 - h. Resultados de otras mediciones hechas en campo

La mayoría de las definiciones de calidad del ambiente están relacionadas con su uso. Cada usuario produce diversos contaminantes que impactan al ambiente de diferentes maneras. Por ejemplo, las plantas termoeléctricas descargan contaminación térmica que impacta la población biológica; las descargas de nutrientes domésticos provocan la eutroficación de lagos; las descargas industriales causan la disminución de oxígeno, o la descarga de sustancias tóxicas puede matar peces. El amplio espectro ambiental hace que un monitoreo de su calidad sea una tarea formidable. El muestreo es el primer elemento clave en un programa de monitoreo o de regulación que debe ejecutarse apropiadamente para asegurar datos válidos. Ningún programa de muestreo simple puede aplicar a todo tipo de muestras; sin embargo, cada programa de muestreo debe considerar:

- Objetivos del programa de muestreo
- Localización de los puntos de muestreo
- Tipos de muestras
- Método de recolección de muestras
- Medición de flujos (cuando aplique)
- Procedimientos en campo

Evaluar el programa completo después de que las muestras han sido recolectadas y analizadas para determinar la efectividad del plan final y

evitar problemas y errores. La evaluación del desempeño debe mejorar la eficiencia del programa y la calidad de los datos generados a partir de un programa de muestreo.

Tabla 5. Ejemplo de información preliminar para el plan preliminar de muestreo.

Plan de muestreo de aguas residuales						
Fecha:						
Nombre del sitio (razón social si aplica):						
Ubicación geográfica:						
Nombre y datos de contacto o cliente (dirección, teléfono, correo electrónico):						
Tipo de actividad industrial:						
Punto de muestreo	Detalles del proceso					
Planta de tratamiento ()	1.					
Industria ()	2.					
Río ()	3.					
Estuario ()	4.					
Alcantarilla, drenaje ()	5.					
Tubería de agua ()	6.					
Otro, especificar ()	7.					
Planos	SI	NO	Fuentes de residuo	Flujos	T	C
Mapas del drenaje						
Mapas de red de línea de agua						
Mapas de afluente y río						
Mapas de la planta de tratamiento						
Mapas de la zona de estuario						
Otros mapas (especificar):						
T: Flujo en tubería. C: Flujo den canal abierto.						

Canal	Velocidad de flujo		Registro de inspección ()
Ancho:	Máximo por hora:		Otro (especificar):
Profundidad:	Mínimo por hora:		
Tubería	Promedio por hora:		Diámetro o ancho:
Diámetro:	Máximo diario:		
Material:	Mínimo diario:		Profundidad:
	Promedio diario:		
Topografía	Aspectos físicos del flujo	Protección	Seguridad
Nivel ()	Olor:	Orillas escarpadas ()	Valla, cercas ()
Pendientes ()		Suelos inestables ()	Despejado ()
Vegetación ()	Temp.:	Gases especificar ()	Custodiado ()
Pantano ()		Tipo de flujo	Iluminado ()
Otro (especificar):	Grasas y aceites:	Turbulento ()	Otro, especificar ()
		Lento ()	
Sitios de muestreo			
Distancia	Número	Accesibilidad	Conveniencia
Cercano ()	P o c o s ()	Camino ()	Vigilancia ()
		Puente ()	Energía disponible ()
Remoto ()	Muchos ()	Otro, especificar ():	Otro, especificar ():
Información adicional:			

Tabla 6. Ejemplo de datos necesarios para el plan de muestreo.

Parámetros de interés	Tipo de muestra	Frecuencia muestreo	Número de muestras	Análisis en: campo o laboratorio	Volumen de muestra	Preservación	Tiempo retención	Métodos analíticos	Observaciones
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									

Objetivos de los programas de muestreo

Hay cuatro grandes razones para desarrollar un programa de muestreo y análisis: planeación, investigación o diseño, control de procesos y regulación. Estos objetivos en un programa de calidad ambiental están interrelacionados y cubren diferentes etapas, desde la planeación hasta el seguimiento legal. Basados en este enfoque, en la Tabla 7 se examinan diferentes tipos de programas de muestreo.

Tabla 7. Diferentes tipos de programas de muestreo (22).

Objetivos	Planeación	Investigación/ Diseño	Control de procesos	Regulación
Alcance Metas	General Establecer las tendencias Cotas Niveles de origen	Específico Nuevos desarrollos Modificaciones Mejoras	Específico Control de calidad de la operación	Específico Verificación del cumplimiento legal
Esfuerzo	No intensivo e ilimitado	Intensivo y limitado	No intensivo y limitado	No intensivo y limitado

Ya que los objetivos de un programa afectan directamente al muestreo y al análisis de laboratorio, la especificación de los objetivos es el primer paso en la planeación de un programa de muestreo.

La mayor parte de los estudios de muestreo y sus análisis subsecuentes se llevan a cabo para cumplir los requerimientos de las leyes federales, estatales o locales.

Localización de los sitios de muestreo

Generalmente, los objetivos del programa de muestreo definen los lugares o sitios aproximados para el muestreo, por ejemplo, el afluente y efluente de una planta de tratamiento. Con frecuencia, sin embargo, los objetivos del programa de muestreo dan solo indicaciones generales, como el efecto de un escurrimiento superficial en la calidad de un río cuando es fuente de agua para beber de una comunidad.

Ya que la calidad ambiental varía de lugar a lugar en la mayoría de los sistemas, deben seleccionarse los lugares adecuados para las necesidades de información de un programa en particular. La naturaleza y extensión de la heterogeneidad puede variar con el tiempo y puede también diferir marcadamente entre sistemas de un mismo tipo.

Es importante remarcar que las modificaciones a las normas mexicanas sobre muestreo de aguas residuales (16) han incluido como requisito para la localización del sitio de muestreo, el uso de las coordenadas geográficas, con el geoposicionador global y como referencia el Datum WGS84. Los datos deben incorporarse en los registros de muestreo y en el informe de análisis para su correcta identificación, así como cerciorarse y reportar sí el cuerpo receptor donde efectivamente se descarga el agua residual por el responsable es el autorizado en el permiso de descarga expedido por la CONAGUA.

Al determinar el sitio donde se tomará la muestra es necesario que, con el objeto de garantizar la seguridad y salud de los trabajadores involucrados, las muestras deberán ser tomadas considerando las regulaciones en materia de seguridad e higiene en el trabajo.

Tipo de muestra

El tipo de muestra recolectada depende de la variabilidad del flujo, la variabilidad de la calidad de la fuente a muestrear, la precisión requerida y la disponibilidad de fondos para conducir los programas de muestreo y analíticos.

Muestra simple instantánea

Una muestra simple instantánea (también denominada puntual) se define como una muestra individual discreta recolectada en un periodo de tiempo que no exceda los 15 minutos. Este tipo de muestra es apropiada cuando se desea caracterizar la calidad de la fuente a un tiempo particular, proveer de información acerca de las concentraciones máximas y mínimas, permitir la recolección de un volumen de recolección variable, corroborar muestras compuestas, cumplir con los requerimientos de un permiso de descarga. Puede tomarse manualmente, usar una bomba, una paleta, vacío u otro dispositivo adecuado.

Muestra compuesta

Una muestra compuesta se define como una muestra formada por mezclas de muestras simples o discretas tomadas en puntos periódicos en el tiempo o una proporción continua de un flujo. El número de muestras discretas, las cuales forman la compuesta, depende de la variabilidad de la concentración de contaminación y flujo. Una muestra compuesta secuencial se define como una serie de muestras instantáneas periódicas, cada una de las cuales es contenida en un recipiente individual, y compuestas para cubrir un periodo de tiempo. Pueden usarse seis métodos para muestras compuestas, dos de tipo continuo y cuatro de tipo periódico (Tabla 8). La lista de métodos con sus ventajas y desventajas; seleccionar el tipo de muestra compuesta depende del programa y de las ventajas y desventajas relativas de cada tipo de muestra compuesta.

El siguiente es un método manual para hacer muestras compuestas de composición proporcional. Cuando se usa un método de composición pro-

porcional constante volumen/tiempo, use registros previos del flujo para determinar el incremento de flujo volumétrico apropiado para tener una muestra representativa sin exceder la capacidad del frasco o recipiente.

Conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021, el volumen de cada muestra simple necesario para formar la muestra compuesta se determina mediante la siguiente ecuación (16):

$$VMS_i = VMC \left(\frac{Q_i}{Q_t} \right)$$

VMS_i = volumen de cada una de las muestras simples “i”, L.

VMC = volumen de cada muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, L.

Q_i = caudal medido en la descarga en el momento de coleccionar la muestra simple, L/s.

Q_t = Suma de Q_i hasta Q_n , ..., L/s.

Tabla 8. Métodos para muestras compuestas. Modificado de (22).

Modo de muestreo	Principio de composición	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Continuo	Velocidad de bombeo constante	Mínimo esfuerzo manual, no requiere medición de flujo	Requiere de una gran capacidad de muestra; puede no ser representativa por el alto flujo variable	Práctico, pero no se usa ampliamente
Continuo	Velocidad de bombeo proporcional a la corriente de flujo	Más representativa especialmente para flujo muy variable	Requiere de un equipo de medición de flujo preciso, gran volumen de muestra, capacidad y potencia variable	No se usa ampliamente

Periódico	Volumen de muestra constante, intervalo de tiempo constante entre muestras	Instrumentación y esfuerzo manual mínimo: no requiere medición de flujo	Puede carecer de representatividad especialmente para flujo altamente variables	Se usa ampliamente en muestreos automáticos como manuales
Periódico	Volumen de muestra constante, intervalo de tiempo entre muestras proporcional a corriente de flujo	Mínimo esfuerzo manual	Requiere de un equipo de medición del flujo preciso. Muestreo compuesto a partir de una gráfica de flujo	Se usa ampliamente en muestreos automáticos como manuales
Periódico	Intervalo de tiempo constante entre muestras, volumen de muestra proporcional al flujo total desde la última muestra	Instrumentación mínima	Composición manual a partir de una gráfica de flujo. En ausencia de información previa de la relación de flujo máximo y mínimo, hay probabilidad de recolectar una muestra discreta individual demasiado pequeña o demasiado grande para un volumen compuesto	No se usa ampliamente en muestreadores automáticos, pero puede usarse manualmente

Periódico	Intervalo de tiempo constante entre muestras, volumen de muestra proporcional al flujo total al tiempo de muestreo	Instrumentación mínima	Composición manual a partir de una gráfica de flujo. En ausencia de información previa de la relación de flujo máximo y mínimo, hay probabilidad de recolectar una muestra discreta individual demasiado pequeña o demasiado grande para un volumen compuesto	U s a d o e n muestreadores automáticos y ampliamente usado en el método manual
-----------	--	------------------------	---	---

Esta norma mexicana establece que, para algunos parámetros de análisis de agua residual, el valor promedio diario debe reportarse en función del caudal de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples colectadas para conformar la muestra compuesta, tal como se muestra en la Tabla 9. También queda asentado que el valor promedio diario para sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, carbono orgánico total, nitrógeno total Kjeldahl, color verdadero, huevos del helminto, cianuros, metales, no metales y metaloides es el resultado del análisis de las muestras compuestas.

Asimismo, para el promedio mensual de todos los parámetros anteriormente mencionados y que se encuentran referenciados en la NOM-001-SEMARNAT-2021, debe reportarse el resultado del promedio ponderado en función del caudal de los valores en promedio diario que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas colectadas en el mismo mes del calendario. Para este cálculo del promedio ponderado deben seguirse los pasos siguientes, similar al establecido en la Tabla 9 para grasas y aceites.

Selección del tipo de muestra

Use muestras simples cuando:

- La corriente no fluye continuamente como en los vertederos estancados.
- Las características del agua o residuo son relativamente constantes.
- Los parámetros a analizar pueden cambiar con el almacenamiento, como los gases disueltos, el cloro residual, sulfuro soluble, aceite o grasa, parámetros microbiológicos, compuestos orgánicos y pH.
- Desea información del máximo, mínimo o de la variabilidad.
- Va a establecer la historia de la calidad del agua basada en intervalos de tiempo relativamente cortos.
- Va a determinar la variabilidad del parámetro espacial, por ejemplo, la variabilidad del parámetro a través de la sección transversal o profundidad de una corriente o largo de un cuerpo de agua.

Use muestras compuestas:

- Para determinar concentraciones promedio.
- Para calcular la carga de masa/unidad de tiempo.

Tabla 9. Forma de reportar el valor promedio diario de algunos parámetros de aguas residuales en función del caudal de muestreo (16).

Parámetro	El valor promedio diario se reporta como:	Fórmula
pH	Valor tomado en campo durante la colecta de cada muestra simple	Ninguna
Toxicidad aguda	Valor tomado en cada muestra simple	Ninguna
Temperatura	Promedio aritmético de los valores tomados en campo en la colecta de cada muestra simple	Promedio aritmético $T_p = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$ T_p = Valor de temperatura promedio, °C. T_i = Valores de temperatura de cada muestra

		“<i>t</i>” simple, °C. n = Número total de muestras simples en donde se midió el valor de temperatura.
Grasas y aceites	Valor promedio ponderado en función del caudal de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples colectadas para conformar la muestra compuesta	Promedio ponderado en función del caudal Primero calcular el ponderador del caudal, w_i: $w_i = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}$ w_i = Ponderador o participación porcentual del caudal de la muestra simple “<i>i</i>”. Q_i = Caudal medido en la descarga en el momento de colectar la muestra simple, L/s. Enseguida calcular el promedio ponderado, PP: $PP = \sum_{i=1}^n w_i R_i^x$ PP = Promedio ponderado en función del caudal del parámetro “<i>x</i>” expresado en mg/L. w_i = Ponderador o participación porcentual del caudal de la muestra simple “<i>i</i>”. R_i^x = Resultado del parámetro “<i>x</i>” expresado en mg/L.
<i>Escherichia coli</i> y Enterococos fecales	Valor de la media geométrica de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples colectadas para conformar la muestra compuesta	Media geométrica $MG = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n R_i}$ MG = Media geométrica, como NMP por cada 100 mL. R_i = Resultado obtenido en el parámetro que corresponda en cada muestra simple “<i>i</i>”, NMP por cada 100 mL.

Para la selección del tipo de muestra también es necesario revisar las restricciones especiales que las normas mexicanas incluyen (16):

1. En el caso del parámetro de pH, se debe reportar el valor tomado en campo durante la colecta de cada muestra simple.
2. En el caso del parámetro de toxicidad aguda, se deben reportar los valores obtenidos de cada muestra simple.

3. En el caso del parámetro temperatura, el valor promedio diario será el resultado del promedio aritmético de los valores tomados en campo en la colecta de cada una de las muestras simples.
4. En el caso del parámetro grasas y aceites, el valor promedio diario será el resultado del promedio ponderado en función del caudal de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples colectadas para conformar la muestra compuesta.

Volumen de la muestra

La estimación adecuada del volumen de muestreo es un aspecto fundamental para garantizar la representatividad y confiabilidad de los análisis de calidad del agua. Este proceso requiere considerar factores como el tipo de agua, los parámetros a analizar, las técnicas analíticas empleadas y el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales. Las normas mexicanas establecen lineamientos específicos que deben complementarse con estándares internacionales para asegurar un control de calidad robusto en la caracterización de aguas residuales, tratadas, naturales y potables.

El volumen necesario para el muestreo varía significativamente según los parámetros que se deseen analizar. Los análisis fisicoquímicos básicos como pH, conductividad eléctrica o DQO requieren volúmenes menores, mientras que los análisis de metales y metaloides, compuestos orgánicos o análisis microbiológicos necesitan volúmenes mayores para asegurar la precisión de los resultados.

Las características intrínsecas del agua a muestrear también determinan el volumen necesario. En el caso de aguas residuales con alta carga contaminante, especialmente en parámetros como la DQO, pueden requerirse mayores volúmenes para diluciones o análisis complementarios.

Para las aguas residuales, se requieren volúmenes mayores debido a la necesidad de realizar múltiples análisis y a la heterogeneidad que suelen presentar. Las técnicas de muestreo deben considerar la variabilidad temporal de las descargas, especialmente en plantas industriales donde los efluentes pueden cambiar significativamente en cortos períodos.

Los efluentes de plantas de tratamiento requieren un enfoque específico que considere el diseño y operación de la planta. En algunos sistemas

incluyen un tanque homogeneizador, un sedimentador y un reactor secundario; los sitios de muestreo deben seleccionarse estratégicamente para evaluar la eficiencia del tratamiento.

Para cuerpos de agua naturales, como los ríos o quebradas, se recomienda establecer estaciones de monitoreo representativas que capturen la variabilidad espacial del sistema. En este tipo de estudios, se han implementado hasta 8 sitios de aforo con frecuencia de muestreo mensual para caracterizar adecuadamente la calidad del agua.

Las aguas destinadas al consumo humano requieren un control más estricto y volúmenes específicos que permitan la detección precisa de contaminantes a bajas concentraciones. Los análisis de metales y metaloides como plomo, arsénico, cromo, cadmio, zinc, hierro y calcio demandan volúmenes suficientes para detectar concentraciones que pueden ser significativamente inferiores a los límites permisibles.

La estimación del volumen total necesario puede calcularse mediante la suma de los volúmenes requeridos para cada análisis individual, más un volumen adicional para réplicas, controles de calidad y contingencias, cuya fórmula básica es:

$$\text{Volumen total} = \sum \left(\begin{array}{c} \text{Volumen para} \\ \text{cada análisis} \end{array} \right) + (\text{Volumen control de calidad}) \\ + (\text{Volumen contingencia})$$

Las técnicas de muestreo también influyen en el volumen necesario. El muestreo simple requiere volúmenes menores, mientras que el muestreo compuesto, utilizado para caracterizar efluentes con variabilidad temporal, necesita mayores volúmenes para integrar muestras representativas durante períodos extensos.

Para determinar adecuadamente el volumen necesario para muestreo, se recomienda:

1. Identificar todos los parámetros a analizar y sus requerimientos volumétricos según los métodos analíticos.
2. Considerar el tipo de agua y su variabilidad inherente.
3. Incluir volumen suficiente para control de calidad (ej., duplicados, fortificaciones).

4. Ajustar según las condiciones específicas del sitio de muestreo y accesibilidad.
5. Consultar las normas aplicables según el objetivo del muestreo.

El volumen estimado debe considerar también las necesidades de preservación, que pueden incluir división de la muestra en diferentes recipientes con preservadores específicos según los análisis a realizar.

Frecuencia de muestreo

La determinación de frecuencias apropiadas de muestreo para el monitoreo de calidad de agua constituye un aspecto fundamental en la gestión de recursos hídricos y la protección de la salud pública. Hay estudios que demuestran que la variabilidad temporal en concentraciones de contaminantes puede ser considerable, con variaciones horarias significativas que afectan sustancialmente las estimaciones de cargas contaminantes (23).

En los cuerpos de agua, la variabilidad temporal constituye un factor crítico que determina la eficacia de los programas de monitoreo de calidad hídrica. Las fluctuaciones temporales en parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos exigen estrategias de muestreo adaptativas, combinando enfoques estadísticos, tecnológicos y normativos para garantizar la representatividad de los datos.

Las propuestas sobre la frecuencia de muestreo recaen en dos enfoques fundamentales. El primer enfoque es la adhesión a los tiempos fijados por el marco normativo mexicano. Como ejemplo, la NOM-001-SEMARNAT-2021 fija frecuencias mínimas de muestreo trimestral para aguas residuales, que contrasta con algunos estudios donde revelan que la variabilidad interanual, por ejemplo, de coliformes fecales exige muestreos mensuales para cumplir con los límites máximos permisibles (24).

El segundo enfoque es la integración de métodos estadísticos y probabilísticos, cuya justificación radica en el desfase normativo que se presenta en la práctica, que puede compensarse mediante programas de monitoreo adaptativo que incrementan la frecuencia durante sequías o episodios de contaminación aguda. La modificación es validada mediante, por ejemplo, el uso del análisis de series temporales con el modelo

ARIMA (siglas del inglés *Autoregressive Integrated Moving Average*), o aplicando análisis de varianza factorial, que constituye una herramienta fundamental para evaluar diferencias estadísticamente significativas entre estaciones de muestreo y profundidades.

Los cuerpos de agua superficiales son un claro ejemplo de las variabilidades espaciales y temporales complejas que requieren estrategias de muestreo específicas. Esta variabilidad estacional requiere frecuencias de muestreo ajustadas a las condiciones hidrológicas del cuerpo de agua. El monitoreo continuo es particularmente recomendable durante períodos de sequía, cuando se presentan concentraciones más altas de contaminantes y materia orgánica, que generan condiciones anaeróbicas que afectan la biodiversidad acuática.

La contaminación del acuífero por actividades antropogénicas requiere frecuencias de muestreo intensificadas para evaluar el impacto en la calidad del agua subterránea. El aumento de la densidad poblacional y la mayor demanda del servicio de agua exigen protocolos de monitoreo que permitan detectar cambios en la calidad del agua con suficiente anticipación para implementar medidas correctivas.

A manera de reflexión, el muestreo de alta frecuencia presenta ventajas significativas en términos de captura de variabilidad temporal y precisión en estimaciones de cargas contaminantes. Sin embargo, el muestreo de alta frecuencia presenta desventajas relacionadas con costos operativos elevados, requerimientos de personal especializado y necesidades de equipamiento sofisticado.

El muestreo estacional y dirigido representa un enfoque equilibrado que considera las variaciones climáticas e hidrológicas sin incurrir en costos prohibitivos. Las limitaciones del muestreo estacional incluyen la posibilidad de perder eventos de contaminación aguda entre períodos de muestreo y la dificultad para establecer tendencias de corto plazo.

La implementación de tecnologías de monitoreo automático ofrece ventajas significativas en términos de continuidad de datos y capacidad de respuesta inmediata ante eventos de contaminación. Las desventajas de los sistemas automáticos incluyen limitaciones en el rango de parámetros monitoreables, requerimientos de mantenimiento especializado y vulnerabilidad a fallas técnicas.

La aplicación de métodos estadísticos en el diseño de frecuencias de muestreo ofrece ventajas en términos de optimización de recursos y maximización de información obtenida. Esta capacidad de identificar patrones complejos facilita el diseño de estrategias de muestreo dirigidas que optimicen la representatividad espacial y temporal. Como contraste, los métodos estadísticos avanzados requieren de personal con experiencia y especializado; además, pueden presentar limitaciones en la interpretación de resultados por parte de personal operativo. Aunque estos métodos proporcionan información valiosa para la planeación del muestreo, su implementación requiere capacidades técnicas que pueden no estar disponibles en todos los contextos operativos.

En este punto de vista se encuentran las técnicas de análisis espectral y espectro de potencia en series en el tiempo de parámetros de calidad de agua usados como referencia para la frecuencia de muestreo. El personal encargado de la planeación debe recolectar datos preliminares, registros históricos si están disponibles, o a través de alguna de las siguientes sugerencias, en orden de preferencia:

- a. Un estudio de una semana en el que recolecte muestras simples a cada hora donde la descarga es continua.
- b. Un estudio de 24 horas en el que recolecte muestras simples cada hora.

Calcule la media y la varianza, use un *software* estadístico o de procesamiento de señales (ej., MATLAB®, R®, Python®) para el cálculo del espectro de potencia.

Métodos de recolección de muestras

Las muestras pueden recolectarse manualmente o con muestreadores automáticos. Cualquiera que sea la técnica adoptada, el éxito del programa de muestreo está directamente relacionado con el cuidado ejercido en la recolección de la muestra. El desempeño óptimo se obtendrá con personal entrenado.

Muestreo manual

Los equipos manuales siguen siendo ampliamente utilizados en estudios limnológicos, oceanográficos y de caracterización de aguas residuales por su versatilidad y relativa simplicidad operativa. Hay un costo inicial mínimo involucrado en el muestreo manual. El elemento humano es la clave para el éxito o fracaso de los programas de muestreo manual. Es adecuado para un número reducido de muestras, pero costoso y de largo tiempo para programas de muestreo, grandes y rutinarios.

Tabla 10. Ventajas y desventajas del muestreo manual y del muestreo automático (22).

Tipo	Ventajas	Desventajas
Manual	Bajo costo Cubrir varias situaciones Distinguir condiciones no usuales No mantenimiento Puede coleccionar muestras extras en corto tiempo cuando sea necesario	Probabilidad de incrementar al doble la variabilidad debido al manejo de la muestra. Inconsistencia en la recolección. Alto costo de trabajo. Supone la toma de varias muestras diarias, recorrer largas distancias entre los sitios de muestreo, y el trabajo invertido sólo en el muestreo Repetitivas y monótonas labores para el personal
Automático	Consistencia de muestras Probabilidad de decrecer la variabilidad causada por la manipulación de la muestra Se requiere labor mínima para el muestreo Capacidad de coleccionar múltiples recipientes con muestras para estimación visual de variabilidad y análisis individuales de recipientes	Considerable mantenimiento para baterías y limpieza; susceptible a obstrucciones por sólidos. Restricciones en el tamaño en especificaciones generales. Inflexibilidad Contaminación potencial de la muestra. Sujeto a daños vandálicos.

Muestreadores automáticos

Los avances tecnológicos han propiciado el desarrollo de sistemas automáticos que optimizan la recolección de muestras, mejorando la seguri-

dad, precisión y eficiencia del proceso. Los muestreadores automáticos están disponibles en una gran variedad de niveles de sofisticación, desempeño, confiabilidad mecánica y costo. Sin embargo, ningún simple dispositivo de muestreo automático es idealmente adecuado para todas las situaciones. La Tabla 10 muestra las ventajas y desventajas del muestreo manual y automático.

Procedimientos en campo

El corazón del programa de muestreo son las operaciones en campo. Si no se ejercitan las precauciones y cuidados adecuados en los procedimientos en campo, el programa completo de muestreo no tendrá significado a pesar de la planeación adecuada, las facilidades analíticas y el personal. La clave del éxito de un programa de muestreo en campo descansa sobre un buen almacenamiento, recolección de muestras representativas, adecuado manejo y preservación de muestras y la apropiada cadena de custodia.

Las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) son un conjunto de reglas, de procedimientos operacionales y prácticas establecidas y promulgadas por determinados organismos como la *Organization for Economic Cooperation and Development* (OCDE) o la *Food and Drug Administration* (FDA), que se consideran de obligado cumplimiento para asegurar la calidad e integridad de los datos producidos en determinados tipos de investigaciones o estudios.

Esto surge debido a que a fines de los años 1969 y 1975 las agencias reguladoras se enfrentaron con grandes discrepancias en los datos dirigidos a ellas, obtenidos en distintos laboratorios. Por lo que es importante considerar las siguientes BPL para el muestreo (22):

1. Redacte instrucciones escritas de los procedimientos de muestreo en campo.
2. Antes de usarse, revise el equipo para asegurarse de que está en buenas condiciones de operación y limpieza. Deje el equipo listo para ser usado. Después de que el muestreo ha sido completado, limpie el equipo y manténgalo en ambientes pulcros. Siga las especificaciones del fabricante en cuanto a la rutina de mantenimiento del equipo.
3. Revise los dispositivos primarios (por ejemplo, canal) y secundarios (por ejemplo, registrador/transmisor) de acuerdo a lo siguiente:

- a. Sitios.
 - i. En el lugar apropiado, como se definió en el programa de muestreo.
 - ii. Las condiciones de corriente arriba y corriente abajo cumplen con los requerimientos de la instalación específica de los dispositivos primarios y secundarios.
 - b. Las dimensiones de los dispositivos primarios como canales, vertederos y pozos fijos deben estar dentro de los límites de tolerancia.
 - c. Condiciones generales del canal, dispositivos primarios y secundarios, y de los pozos fijos. Anote cualquier situación inusual, escombros en el canal o distorsión en el papel para graficar.
 - d. Calibrar los dispositivos primarios y secundarios antes de realizar mediciones reales del flujo tomado.
4. Revise todos los frascos de muestreo para evitar contaminación. Limpie los frascos de acuerdo al Capítulo V referente al procedimiento de preparación y lavado de los frascos. Si esto no puede hacerse, no recolecte la muestra.
 5. En el laboratorio, limpie la tubería para la toma de muestra con un chorro de agua caliente por el interior y después enjuague con agua destilada. En el campo, enjuague varias veces con la muestra de agua.
 6. Mantenga los registros de las fallas durante las operaciones de muestreo, de los problemas encontrados con los diferentes equipos y cómo fueron resueltos. Esta información indica la fiabilidad del equipo, los problemas que necesitan la atención del fabricante y las consideraciones para adquisiciones futuras.
 7. Tenga sesiones de entrenamiento con los equipos de muestreo en campo.

Es necesario remarcar que no todas las muestras resultan útiles para llevar a cabo un trabajo de investigación. Lo que se busca al emplear una muestra es que, observando una porción relativamente reducida de elementos, se obtengan conclusiones semejantes a las que lograríamos si estudiáramos el universo total. Cuando una muestra cumple con esta condición, es decir, cuando nos refleja en sus unidades lo que ocurre en el universo, la llamamos muestra representativa. Por lo tanto, una mues-

tra representativa contiene las características relevantes de la población en las mismas proporciones en que están incluidas en tal población. Sus conclusiones son susceptibles de ser generalizadas al conjunto del universo, aunque para ello debamos añadir un cierto margen de error en nuestras proyecciones. Para obtener muestras representativas, siga las siguientes recomendaciones:

1. Recolecte la muestra donde el agua esté bien mezclada, que esté cerca de un canal Parshall o en un punto de turbulencia hidráulica, como por ejemplo corriente abajo de un salto hidráulico. Cierta tipo de vertederos y canales tienden a mejorar la sedimentación de sólidos corriente arriba y acumulan materia flotante y aceite corriente abajo, por lo que tales sitios deben evitarse para la toma de muestras. Para turbulencia de nivel bajo, debe usarse mezclado mecánico o con aire para inducir la turbulencia, excepto cuando se van a muestrear gases disueltos o materia volátil.
2. Recolecte la muestra en el centro del canal de 0.4 a 0.6 de la profundidad a partir del fondo, donde la velocidad de flujo es el promedio o mayor, y las probabilidades de sedimentación de sólidos sean mínimas. Esta profundidad evita recolectar sedimentos del fondo y materia flotante como grasas y aceites.
3. En un canal ancho, divida la sección transversal del canal en diferentes secciones verticales, de tal forma que cada sección sea igual de ancha. Tome una muestra representativa en cada una de las secciones verticales.
4. En una corriente profunda o en un lago, recolecte las muestras a diferentes profundidades. En los casos donde existan corrientes anchas y profundas, las muestras pueden ser compuestas o analizadas individualmente si los objetivos del programa lo permiten.
5. Cuando muestre manualmente con jarras, coloque la boca del recipiente recolector debajo de la superficie del agua y contracorriente para evitar el exceso de materia flotante. Mantenga la mano alejada de la boca de la jarra tanto como sea posible.
6. Recomendaciones adicionales para muestreo manual:
 - a. Muestre a contracorriente y evite la contaminación cruzada.
 - b. Fuerce al recipiente de muestreo a través de toda la sección transversal de la corriente cuando sea posible.

- c. Deje caer una cubeta invertida y dé un tirón fuerte a la línea justo antes de impactarse con la superficie del agua.
 - d. Asegúrese de que el muestreador se cierre y abra en el momento adecuado cuando se muestrea con un muestreador de profundidad integrado; con un muestreador puntual, asegúrese de que el muestreador se abra a la profundidad adecuada. Si existe duda, deseche la muestra y vuelva a tomar otra nueva.
7. Cuando esté muestreando, es necesario llenar los frascos completamente si a las muestras se analizarán compuestos orgánicos volátiles, O_2 , CO_2 , NH_3 , H_2S , cloro libre, pH, dureza, SO_2 , $NH_4(I)$, $Fe(II)$, grasas y aceites, acidez o alcalinidad. Cuando muestre bacterias o sólidos suspendidos, es necesario dejar un espacio de aire en el recipiente de la muestra para permitir el mezclado antes del submuestreo.
 8. Recolecte suficiente volumen para permitir los análisis duplicados y aseguramiento de la calidad (muestras divididas o fortificadas). El volumen requerido de muestra es la suma del requerido para cada parámetro de interés. Consultar con el responsable del laboratorio para los volúmenes mínimos a recolectar.
 9. Mantenga una bitácora al día con notas de las posibles interferencias, condiciones ambientales y problemas en el área.
 10. Ya que la relación matemática entre el flujo volumétrico y la altura (o profundidad) del flujo no es lineal, divida el flujo para obtener muestras compuestas proporcionales en relación al volumen total de flujo opuesto a la altura del medidor o de la medida directa de un dispositivo secundario.
 11. Si las muestras se toman de un conducto cerrado a través de una válvula o grifo, permita que el chorro del agua corra por un tiempo suficiente para asegurar que la muestra sea representativa de la fuente abastecedora; tome en cuenta el diámetro, longitud de la tubería a descargar y la velocidad del flujo.

Cuando no sea posible el análisis inmediato de la muestra recolectada, tome precauciones para que las características de la muestra no se alteren. Siga estas recomendaciones para el manejo y preservación de la muestra:

1. Minimice el número de gentes que tiene que manejar la muestra.

2. Siga las recomendaciones dadas en el Capítulo V en la sección “Limpieza de recipientes”, así como el procedimiento de cadena de custodia y del manejo de la muestra.
3. Almacene la muestra de una manera que asegure la no alteración de los parámetros a ser analizados, y use los métodos de preservación y tiempos de retención pertinentes según se muestra en el Capítulo V.
4. Asegúrese de que el material del recipiente no interfiere con el análisis de los parámetros específicos.

El programa de muestreo debe especificar los diversos análisis que deben realizarse en campo y el correspondiente método analítico. Los laboratorios de campo también deben tener procedimientos y métodos estandarizados para el manejo y análisis de las muestras, tales como mantener durante todo momento la identificación, integridad y representatividad de las muestras.

Capítulo 3

Muestreo de aguas

Obtener muestras representativas y mantener su integridad son partes críticas de cualquier programa de monitoreo o de regulación gubernamental. Los métodos analíticos se han normalizado, pero los resultados de estos análisis son tan válidos como los métodos de muestreo y preservación usados para recolectar las muestras. En este capítulo se presentan algunas técnicas para el muestreo y preservación de muestras recomendadas por la normatividad mexicana y otras fuentes bibliográficas, para que permitan al personal determinar los procedimientos más adecuados en aplicaciones específicas.

En muestreo, el objetivo es tomar una pequeña porción del ambiente que sea representativa del cuerpo entero. Una vez que se toma la muestra, los constituyentes de la muestra deben estar en la misma condición en que fue recolectada. El lapso de tiempo que los constituyentes permanecen estables está relacionado con su característica y con el método de preservación usado.

La técnica de muestreo se determina por el tipo de agua a muestrear. En primera instancia, se describen algunas consideraciones generales para un programa de muestreo y para los siguientes tipos de aguas: agua residual municipal, agua residual industrial, agua superficial, escorrentías agrícolas, agua potable, agua subterránea y sedimentos.

Muestreo simple aleatorio

Use un plan de muestreo aleatorio simple cuando no haya razón para subdividir la población de la cual se obtendrá la muestra. Saque la muestra de tal manera que cada unidad de población tenga la misma probabilidad de ser seleccionada. Primero, numere el universo o el conjunto completo de las unidades de muestreo a partir de las cuales la muestra será seleccionada. Este número es “N”. Después de una tabla de números aleatorios (software o calculadora que incluya esta función), seleccione tantos números aleatorios, “n”, como unidades a ser muestreadas, seleccionándolas de la muestra. Si usa una tabla de números aleatorios, seleccione un punto de inicio en la tabla y lea los números consecutivamente en cualquier dirección (a través, diagonal, hacia arriba, hacia abajo). Determine el número de observaciones, “n” (tamaño de la mues-

tra), antes del muestreo. Por ejemplo, “n” es un número de dos dígitos; seleccione números de dos dígitos e ignore cualquier número mayor a “n” o cualquier número que haya sido seleccionado. Seleccione estos como las unidades de muestreo.

Muestreo aleatorio estratificado

Use el plan de muestreo aleatorio estratificado si se dispone de cualquier conocimiento sobre el tamaño o variación de las observaciones disponibles. Para maximizar la precisión, construya los estratos tales que las observaciones sean más parecidas dentro de los estratos y más diferentes entre estratos, de forma que pueda mantenerse una varianza mínima dentro de los estratos y una varianza máxima entre los estratos. Quizás el medio más ventajoso de obtener información para la estratificación es a través de un estudio previo de reconocimiento o estudio piloto. La estratificación con frecuencia está basada en la profundidad, tipo de fondo, isothermas u otras variables que se sospeche estén correlacionadas con los parámetros de interés. Seleccione tantos estratos como puedan manejarse en el estudio. En la práctica, sin embargo, lo que se gana en eficiencia debido a la estratificación generalmente se vuelve despreciable después de solo unas pocas divisiones, a menos que la característica usada como base de la estratificación esté altamente correlacionada con el parámetro de interés.

Muestreo aleatorio sistemático

Use un plan de muestreo aleatorio sistemático para asegurar una sección transversal adecuada mientras se mantiene una relativa facilidad en el muestreo. Un método común de muestreo sistemático involucra el uso de un punto de referencia de donde parten líneas rectas (Figura 1.a) o una cuadrícula (Figura 1.b). Sin embargo, seleccione un punto de partida aleatorio a lo largo de la cuadrícula o donde se intercepten varias líneas para introducir la aleatoriedad necesaria para garantizar la libertad para el sesgo y permitir la inferencia estadística.

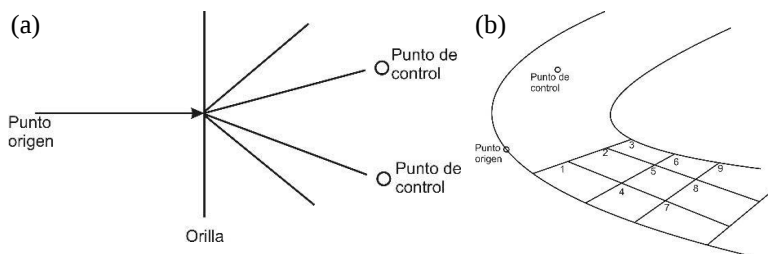


Figura 1. Esquemas de muestreo (a) con líneas que parten desde un punto de origen en embalses, lagos y aguas costeras; (b) por cuadrícula en ríos. Modificado de (22).

Muestreo no aleatorio

Use un plan de muestreo no aleatorio si se justifica por el estudio del sitio o por los parámetros de interés, o por el tipo de estudio que se está llevando a cabo. Por ejemplo, los siguientes lugares de muestreo pueden satisfacer los objetivos del programa según el parámetro biológico o químico de interés (Tabla 11).

Tabla 11. Sitio sugerido de muestreo por tipo de parámetro biológico o químico (26).

Parámetro	Lugar de muestreo
Peces	Muestreo en la orilla
Macroinvertebrados bentónicos	Derecha, izquierda del banco, corriente media o un punto y trazado de líneas desde un origen (Figura 1.a)
Perifiton	Muestreo en la orilla
Fitoplancton	Trazado de líneas desde un origen, ver Figura 1.a, o cuadrícula
Zooplancton	Trazado de líneas desde un origen, ver Figura 1.a, o cuadrícula
Macrófitos	Muestro en la orilla o trazado de líneas desde un origen, ver Figura 1.a
Químico	Trazado de líneas desde un origen, ver Figura 1.a, o cuadrícula

Use un esquema de muestreo con líneas que parten desde un punto de origen para determinar el impacto de un punto de descarga. Para determinar la zona de influencia, es recomendable un estudio previo.

1. Coloque líneas que crucen el agua receptora a varios ángulos a partir del punto de descarga.
2. Seleccione los intervalos de muestreo aleatoriamente o uniformemente o por la técnica del gradiente espacial.
3. Seleccione uno o dos puntos de control remotos para tomarlos como fondo de referencia.
4. Ver Figura 1.a para ejemplo.

Un esquema de muestreo por cuadrícula puede ser usado para parámetros biológicos. La cuadrícula debe ajustarse a un ambiente, como todas las tablas de retención para peces o todos los estanques para una comparación válida.

1. Construya las cuadrículas a través y por toda el área a ser muestreada, esto es, en ambas direcciones, profundidad y ancho contra longitud, como sea requerido por el programa.
2. El tamaño de la cuadrícula es dependiente del grado de mezclado lateral y vertical. Si la cantidad de mezclado se desconoce, entonces tome un número mayor de muestras a través y por la corriente, que de otra forma sería deseable.
3. Seleccione el número de muestras aleatoriamente, uniformemente o use la técnica del gradiente espacial.
4. Seleccione un punto de control corriente arriba del sistema de cuadrícula y un punto origen.
5. Ver la Figura 2.b para una ilustración del método de cuadrícula.

Técnica del gradiente espacial

Esta técnica puede ser usada para la selección racional de los lugares de las estaciones de muestreo. Presupone la existencia de datos históricos o algún estimado razonable de la variabilidad esperada de los parámetros a ser monitoreados sobre la región de interés, es decir, a lo largo del río. Esta técnica tiene mayor aplicación para parámetros químicos que biológicos.

1. Recolectar datos históricos o comparables para estimar la media y varianza de los parámetros de interés, "Y".

2. Grafique los valores máximos y mínimos de la concentración del parámetro contra la distancia a lo largo del río (Figura 2).
3. Calcule una pendiente para ambas líneas ($G_{\max}$ y $G_{\min}$).
4. Determine la diferencia entre las pendientes, esto es, $G_{\max} - G_{\min}$.
5. Determine el error permisible máximo en las estimaciones del valor de los parámetros en el Punto B.
6. $d_{\max} = \frac{Y_{\max}}{G_{\max} - G_{\min}}$
7. Use esta “d” para determinar la distancia entre puntos en una cuadrícula o trazado de líneas desde un origen dentro de un patrón de cuadrícula.

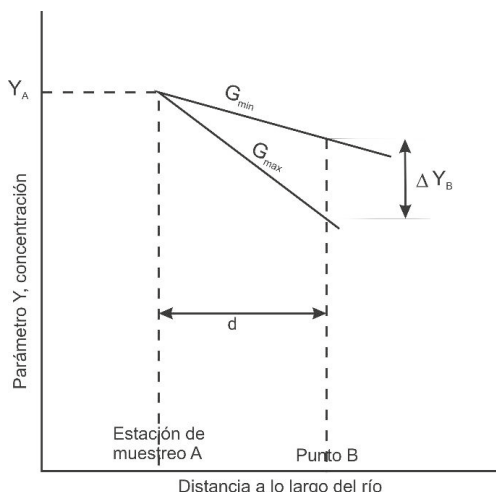


Figura 2. Use la técnica del gradiente espacial para el espaciamiento máximo entre las estaciones de muestreo. Modificado de (22).

Por lo general, la frecuencia de muestreo se determinará por el programa, pero se pueden usar las sugerencias del programa de monitoreo de aguas establecido por la normatividad mexicana u otra referencia normalizada como guía en un monitoreo de orientación.

Mientras que las muestras compuestas a partir de muestras simples se permiten para la mayoría de los parámetros químicos, como regla: “las muestras biológicas no deben ser compuestas”. Para muestras biológicas, recolectar muestras simples.

Seleccione el tipo de muestreador que cumpla con las necesidades del programa de muestreo, considerando las ventajas y desventajas del tipo de

muestreador. En general, se prefiere el uso de equipo de fabricación simple que facilite su operación y mantenimiento, además de ser menos costoso.

Hay ventajas inherentes en el uso de un buzo para muestrear sedimentos. El buzo puede determinar que muestra es representativa, además que puede tomar fotografías y determinar cualitativamente la velocidad de la corriente.

Revise el Capítulo V para tener información relativa a la preservación de los parámetros químicos que serán analizados. En general:

- No use muestreadores de metal para metales en bajas concentraciones.
- No use plásticos para el muestreo de compuestos orgánicos en bajas concentraciones.

Aguas residuales municipales

Las aguas residuales municipales se recolectan y se tratan por medios químicos, físicos o biológicos antes de descargarse a las aguas superficiales. Hasta tres etapas se usan comúnmente en las plantas de tratamiento municipales: primaria, secundaria y terciaria. Las características de las aguas residuales varían con el tamaño y hábitos de la comunidad, el tipo de sistema de recolección (combinado o separado), la cantidad de infiltración y el volumen y tipo de descargas industriales que entran al sistema.

Los objetivos de un programa de muestreo de aguas residuales municipales pueden ser de tipo reglamentario, para control de proceso de investigación y desarrollo. Los objetivos de tipo reglamentario deben ser requeridos por los organismos gubernamentales correspondientes, tales como Ayuntamientos, con base en la normatividad vigente. Los objetivos de control del proceso se aplican cuando se realizan muestreos en las plantas de tratamiento municipales para conocer la eficiencia de tratamiento y establecer las acciones correctivas o modificar los parámetros de operación para optimizar cuando sea el caso. Cuando se establezcan objetivos de muestreo con necesidades específicas de investigación y desarrollo, debe considerarse el alcance y las recomendaciones individuales del alcance del proyecto.

La frecuencia de muestreo de las aguas residuales municipales puede establecerse a través de la reglamentación de autoridades gubernamentales, por estadística, para acatar ciertas normas o por otras razones.

En caso de usar análisis estadístico, aplicar técnicas de análisis espectral para establecer la frecuencia óptima. Si los datos requeridos para esta técnica no están disponibles:

1. Lleve a cabo un estudio de una semana y recolecte muestras cada hora. Para aguas residuales combinadas de industria y municipal, elija una semana de alta producción industrial.
2. Determine si cualquier descarga inusual de industria o de la comunidad ocurrió durante el periodo de muestreo, por ejemplo, un derrame extenso o una tormenta extremadamente fuerte, las cuales pueden invalidar los datos y se necesite la repetición del estudio.

Después de recolectar los datos, su análisis debe hacerse de acuerdo a lo descrito por el procedimiento del método estadístico.

Recolectar la muestra en el sitio especificado en el permiso. En estos sitios, recolectar la muestra en el centro del canal a 0.4 a 0.6 de la profundidad donde el flujo es turbulento, bien mezclado, y donde la sedimentación de los sólidos es mínima. El muestreo a un 0.4 a 0.6 de la profundidad evitará el arrastre superficial del agua o el dragado del fondo del canal.

Para el análisis de DBO₅, recolectar las muestras antes de la desinfección. Para DBO₅ y sólidos suspendidos, las muestras de los influentes y afluentes de la planta deben recolectarse de tal forma que pueda calcularse la eliminación de estos constituyentes. El muestreo de aguas residuales para líquidos inmiscibles, como las grasas y los aceites, requiere de atención especial y no puede darse una regla específica para la selección del sitio más representativo debido al gran rango de condiciones encontradas en el campo. En tales casos, la experiencia del equipo de muestreo debe ser la guía en la selección del sitio más representativo.

Los influentes de las aguas residuales se muestrean preferiblemente en puntos de flujo altamente turbulento, de tal forma que se asegure un buen mezclado; sin embargo, en muchos casos el lugar deseado no es accesible. Preferentemente, los puntos de muestreo de residuos crudos son

- a. El flujo ascendente del sifón que sigue a un triturador, en ausencia de un tanque desarenador.
- b. El flujo ascendente del tanque distribuidor seguido del bombeo desde el pozo de aspiración de la planta principal.

- c. Tanque desarenador aireado.
- d. La garganta del canal.
- e. Bomba del pozo de aspiración.

En todos los casos, las muestras deben recolectarse en el flujo ascendente de la planta recirculadora de sobrenadantes y lodos.

Recolectar las muestras de los efluentes en el sitio más representativo corriente abajo de todas las corrientes residuales de entrada. Cuando se realicen manualmente muestras compuestas de efluentes, de acuerdo al flujo, en donde no existen dispositivos de medición de flujo, use el flujo medido del influente sin ninguna corrección de tiempo. El error en la medición del flujo del influente y del efluente no es significativo, excepto en aquellos casos donde se captan volúmenes extremadamente grandes de agua, tales como en los embalses, como resultado de una avalancha acoplada con una descarga de efluente altamente restrictiva.

Las muestras compuestas de lagunas con grandes tiempos de retención pueden no ser representativas debido a la tendencia de las lagunas a cortar el circuito. Si hay estudios con colorantes o la experiencia pasada indica una descarga homogénea, las muestras al azar pueden ser representativas de las corrientes residuales.

Para el muestreo dentro de la planta, aplique técnicas estadísticas para determinar los mejores sitios. Además de estos lugares, muestrear todas las demás unidades de proceso periódicamente o cuando la variabilidad de un parámetro afecte adversamente la eficiencia de una unidad de proceso.

Use uno o más de los siguientes métodos para determinar el número de muestras:

1. Siga los requerimientos de los organismos gubernamentales reglamentarios, con base en la normatividad vigente.
2. Aplique métodos estadísticos a los datos de los estudios preliminares.
3. Use los datos de frecuencia para establecer el número de muestras.

Por ejemplo, una muestra cada seis horas establecerá cuatro muestras por días.

La normatividad mexicana establece los límites máximos permisibles para cada uno de los parámetros que deben monitorearse en las descargas

a cuerpos de agua propiedad de la nación, NOM-001-SEMARNAT-2021 (16). También la autoridad correspondiente puede establecer requerimientos particulares para cada planta. Para evaluar el desempeño de una planta, independientemente del tamaño, se deben monitorear rutinariamente DBO5, sólidos, pH y el flujo. Algunos análisis secundarios pueden incluir: coliformes fecales, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos totales, sólidos volátiles totales, nitrógeno, fósforo, cloro residual, sólidos disueltos, alcalinidad, metales, DQO, grasas y aceites, compuestos orgánicos específicos.

Recolecte muestras compuestas para un monitoreo global y muestras al azar para verificar unidades de procesos individuales. Use alguno de los siguientes tipos de muestras compuestas para estimar la carga de masa adecuadamente:

1. Periódico, tiempo constante, volumen de muestra proporcional al flujo de la corriente.
2. Periódico, volumen de muestra constante, tiempo proporcional al flujo de corriente desde la última muestra.

Pueden usarse otros tipos de muestras si se puede demostrar que pueden obtenerse resultados comparables.

Seleccione entre muestreo manual o automático con base en las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos y de acuerdo con el programa de muestreo. Solo el personal entrenado debe estar encargado de la tarea de la recolección de la muestra. Mucha de la incertidumbre referente a la recolección de sólidos suspendidos puede minimizarse si las muestras se recolectan en condiciones isocinéticas o en grandes velocidades de toma.

El volumen de la muestra obtenida debe ser suficiente para realizar todos los análisis requeridos más una cantidad adicional para proveer cualquier división de la muestra o para réplica de análisis. A pesar de que la cantidad de la muestra requerida depende de los análisis a realizar, la cantidad aproximada de muestra es normalmente de 7.57 L para que el laboratorio reciba la muestra. El laboratorio receptor de la muestra debe ser consultado para cualquier requerimiento específico de volumen. Las alícuotas individuales de una muestra compuesta deben ser al menos

de 100 mL. Al considerar la frecuencia de muestreo y el volumen de muestra, la muestra compuesta total debe ser al menos de 7.57 L. Use un recipiente esterilizado aparte para el análisis de coliformes. Aplique el método de recolección adecuado para tomar muestras que se usen para el análisis de compuestos orgánicos. Recolecte las muestras para análisis de cloro residual y grasas y aceites en recipientes de vidrio que tengan tapas con recubrimiento de teflón. El plástico es aceptable para otro tipo de análisis inorgánicos y análisis orgánicos en general. En el Capítulo V se dan recomendaciones para la preservación de las muestras.

Aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales varían significativamente en sus características de contaminación. Este capítulo presenta guías generales y consideraciones para poder establecer programas de muestreo efectivos para situaciones variadas.

Los objetivos de un programa de muestreo de aguas industriales pueden ser de tres tipos esencialmente: regulador, para el control de un proceso e, para investigación y desarrollo.

El muestreo de aguas residuales industriales es requerido por los organismos gubernamentales de acuerdo a las diferentes normas oficiales mexicanas. La localización o puntos de muestreo, la frecuencia y el tipo de muestra se especifican en cada una de ellas.

Además, el muestreo se efectúa dentro de la planta para monitorear las corrientes, como una revisión de las eficiencias del proceso y para calcular el balance de materiales.

Las necesidades especiales de cada proyecto de investigación y desarrollo en el tratamiento de aguas residuales industriales se dictarán en el programa de muestreo. No se pueden dar guías generales, por lo que los proyectos se conducen generalmente:

- a. Para explorar el potencial de recuperación de un departamento dado o unidad de proceso. Los proyectos consideran las modificaciones del proceso y el estudio de la economía de los cambios.
- b. Para definir los factores que influyen en el carácter de los desechos de un departamento dado o unidad de proceso.

- c. Para investigar y demostrar las variaciones en el carácter y concentración de los desechos combinados.
- d. Para establecer una base segura para el tratamiento de los desechos residuales.

Usar los requerimientos cuando el objetivo es el monitoreo para cumplimiento de una norma mexicana. Si la frecuencia de muestreo no está especificada por la norma, el intervalo de muestreo debe ser una hora o menos y, si hay datos disponibles, usar los métodos estadísticos como una herramienta para determinar la frecuencia de muestreo.

Aplicar las estadísticas para obtener la frecuencia de muestreo cuando sea posible. Deben recolectarse datos históricos para determinar la media y la varianza. Uno de los siguientes procedimientos puede usarse para obtener esta información (listados en orden de preferencia) si no se han recolectado previamente:

- a. Conducir un estudio preliminar de una semana de duración consistente por muestras tomadas cada hora, para caracterizar el sistema.
- b. Conducir un estudio de 24 horas; tome muestras cada hora. Analizar muestras individuales si se sospecha de descargas por lotes. Cualquier patrón semanal debe considerarse y las muestras tomarse en el día de mayor variación en los parámetros de interés.
- c. Obtener los datos de una planta con el mismo tipo de operación industrial. Sin embargo, donde los procesos difieren, tomar muestras para cuantificar la variación.

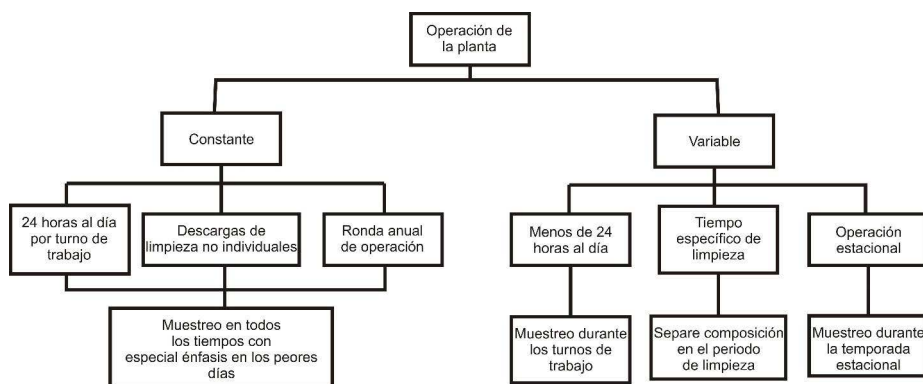
Después de la recolección de datos, usar gráficos para estimar los valores extremos, suponer una relación de operación lineal, la cual no siempre es el caso.

Considerar las operaciones de planta variables cuando se determina la frecuencia:

- a. Operación estacional.
- b. Menos de 24 horas por día de operación.
- c. Tiempos especiales durante el día, la semana o el mes, sin tener en cuenta la limpieza.
- d. Cualquier combinación de las anteriores.

Cuando se monitoreen estos tipos de operaciones, es necesario muestrear durante los turnos de trabajo normal en la estación de operación productiva. En la Figura 3 se muestran algunos factores que deben considerarse en un plan de muestreo relacionados con la operación de la planta a muestrear.

Figura 3. Factores de la operación de una planta que deben considerarse en el diseño de un programa de muestreo.



La normatividad mexicana define como muestra simple:

...a la que se tome en el punto de descarga, de manera continua, en un día normal de operación que refleje cuantitativa cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento del muestreo (16).

Y con referente a la muestra compuesta menciona que es:

...la que resulta de mezclar el número de muestras simples... Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma (16).

Las normas mexicanas establecen los puntos de monitoreo del efluente de descarga de la planta o una descarga específica de ciertas operaciones unitarias (16). Las autoridades pueden recomendar el muestreo en puntos específicos para propósitos prestablecidos.

Para lograr el control del proceso o para diseñar y realizar programas de control de contaminación en planta, es importante la selección del sitio de muestreo adecuado. Usar los siguientes procedimientos para determinar los lugares de muestreo:

- a. Familiarizarse con los procesos de la planta y las fuentes de residuos de las operaciones unitarias.
- b. Determinar el plano de alcantarillado en la planta. Si se cuenta con un plano, revisar el alcantarillado y examinar cada resumidero para corroborar el curso y destino de la descarga. Donde no se disponga de un plano de alcantarillado, el único modo práctico para determinar la distribución de los sumideros es por rastreo con tintes o trazadores.
- c. Determinar la fuente exacta y el punto al cual cada corriente residual entra al alcantarillado.
- d. Muestrear cada corriente residual y canal de la planta. Al hacer esto, cada corriente residual se caracteriza y el canal representa el efluente total de la planta.
- e. Muestrear cada descarga por lotes.
- f. Si existe un punto de perturbación dentro de la planta, el establecimiento de una estación de muestreo o equipo de monitoreo en ese punto permitirá una detección a tiempo.
- g. Si se dispone de datos en registros pasados de las diferentes corrientes residuales, usar técnicas estadísticas como una ayuda para establecer los lugares de muestreo críticos dentro de la planta.

Determine el número de muestras de acuerdo a lo siguiente:

1. Siga los requerimientos de la autoridad correspondiente con base en la normatividad mexicana vigente.
2. Donde las regulaciones normativas no son aplicables, se recomienda:
 - a. Aplicar métodos estadísticos a los datos provenientes de un estudio preliminar.
 - b. Para determinar efectivamente la concentración y tipo de con-

taminantes descargados, recolectar no menos de tres muestras compuestas en un día de operación.

En la normatividad mexicana se establecen los límites máximos permisibles para cada uno de los parámetros a controlar en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria (16). En estas normas se establecen diferencias entre las descargas a cuerpos de agua naturales y a la red de alcantarillado. Hasta la fecha esta normatividad no hace distinción entre el tipo de industria, por lo que la autoridad gubernamental correspondiente puede sugerir el monitoreo de parámetros no especificados según sea el caso.

La regulación mexicana especificará el tipo de muestra, al azar o compuesta, para el monitoreo de un efluente, pero considerará los dos tipos si se monitorea dentro de la planta (16). Donde los datos en la planta no existan, conducir un estudio preliminar con el personal de producción de cada unidad de proceso para determinar las reacciones químicas, la variabilidad en la producción y los constituyentes químicos potenciales en cada corriente de desecho. Después de un cuidadoso análisis de la unidad de proceso, seleccionar el tipo de muestra apropiada a ser recolectada. Recolectar muestras compuestas proporcionales para determinar la cantidad promedio de contaminantes o coleccionar muestras al azar:

1. Si va a ser caracterizada una descarga por lotes.
2. Si el flujo es homogéneo y continuo con características de desecho relativamente constantes, una muestra al azar es representativa de la corriente.
3. Cuando se necesitan los extremos de un flujo y sus características de calidad.
4. Cuando se toma una muestra para un parámetro requerido y se utiliza toda la muestra para el análisis sin transferirla a otros recipientes, por ejemplo, grasas y aceites.
5. Cuando se muestrea para parámetros cuyo carácter cambia rápidamente, tales como gases disueltos o aquellos que no pueden ser conservados por un largo periodo de tiempo antes del análisis, por ejemplo, conteo de bacterias, cloro, oxígeno disuelto y sulfuro.

Escoger el muestreo manual o automático de acuerdo al método que sea el mejor para el programa específico de muestreo. Solo personal entrenado debe consignarse la tarea de la colección de la muestra.

El volumen de la muestra a tomarse es determinado por el número de análisis a ser ejecutados en la muestra. Si esto no ha sido determinado, deben ser tomados un volumen de muestra al azar de mínimo 7.57 L y un volumen compuesto individual de 100 mL. El tipo de recipiente también es dependiente del análisis a ser efectuado.

La preservación, los tiempos de conservación y los materiales asociados con el muestreo dependen de los parámetros a ser analizados. Para este propósito, revisar el Capítulo V.

Aguas superficiales y sedimentos

El muestreo de ríos y corrientes naturales, lagos y organismos acuáticos, y sus sedimentos asociados se considera en esta sección. Las decisiones referentes a los parámetros analíticos deben hacerse al inicio del estudio para determinar el orden lógico del programa.

Los principales objetivos del muestreo de aguas superficiales, organismos acuáticos y sedimentos son principalmente:

1. Evaluar la cantidad de organismos presentes, estructura de la comunidad, diversidad de especies, productividad y estabilidad de los organismos acuáticos.
2. Evaluar la calidad y estado trófico del sistema de agua.
3. Determinar el efecto de una descarga específica en cierto cuerpo de agua.

Las aguas superficiales y los sedimentos se analizan comúnmente para determinar ciertos parámetros químicos y biológicos, como los que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Mediciones comunes en el muestreo de aguas superficiales, organismos acuáticos y sedimentos. Traducido de (22).

Químico	Físico	Biológico
Oxígeno disuelto Fosfato Nitrógeno en todas sus formas Alcalinidad Sílice pH Conductividad específica Sólidos (disueltos, suspendidos, totales) Materia y demanda orgánica Plaguicidas Metales pesados	Color Turbiedad Temperatura del agua Velocidad de la corriente Profundidad del agua Composición del sedimento.	Peces Macroinvertebrados bentónicos Perifiton Fitoplancton Zooplancton Macrofitos Macroalgas Bacterias

Seleccione el sitio del estudio con base en los objetivos del programa, los parámetros de interés y el tipo de muestra. Por ejemplo, las siguientes sugerencias pertenecen a un programa de monitoreo de aguas establecido por la EPA para la selección de estaciones de monitoreo biológico continuo y a largo plazo (26):

1. En lugares clave de los cuerpos de agua que son de valor crítico para usos sensibles como abastecimiento de agua potable doméstica, recreación, propagación y mantenimiento de la vida salvaje y peces.
2. Corriente arriba y corriente abajo dentro de la corriente principal en la confluencia de contribuciones mayores, y en la contribución corriente arriba en la confluencia con varias corrientes principales.
3. Cerca de las bocas de los principales ríos donde entran a un estuario.
4. En lugares de cuerpos de agua principales sujetos potencialmente a entradas de contaminantes provenientes de áreas de concentración urbana, industrial o agrícola.
5. En lugares clave en cuerpos de agua no afectados grandemente por las actividades del hombre.

Puede usar planes de muestreo aleatorio o no aleatorio para determinar los puntos de muestreo dentro del sitio de estudio.

Descargas agrícolas

Las descargas agrícolas pueden separarse en tres tipos: residuos de animales concentrados o abono proveniente de un cebadero confinado, escorrentías de una vertiente agrícola y de un flujo de retorno de irrigación. Estos tres tipos de escorrentías difieren principalmente por la concentración de contaminantes. La escorrentía del campo de una lluvia, la irrigación y el deshielo es, característicamente, la menos contaminada, mientras que la escorrentía del cebadero es el residuo más concentrado. Las concentraciones de contaminantes de las escorrentías de campo y del flujo de retorno de la irrigación varían con la cantidad e intensidad de la lluvia o deshielo, de las prácticas de irrigación, uso del suelo, topografía, tipo de suelo y uso de abono o fertilizantes.

Las descargas agrícolas se muestrean para estudiar ambas escorrentías de campo y de cebadero, o para monitorear las escorrentías de campo o cebaderos tratados por reglamentación.

Para la descarga de cebaderos, la frecuencia de muestreo debe seguir lo establecido en la normatividad existente. El muestreo diario es el requerimiento máximo en la mayoría de los casos.

Para escorrentías en campo y flujos de retorno de irrigación, aplique métodos estadísticos. Si es posible, recolecte datos preliminares y aplique un muestreo cada cinco minutos para cada duración de varios eventos de escorrentías. Recolecte y analice las muestras individualmente o forme una muestra compuesta con ellas proporcional al flujo, según los objetivos del estudio. Ya que la mayoría de la variabilidad en las escorrentías ocurre durante la parte inicial del hidrograma de la escorrentía en el lado ascendente de las crestas del flujo, el muestreo es crítico en este momento.

- Localización de los puntos de muestreo para las descargas de cebaderos. La escorrentía del canal del cebadero al punto central y trace una pendiente o un canal si no tiene tratamiento. Si tiene tratamiento, muestre el efluente del sistema de tratamiento.

- Localización de los puntos de muestreo para las escorrentías en campo o flujos de retorno de irrigación. Seleccione un sitio corriente abajo del área de escorrentía en un punto donde la escorrentía se recolecte en un flujo canalizado. Use la topografía del área para localizar este punto. Elija un lugar con suficiente profundidad para cubrir el muestreador sin excavar. El agua de descarga de irrigación debería muestrearse y medirse cuantitativamente en la parte más baja del campo antes de que se mezcle con otras aguas en los drenajes.

El número de muestras para la descarga de cebaderos y escorrentías en campo se determina por requerimientos reglamentarios, y se aplican métodos estadísticos después de que se ha determinado la varianza y la media en un estudio preliminar.

En caso de ser requerido legalmente, puede analizarse: nutrientes (DBO5, DQO, demanda total de oxígeno), parámetros físicos y minerales (sólidos suspendidos y totales), coliformes fecales y estreptococos fecales, sólidos disueltos totales y otros análisis como metales y metaloides, plaguicidas o herbicidas.

No recolecte una sola muestra simple debido a la gran variabilidad de la escorrentía. Recolecte una serie de muestras para análisis, o forme una muestra compuesta de acuerdo al flujo y use uno de los métodos descritos en la sección “Método manual para hacer muestras compuestas” de este libro.

Recolecte las muestras manual o automáticamente. Recolecte muestras discretas de forma separada o haga una muestra compuesta con ellas proporcional al flujo. Para el muestreo de escorrentías en campo, puede usar un sistema automático activado por la escorrentía a través del canal. Si la escorrentía de cebaderos contiene partículas muy grandes, tales como mazorcas de maíz, deberá ser necesario realizar un muestreo manual.

Use múltiples recipientes para las muestras y provea la mejor preservación para los parámetros específicos. Por ejemplo, si se van a analizar nutrientes, demandas de oxígeno, físicos-minerales, microbiológicos, se requerirán tres recipientes y tres técnicas de preservación por cada muestra (Tabla 13).

Tabla 13. Sugerencias para la preservación de muestras para análisis de nutrientes, demandas de oxígeno y microbiológico. Modificado de (22).

Recipiente	Grupo de parámetros	Técnica
1	Nutrientes	Añadir H_2SO_4 a pH 2 o 40-400 mg/L HgCl_2 y refrigerar a 4 °C
2	Demandas, sólidos disueltos totales (parámetros físicos y minerales)	Colocar en hielo lo más pronto posible después de la recolección
3	Microbiológico	Recolectar una muestra simple en un recipiente estéril y colocar en hielo tan pronto como sea posible, no retener por más de 6 h

Seleccione el dispositivo de medición de flujo con base en la aplicación específica y el grado necesario de precisión. Un tipo de canal “H” es ventajoso por su gran rango de precisión. La instrumentación debiera incluir un graficar continuo del flujo u otro dispositivo adecuado para registrar las mediciones.

Agua subterránea

El agua subterránea representa, para el flujo base de todas las corrientes perennes, más del 90 % de todas las fuentes de agua fresca en el mundo, y la mitad del agua para beber en la mayoría de los países, que tradicionalmente recibe solo una parte de la atención científica. A pesar de que las aguas superficiales y subterráneas son partes inseparables del mismo sistema hidrológico, con las aguas de cada uno fluyendo alternativamente entre los dos componentes, los que gestionan el recurso agua con frecuencia lo han considerado como entidades separadas.

Para evaluar el impacto de las actividades humanas en la calidad del agua subterránea, deben ser evaluados, para proveer una base racional para su protección, el comportamiento de los contaminantes sobre la superficie y los procesos que gobiernan este comportamiento. Sin embargo, los que gestionan el recurso agua son generalmente inexpertos en investigaciones del agua subterránea; aprenden con la experiencia que las técnicas aplicables a las aguas superficiales no necesariamente aplican a las aguas subterráneas.

Los métodos de recolección de una muestra de agua subterránea representativa son muchos más difíciles y caros; son ambientes con frecuencia remotos y relativamente inaccesibles. La sección subterránea del suelo es un sistema extremadamente complejo sujeto a amplios cambios físicos, químicos y biológicos dentro de distancias pequeñas tanto en sentido vertical como horizontal.

Las muestras del monitoreo de un pozo representan una parte pequeña de un acuífero horizontalmente y, en muchos casos, verticalmente. A diferencia de su superficie, donde una muestra puede tomarse arbitrariamente en cualquier punto en el sistema, mover un punto de muestreo en un agua subterránea implica la instalación de pozos de monitoreo adicionales. Debido a la dificultad y al costo, es esencial que los objetivos del muestreo se establezcan firmemente, adelantándose a las actividades en campo. Estos objetivos dictarán los parámetros a medir, la fiabilidad necesaria de los datos de la calidad del agua y la metodología analítica, y de ahí los procedimientos de muestreo necesarios para cumplir con estos objetivos.

Si el objetivo es simplemente determinar la presencia o ausencia de un posible contaminante en una fuente de agua en particular, es simple y relativamente no costoso recolectar una muestra en la llave del agua. Sin embargo, si el objetivo es definir la distribución horizontal y vertical de un contaminante o contaminantes orgánicos y predecir el destino eventual, entonces los núcleos de suelo, los pozos de monitoreo y el equipo especial de muestreo pueden incrementar los esfuerzos y los costos en varios órdenes de magnitud.

En el primer caso, el propósito de la recolección de la muestra está limitado en alcance. En el segundo caso, hay una preocupación no referente a datos puntuales como fin en sí, sino componentes de una red que permitan tener información del sistema de agua subterránea, y que se desarrolla con base en la extrapolación de información en las áreas donde no se recolectaron muestras o para predecir los efectos de la tensión natural y antropogénica sobre los sistemas subterráneos.

Características de las aguas subterráneas

La naturaleza inestable de muchos constituyentes químicos, físicos y microbiológicos en el agua subterránea y subsuperficial limita la recolección de la muestra y las opciones de análisis. Sin embargo, ciertos factores deben considerarse para recolectar muestras representativas:

1. El agua subterránea se mueve lentamente; por lo tanto, hay una velocidad lenta de cambio en los parámetros de calidad del agua.
2. Las temperaturas son relativamente constantes en la subsuperficie; por lo tanto, la temperatura de la muestra puede cambiar significativamente cuando se le trae a la superficie. Este cambio puede alterar las velocidades de las reacciones químicas, invierte los intercambios catiónicos y aniónicos en los sólidos y cambia las velocidades de crecimiento microbiano.
3. Puede ocurrir un cambio en el pH debido a la adsorción de dióxido de carbono y cambios subsecuentes en la alcalinidad. Puede ocurrir también la oxidación de algunos compuestos.
4. Los gases disueltos como el ácido sulfhídrico pueden perderse en la superficie.
5. La integridad de las muestras orgánicas puede verse afectada por problemas asociados con la adsorción o contaminación con los materiales de muestreo y por la volatilidad de los compuestos.
6. Los suelos y las aguas subterráneas pueden contaminarse severamente, tanto que pueden representar un problema de salud y seguridad para los muestreadores.

Localización de puntos de muestreo de aguas subterráneas

El área de consideración, el tiempo disponible para el monitoreo y los niveles potenciales de concentración de contaminantes tienen influencia sobre los procedimientos de muestreo seleccionados. Un programa de monitoreo de un área grande o a nivel regional puede permitir el uso de pozos existentes, manantiales o inclusive el flujo base de las corrientes, si estos sistemas son compatibles con los parámetros de interés. Si el

tiempo es crítico, los lugares de muestreo existentes pueden ser la única alternativa. Sin embargo, si la fuente de contaminación posible es relativamente pequeña, como un relleno o laguna, o si las concentraciones del contaminante pudieran ser muy bajas, como sucede con los compuestos orgánicos, pueden ser necesarios pozos de monitoreo especiales. El número y localización de los pozos adicionales necesarios dependen del propósito del monitoreo, características del acuífero y la movilidad de los contaminantes en el acuífero.

Si la fuente potencial de contaminación está sobre el espejo de agua, puede ser necesario muestrear la zona insaturada para obtener una fotografía real del riesgo del agua subterránea. Con la excepción de cloruros, y en menor magnitud nitratos y sulfatos, la mayoría de los contaminantes pueden sorberse en los materiales en la zona insaturada y eliminarse en cierta magnitud bajo condiciones favorables. Por lo tanto, es posible muestrear por años el agua subterránea por debajo de la fuente del residuo y no observar contaminación. Esto puede dar una sensación falsa de seguridad cuando realmente los contaminantes se siguen moviendo muy lentamente a través del perfil insaturado hacia el agua subterránea.

Datos hidrológicos

Los factores geológicos se relacionan principalmente con las formaciones geológicas y sus propiedades conectadas con el agua. Los factores hidrológicos están relacionados con el movimiento del agua en las formaciones.

El conocimiento de la estructura hidrogeológica es importante desde dos puntos de vista:

- (a) Para la predicción del movimiento del agua subterránea.
- (b) Para las consideraciones geoquímicas, las cuales afectan la calidad del agua.

La estructura geológica incluye la litología, textura, estructura y mineralogía, y la distribución de los materiales a través de la cual fluye el agua subterránea. Las propiedades hidráulicas de los materiales de la tierra dependen de su origen y litología, como también de las tensiones subsecuentes a las cuales los materiales han sido sometidos. El movi-

miento del agua subterránea depende de la permeabilidad efectiva y del gradiente hidráulico dentro del acuífero. La permeabilidad está relacionada con la naturaleza, tamaño y grado de interconexión de los poros, fisuras, juntas y otras aberturas.

Previo a cualquier trabajo en campo, deben recolectarse todos los datos geológicos e hidrológicos existentes, compilados e interpretados. Los datos que probablemente se deban disponer incluyen: mapas geológicos, secciones transversales, fotografías aéreas y un arreglo de los pozos de agua, incluyendo datos de localización, fechas de perforación, profundidad, nombre del perforador, nivel del agua y fecha, métodos de consumación de pozos, uso del pozo, registros de electricidad o radioactividad u otros datos geofísicos, muestras de formación, pruebas de bombeo y datos de la calidad del agua. Después de compilar y revisar totalmente los datos recolectados, el investigador puede planear apropiadamente el tipo de investigación necesaria, incluyendo los datos faltantes para llenar los vacíos. Con esto, diseñar el muestreo necesario, parámetros, frecuencia y localizaciones.

Las mediciones del nivel de agua son datos preliminares básicos importantes usados con frecuencia en la selección de los sitios de muestreo, equipo y procedimientos. Los datos del nivel de agua pueden obtenerse de pozos, piezómetros o a partir de las manifestaciones del agua superficial del sistema de agua subterránea, tales como manantiales, lagos y corrientes. La profundidad del agua puede determinar el tipo de bombas o muestreadores usados y los procedimientos y costos de la construcción de los pozos de monitoreo. Los contornos del nivel del agua dibujados a partir de niveles estáticos en pozos que penetran el mismo acuífero pueden usarse para hacer determinaciones preliminares de la dirección global del flujo. Note que los pozos de bombeo cercanos u otras descargas artificiales o recargas pueden alterar el gradiente natural.

Consideraciones hidrogeológicas

La naturaleza heterogénea de los ambientes subterráneos hace de la localización de puntos de muestreo una ciencia impredecible cuando se trata de interceptar una pluma de contaminación. Las condiciones

hidrogeológicas son específicas del sitio y es imposible prescribir lugares estándar para los puntos de muestreo que sean aplicables a todos los sitios. En un acuífero con porosidad intergranular, como las arenas, gravas, rocas arenosas y cieno, el agua se encuentra en los espacios vacíos interconectados entre las partículas individuales del material del acuífero. Es claramente identificable que la localización horizontal de un pozo de monitoreo en relación con la fuente de contaminación determina si el agua contaminada se intercepta. Además, la localización vertical del colador del pozo y otros aspectos de la construcción del mismo también afectan la calidad de una muestra recolectada en el pozo. El colador del pozo debe localizarse sobre o por debajo de la zona de contaminación, y suponer que los sellos apropiados se encuentran sobre o debajo de la zona de contaminación; las muestras de este pozo pueden fácilmente indicar que no tienen contaminación a menos que se bombee lo suficiente para cambiar el patrón del flujo del agua subterránea. Por otro lado, si el colador del pozo no se sella adecuadamente de las otras zonas subterráneas o si el grosor total saturado no está aislado, las muestras de este pozo podrían representar una muestra compuesta del agua proveniente de diferentes zonas y las concentraciones no serían representativas. Además de esto, tal construcción del pozo puede proveer un conducto para el movimiento de la contaminación de una zona a otra.

Los patrones de flujo del agua subterránea pueden desarrollarse a partir de los niveles de control del agua. Sin embargo, el movimiento real de una pluma podría ser más complejo. Por ejemplo, en un ambiente geológico tal como aluvión o depósitos de terraza que involucran permeabilidades intergranulares, la forma de la pluma puede controlarse por cambios abruptos en las permeabilidades tales como los canales de grava. Tales cambios en permeabilidad son comunes en las formaciones geológicas depositadas en el río y pueden afectar grandemente la forma y velocidad del movimiento de las plumas de contaminación.

La hidrogeología se complica más por los diferentes patrones de flujo de los diferentes contaminantes. El agua subterránea contaminada con un contaminante denso como el cloruro crea una pluma que tiende a migrar a la base del acuífero. En cambio, los contaminantes más ligeros como los hidrocarburos tienden a “flotar” cerca de la parte superior de

la zona saturada. Además, contaminantes diferentes se mueven a través de la capa subterránea a diferentes velocidades relativas a la velocidad del movimiento del agua debido a la adsorción, desorción, intercambio iónico y biodegradación. Por lo tanto, los puntos de máxima concentración de los diferentes contaminantes a lo largo del flujo de agua subterráneo probablemente varíen considerablemente.

Los patrones de flujo en el agua subterránea son menos predecibles en rocas fracturadas o en acuíferos de porosidad en solución que en acuíferos con porosidad intergranular. Los patrones de flujo generalmente se controlan por patrones de fracturas. Obviamente, el problema en localizar pozos de monitoreo en una geología como esa es interceptar fracturas o canales de solución que están conectados hidráulicamente a la fuente de contaminación. Es posible en muchas formaciones de este tipo perforar un pozo que esté seco y alejarse unos metros y perforar otro que esté lleno de agua. Sin embargo, ningún pozo podría estar conectado hidráulicamente a una fuente de contaminación sólo a unos metros de distancia.

En algunas formaciones rocosas fracturadas donde cavar no es un problema es posible completar un pozo de monitoreo como un hoyo abierto sin usar una malla en el pozo. En la mayoría de tales pozos es aconsejable, sin embargo, instalar un revestimiento (lechadas de cemento en el lugar) hasta por lo menos la profundidad planeada para colocar la bomba. Deben tenerse cuidados especialmente en formaciones de roca fracturada, tales como, piedra caliza para mantener el factor de profundidad específico para los pozos de monitoreo. Los pozos con una abertura mucho mayor pueden interceptar varias zonas fracturadas dando como resultado una intercomunicación entre las capas y el muestreo de aguas mezcladas.

A pesar de la complejidad y en lugar de un estudio hidrogeológico, hay varias guías básicas que pueden usarse en la localización de los pozos de monitoreo basados en las consideraciones previamente anotadas. Para la ubicación de pozos de monitoreo en rellenos sanitarios es necesario consultar bibliografía especializada.

Consideraciones de fondo

Un componente necesario de cualquier programa de monitoreo de agua subterránea es el muestreo de referencia preliminar. Ocasionalmente, es posible muestrear la calidad del agua subterránea de un área antes de que una fuente de contaminación se introduzca. Esto es deseable y puede volverse más común en el futuro como protección cuando la calidad del agua subterránea se convierta en parte de una operación normal y rutinaria. En la mayoría de los casos, una fuente potencial de contaminación es ya una realidad y el objetivo es recolectar una muestra que esté fuera de la influencia de la fuente para comparación. Otra consideración es que el análisis de una muestra previa no incluya el parámetro que actualmente sea de interés o que las capacidades analíticas hayan mejorado con el tiempo para ciertos parámetros.

Un método de monitoreo recomendado para la detección de la contaminación en rellenos sanitarios es la localización de un pozo previo pendiente arriba del relleno y un mínimo de tres pozos pendiente abajo y a un ángulo perpendicular al flujo del agua subterránea, que penetre el grosor saturado completo del acuífero. Tal arreglo se ilustra en la Figura 4 y es aplicable para la mayoría de puntos de fuentes potenciales de contaminación.

Si hay una razón real para sugerir que la contaminación ya ha ocurrido y el objetivo es definir la pluma de contaminación, esto puede permanecer como un enfoque inicial razonable. Sin embargo, es extremadamente importante localizar pozos de monitoreo subsecuentes uno a la vez, muestrear y basar los sucesivos lugares de los pozos en los resultados de muestreos previos. Bajo ninguna circunstancia debe perforarse la totalidad de la serie de pozos de monitoreo pasados en su totalidad en la predicción inicial de la dirección de la pluma. Aun con la mejor información previa disponible, hay una probabilidad muy alta de que un gran porcentaje de estos pozos perderán la pluma de contaminación debido a la naturaleza heterogénea de las permeabilidades subterráneas.

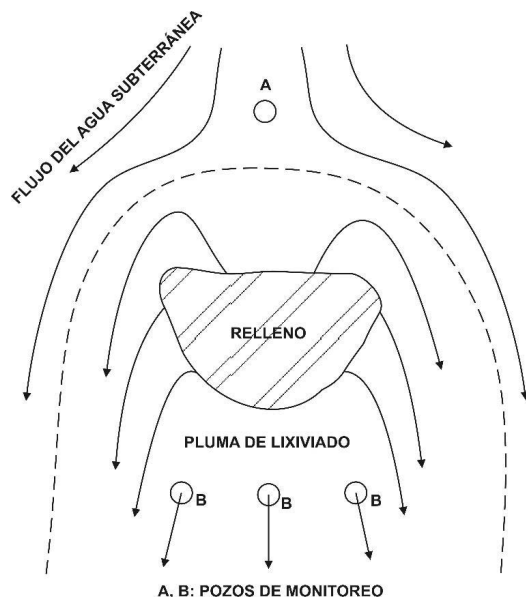


Figura 4. Red de monitoreo ideal para un relleno. Modificado de (26).

Recolección de muestras de agua subterránea

La importancia de un muestreo apropiado de pozos nunca debe subestimarse. Aun cuando el pozo a ser muestreado esté correctamente localizado y construido, deben tomarse precauciones especiales para asegurar que la muestra tomada de ese pozo es representativa del agua subterránea en ese lugar y que la muestra no ha sido alterada o contaminada por el procedimiento de muestreo y de manipulación (27).

En el muestreo de aguas subterráneas o cuerpos de agua naturales debe considerarse el tipo de contaminante de interés, si es un líquido no acuoso de fase ligera (LNAPL, siglas en inglés de *Light Non-Aqueous Phase Liquid*) o un líquido no acuoso de fase densa (DNAPL, siglas en inglés de *Dense Non-Aqueous Phase Liquid*). Los muestreadores deben usar un recipiente de boca ancha para el muestreo de capas superficiales. El recipiente de muestreo debe ser controlado manualmente o usando un palo, pero no por medio de una cuerda, ya que no es posible controlar el recipiente de muestreo en la superficie. En situaciones donde es esencial la muestra a profundidades específicas debajo de la superficie, o cuando

se muestrean gases disueltos, es esencial que sean usados dispositivos especializados (27).

Muestras representativas de aguas subterráneas

Para obtener una muestra representativa de agua subterránea, debe entenderse que la composición del agua dentro de la carcasa del pozo y en la proximidad más cercana al mismo probablemente no sea representativa de toda la calidad del agua subterránea en el sitio de muestreo. Esto es debido a la posible presencia de contaminantes por la perforación del pozo y porque las condiciones ambientales importantes, como el potencial de óxido-reducción, pueden diferir drásticamente cerca del pozo de las condiciones en los materiales de los alrededores relacionados con el agua. Por estas razones es altamente deseable que un pozo sea bombeado o baldeado hasta que el pozo sea completamente purgado del agua estancada y contenga agua fresca proveniente del acuífero. El periodo de tiempo requerido para bombear o lavar un pozo antes de muestrearlo depende de muchos factores, incluyendo las características del pozo, la naturaleza hidrogeológica del acuífero, el equipo de muestreo usado y los parámetros a ser muestreados. El tiempo requerido puede tener un rango desde el tiempo necesario para bombear o lavar un volumen de la perforación a un tiempo necesario para bombear varias veces el volumen de la perforación. Un procedimiento común es bombear o lavar el pozo hasta que un mínimo de cuatro a diez volúmenes de perforación haya sido eliminado.

Otros factores que influirán en el tiempo requerido para lavar un pozo antes del muestreo incluyen la velocidad de bombeo y la colocación del equipo de bombeo dentro de la columna de agua en la perforación del pozo. Debe tenerse cuidado para asegurar que toda el agua dentro de la perforación del hoyo es cambiada con agua fresca. Por ejemplo, estudios recientes han mostrado que, si una bomba es bajada inmediatamente al fondo de un pozo antes de bombear, le puede tomar algo de tiempo a la columna de agua sobre la bomba intercambiarse si la transmisividad del acuífero es alta y la malla del pozo está en el fondo de la carcasa. En tales casos, primero bombeará principalmente agua del acuífero.

Para eliminar toda el agua de la perforación del pozo, solo es posible si se bombea hasta sequedad y es probable que se tengan dos escenarios:

- (a) Monitorear el nivel del agua en el pozo mientras se bombea. Cuando el nivel del agua se ha “estabilizado”, más si no toda el agua ha sido bombeada, proviene del acuífero.
- (b) Monitorear la temperatura y pH del agua mientras se bombea. Cuando estos dos parámetros se “estabilicen”, es probable que poco o nada de agua se bombee de la carcasa.

Recolección de la muestra

Esta sección se centra principalmente en la recolección de las muestras de agua de la zona saturada subterránea. El tipo de sistema usado es una función del tipo y tamaño de la construcción del pozo, nivel de bombeo, tipo de contaminante, procedimientos analíticos y de la presencia o ausencia de dispositivos de bombeo permanentes. Idealmente, los mecanismos para retirar la muestra deben ser completamente inertes; económicos de manufacturarse; de limpieza fácil, esterilizados y de reuso; capaces de operar en sitios remotos en ausencia de fuentes externas de energía; y capaces de entregar velocidades de flujo continuo pero variables para el lavado del pozo y recolección de la muestra.

La mayoría de los pozos de abastecimiento de agua contienen bombas montadas semipermanentemente, las cuales limitan las opciones disponibles para el muestreo de agua subterránea. Las bombas permanentes en el lugar pueden ser turbinas con eje de transmisión, comúnmente usadas para pozos de gran capacidad; las bombas sumergibles, muy comúnmente usadas en pozos domésticos para cabeza alta, aplicaciones de baja capacidad y, más recientemente, usos municipales e industriales; y bombas de chorro, comúnmente usadas para pocas profundidades, para suministros de agua domésticos de baja capacidad. La ventaja de las bombas en el sitio es que las muestras de agua están fácilmente disponibles y el agua no representativa estancada en la perforación del pozo generalmente no es un problema. Las desventajas son que el bombeo excesivo puede diluir o incrementar las concentraciones del contaminante de lo que es representativo del punto de muestreo, que los pozos de abastecimiento

de agua pueden producir agua a partir de más de un acuífero, y la contaminación y/o adsorción puede ser un problema cuando se muestrean compuestos orgánicos.

La ventaja de recolectar muestras de agua de los pozos de monitoreo sin bombas en el lugar es la flexibilidad de seleccionar el equipo y los procedimientos. La principal desventaja es la posibilidad de no tener una muestra representativa, aun recolectándola a través del agua estancada que está en la perforación del pozo o por introducir contaminación desde la superficie causada por el equipo de muestreo o por los procedimientos.

Existen en el mercado una gran variedad de equipos para muestreo de aguas subterráneas, la mayoría diseñados para propósitos específicos y preservar bajo condiciones adecuadas parámetros ya establecidos; si el lector está interesado en estos dispositivos, se le sugiere que revise los catálogos de proveedores de equipos de muestreo.

Agua para uso y consumo humano

Como queda asentado en la normatividad mexicana vigente hasta la fecha de publicación de este libro, se establecen las disposiciones y especificaciones sanitarias que deben cumplir el agua y el hielo para consumo humano envasados y a granel, excepto la que es consumida directamente de los sistemas de abastecimiento (28) (29). Esta normatividad divide en categorías los parámetros a controlar:

- Especificaciones organolépticas y físicas: olor, sabor, color y turbiedad.
- Especificaciones microbiológicas: coliformes totales.
- Contaminantes: arsénico, cloro, cadmio, fluoruros, níquel, plata, plomo, selenio, cianuros, nitratos, nitritos, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), cloro residual, formaldehído, trihalometanos, ozono y anhídrido carbónico.
- Plaguicidas: aldrín, dieldrín, clordano, DDT e isómeros, lindano, hexaclorobenceno, heptacloro, epóxido de heptacloro, metoxicloro y 2,4-D.

La normatividad mexicana considera dos tipos de agua para consumo humano: a granel y preenvasada (29). El agua a granel para consumo

humano es la que no contiene materia extraña, ni contaminantes, ya sean químicos, físicos o microbiológicos, que causen efectos nocivos a la salud, que es suministrada en presencia del consumidor. El agua preenvasada para consumo humano es de cualquier origen, que no contiene materia extraña, ni contaminantes, ya sean químicos, físicos o microbiológicos, que causen efectos nocivos a la salud y para su comercialización se presenta al consumidor en recipientes cerrados, incluyéndose, entre otras, al agua de manantial, agua mineral, agua mineralizada.

El procedimiento de muestreo para los tipos de agua considerados en el párrafo anterior se debe sujetar a las siguientes disposiciones.

Una vez abierta la tapa o cuando la muestra sea de producto a granel, el periodo máximo que debe transcurrir entre la toma de muestra y el inicio del análisis debe ser de 6 horas. De no ser así, se tendrá que mantener la muestra refrigerada.

En el caso de agua y hielo a granel, la toma de muestra se realizará de la siguiente forma:

1. La persona que tomará las muestras se lavará las manos antes de hacer la toma de muestra o, en su defecto, usará guantes desechables estériles.
2. En caso de que la empresa ponga recipientes a disposición del consumidor, se tomarán las muestras de agua o hielo en recipientes de la compañía.
3. Los recipientes para la toma de muestra deben abrirse cerca de la toma de salida, al momento de introducir la muestra y cerrarlos de inmediato. No se debe tocar la boca ni el interior del recipiente, así como el dispositivo de suministro, y debe evitarse que la tapa se contamine.
4. Debe llenarse siempre el recipiente en el que se tome la muestra.
5. Cuando la empresa no ofrezca el recipiente, las muestras para análisis microbiológico se tomarán en recipientes estériles.
6. Cuando se trate de hielo en barra, se debe esperar una barra; posteriormente, se toma la muestra de distintas partes de la misma, distribuidas de manera aleatoria.
7. En el caso de hielo molido, se tomarán muestras de distintas partes del recipiente de manera aleatoria, por medio del equipo que utilice la compañía.

Muestreador bailer

Uno de los métodos más antiguos y más simples para el muestreo de agua en pozos es el uso de *bailer* (palabra del idioma inglés que se usará en este libro por no existir una equivalencia en español). Un *bailer* (Figura 4.a) puede tener la forma de una botella con peso o un trozo de tubo tapado sobre una cuerda o alguna modificación de lo mismo, el cual se baja y sube generalmente a mano. También puede usarse el muestreador Kemmerer modificado (Figura 4.a) tanto para el muestreo de aguas superficiales como para aguas subterráneas. El *bailer* de teflón fue desarrollado específicamente para recolectar muestras de agua subterránea para el análisis de compuestos orgánicos volátiles.

- Ventajas del *bailer*:
 1. Puede construirse a partir de una gran variedad de materiales compatibles con los parámetros de interés.
 2. Son económicos y convenientes, y puede usarse uno por cada pozo para minimizar la contaminación cruzada.
 3. No requiere de energía externa.
 4. 4. Bajar a la superficie en la relación de volumen reduce el desprendimiento de compuestos orgánicos volátiles.
- Desventajas del *bailer*:
 1. Algunas veces es impráctico evacuar el agua estancada en la perforación de un pozo con un *bailer*.
 2. Transferir la muestra de agua de un *bailer* a un frasco de muestreo airea la muestra.
 3. La contaminación cruzada puede ser un problema si el equipo no se limpia adecuadamente después de cada uso.

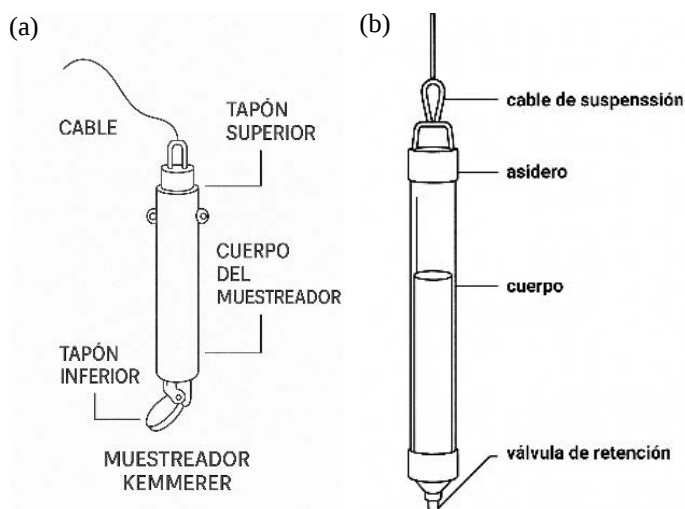


Figura 5. (a) Muestreador Kemmerer modificado. (b) Bailer de teflón.

Bombas de altura de aspiración

Hay una gran variedad de bombas disponibles que pueden usarse cuando el espejo de agua está dentro de la altura de aspiración, esto es, menos de aproximadamente 60 cm. Las bombas centrífugas son las más comúnmente disponibles, son portátiles y tienen velocidades de bombeo que van desde los 5 a los 40 galones por minuto. La mayoría requiere una válvula de pie al final del tubo de succión para ayudar a mantener la carga (Figura 5.a).

Las bombas peristálticas son generalmente bombas de succión de bajo volumen adecuadas para el muestreo a baja profundidad, en pozos de diámetros pequeños. Las velocidades de bombeo son generalmente bajas, pero se pueden controlar dentro de los límites deseados. Una limitación muy significativa son las bajas velocidades de bombeo usadas inicialmente para llevar completamente la perforación del pozo. Otra limitación es la energía eléctrica requerida. Hay bombas de diafragma operadas a mano y pueden ser operadas sobre un amplio rango de velocidades de bombeo, lo cual facilita la evacuación rápida de la perforación del pozo inicialmente y el control de las velocidades bajas de bombeo para el muestreo subsiguiente. Otra gran ventaja es la transportabilidad.

- Ventajas:
 1. Generalmente, las bombas de altura de aspiración son fáciles de encontrar, relativamente portátiles y no son costosas.
- Desventajas:
 - El muestreo está limitado a las situaciones de agua subterránea donde los niveles son menores a 60 cm.
 - Puede dar como resultado la pérdida de compuestos orgánicos volátiles.

Bombas portátiles sumergibles

Las investigaciones de aguas subterráneas rutinariamente requieren la recolección de muestras desde profundidades que con frecuencia exceden las limitaciones convencionales de los equipos de muestreo. Un sistema usado para estos casos son las bombas sumergibles (Figura 5.b), que pueden bajarse o elevarse por el pozo de observación; usa 91 m de manguera que soporta el peso de la bomba, transporta el agua del pozo, guarda el cable eléctrico, un cabestrante eléctrico y un carrete de ensamble. Un generador portátil provee de electricidad para la bomba y el cabestrante, todo el ensamble que puede montarse sobre una camioneta.

- Ventajas:
 1. Portátil. Puede usarse para muestrear varios pozos de monitoreo en un breve periodo de tiempo.
 2. Depende del tamaño de la bomba y de las profundidades de bombeo, se pueden tener velocidades de bombeo relativamente grandes.
- Desventajas:
 1. Las bombas sumergibles disponibles requieren de un mínimo de carcasa en el pozo con un diámetro interior mínimo de 8 cm.
 2. Requiere de servicios de un tipo de vehículos relativamente grandes, como una camioneta.
 3. Con los materiales de construcción convencionales, no son adecuadas para muestrear compuestos orgánicos.

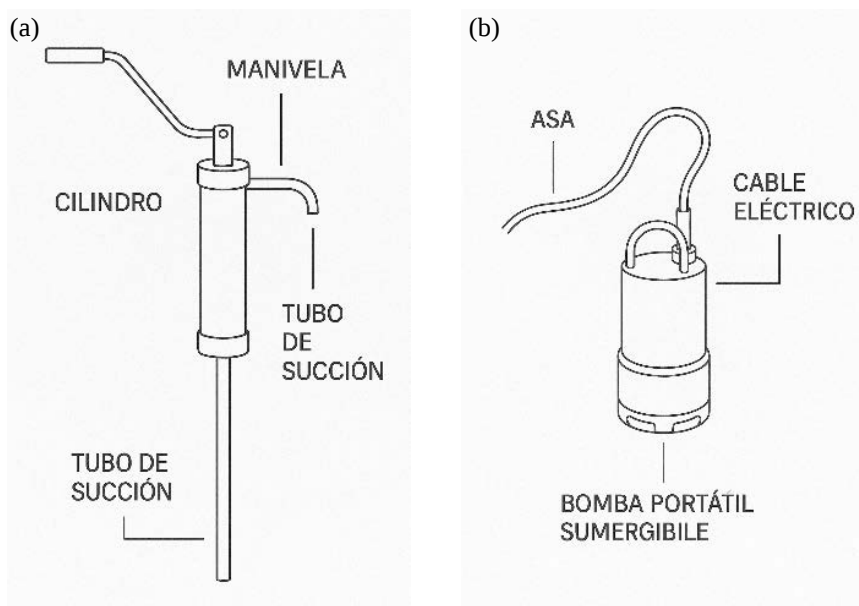


Figura 6. (a) Bomba de altura de aspiración. (b) Bomba portátil sumergible para muestreo de aguas.

Muestreadores que elevan agua con aire

Hay una variedad de adaptaciones al método básico de aplicar aire a presión en un pozo de agua para descargar la muestra de agua por un tubo. Puede usarse una bomba de mano de alta presión y cualquier tubería razonablemente flexible como una unidad de muestreo portátil. Pueden requerirse un pequeño compresor de aire y algunos arreglos de tubería más elaborados para grandes profundidades. La principal limitación de este muestreador es la alteración potencial de los parámetros de la calidad del agua, la cantidad de aire a presión que puede aplicarse de forma segura a la tubería y encontrar una fuente adecuada para la compresión de aire.

- Ventajas:
 1. Puede usarse como un sistema de muestreo instalado permanentemente o portátil.
 2. Puede usarse para la prebomba y la muestra.
- Desventajas:

1. No es adecuada para parámetros sensibles al pH como los metales.
2. Si se usa aire u oxígeno, la oxidación es un problema.
3. Pueden perderse compuestos volátiles debido a la purga.

Pretratamiento del equipo de muestreo

La técnica de pretratamiento del equipo debe estar dictada por el análisis a realizar. La técnica de pretratamiento general para recipientes de muestreo y almacenamiento es:

1. Lavar los frascos con agua caliente y detergente.
2. Enjuague completamente con agua potable seguido de tres o más enjuagues con agua libre de materia orgánica.
3. Enjuague con un solvente redestilado y libre de interferencias, tal como acetona o cloruro de metileno, y seque al aire libre de contaminación a temperatura ambiente. Proteja de la contaminación atmosférica y otra fuente. Las tapas y los recubrimientos de los frascos también deben ser enjuagados de la misma manera.

Si se van a emplear muestreadores automáticos, use el tipo de bomba peristáltica con un solo recipiente de vidrio de 8 a 10 L. Pueden usarse los muestreadores automáticos al vacío si los recipientes para la muestra son de vidrio. El procedimiento descrito anteriormente es aplicable para el pretratamiento de los recipientes. Además, toda la tubería y otras partes del sistema de muestreo deben tallarse con agua caliente y detergente y enjuagarse completamente con agua potable y agua blanca antes de usarse. Se aconseja un enjuagado posterior con acetona o cloruro de metileno libre de interferencias cuando la tubería u otras partes lo permitan, esto es, que no sean susceptibles de ser atacados por el solvente.

Capítulo 4

Importancia del muestreo microbiológico

El análisis microbiológico del agua es fundamental para garantizar la seguridad y la salud pública, ya que permite detectar la presencia de microorganismos patógenos que pueden causar enfermedades. La calidad del agua es una estrategia básica en el desarrollo de las bases científicas para el manejo de los recursos hídricos y la toma de decisiones para la protección de ecosistemas y prevención de enfermedades (30). El monitoreo de la calidad del agua consiste en realizar una serie de procedimientos para determinar el grado de contaminación de los cuerpos de agua (ej., ríos, arroyos, presas, lagos) y sistemas hídricos (ej., tanques de almacenamiento, redes de distribución de agua potable, sistemas de tratamiento). La calidad del agua está determinada por el análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos. Los parámetros biológicos involucran una gran diversidad de organismos vivos que sirven de indicadores para la calidad del agua; los más importantes son bacterias, cianofíceas, hongos, virus, protozoos, parásitos invertebrados, algas, macroinvertebrados y peces. Sin embargo, todos ellos forman parte de los ecosistemas hídricos y las acciones humanas pueden condicionar su crecimiento, desarrollo o muerte (31).

La calidad del agua es una estrategia básica para el manejo de los recursos hídricos y la toma de decisiones en la protección de ecosistemas y prevención de enfermedades (30). Este capítulo está enfocado en el muestreo microbiológico, porque de ello depende el cincuenta por ciento del resultado que obtenemos en el análisis de la calidad del agua; un “muestreo de calidad garantiza un resultado de calidad” (32) (33). Aquí se explican en detalle los procedimientos, técnicas y normativas relacionadas con el muestreo microbiológico del agua. Nuestro objetivo es brindar una visión integral de cómo se lleva a cabo el muestreo en diferentes fuentes de agua, garantizando que el proceso cumpla con los estándares más exigentes de calidad y seguridad, así como con las normas mexicanas establecidas para el muestreo del análisis microbiológico.

El análisis microbiológico es, de los parámetros de calidad del agua, uno de los más importantes debido a su relevancia en salud pública, especialmente en los sistemas de abastecimiento de agua potable y en los sistemas de tratamiento de agua, donde se verifica la efectividad de los procesos de desinfección. Estos controles aseguran que el agua tratada

sea apta para el consumo o para ser vertida de vuelta al ambiente sin riesgos de causar contaminación (32). Instituciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) (34) han establecido límites máximos permisibles de ciertos microorganismos en el agua potable para garantizar que sea segura para las poblaciones. Los microorganismos más comunes en el agua que pueden provocar enfermedades y que son indicadores de contaminación fecal son la *E. coli*, así como los coliformes totales, coliformes termotolerantes, enterococos, estreptococos, *Clostridium perfringens*, *Pseudomonas aeruginosa*. Además, existen otras más patógenas que pueden también ser causantes de enfermedades diarreicas agudas (EDA) de origen hídrico como la *Salmonella* spp., *Shigella* spp. y *Campylobacter* spp., *Campylobacter jejuni*, *Vibrio cholerae* O1, *Aeromonas* spp., *Bacteroides fragilis*, *Clostridium difficile* y *Cryptosporidium parvum*, *V. cholerae* O139; y entre los patógenos parásitos *Cryptosporidium*, *Giardia* y *Entamoeba* spp. Los virus más comunes en el agua son el virus de la hepatitis A y B, y el virus de la polio. Muchos de estos microorganismos pueden ser eliminados con cloro o por diversas tecnologías relativamente sencillas (35).

En México, la normatividad ha establecido rigurosas pautas y procedimientos para garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano, así como los procedimientos de la toma de muestra.

Los principales parámetros microbiológicos que se analizan en el agua para garantizar su calidad y seguridad son:

1. Bacterias que pueden ser beneficiosas o patógenas. Bacterias coliformes fecales como *Escherichia coli* son indicadores de contaminación fecal.
2. Virus: Los patógenos como rotavirus y norovirus pueden causar gastroenteritis.
3. Protozoos son organismos como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* que pueden sobrevivir a tratamientos de cloración y causar enfermedades.
4. Algas y cianobacterias: algunas producen toxinas que afectan la salud humana y animal.

Un aspecto importante del conocimiento del muestreo microbiológico es identificar cuáles son las principales fuentes de agua de acuerdo a los usos, porque en cada caso implica un procedimiento de muestreo y análisis de la calidad del agua diferente.

Las fuentes de uso de agua en relación con la normatividad mexicana son:

- a) Aguas residuales y cuerpos de agua receptores (ej., ríos, arroyos, presas). Este tipo de agua es fácil de identificar para realizar el muestreo microbiológico. Las aguas residuales que provienen de una descarga de agua puntual de un proceso productivo que es fácil de identificar porque siempre tiene un canal conductor hacia un cuerpo de agua receptor o alcantarillado. En el caso de hacer el muestreo directamente en un cuerpo de agua superficial, el muestreo de calidad de agua de los cuerpos de agua debe hacerse conforme a la normativa mexicana establecida para garantizar la conservación de estos recursos.
- b) Agua potable de la llave o grifo, cisterna o pozo. Es generalmente agua para uso humano y en México no se considera de ingesta, solo para realizar las actividades domésticas. Generalmente, el agua se toma de una llave o grifo, pero también se puede muestrear cuando procede de una cisterna o un pozo de agua profundo o artesanal, el cual tiene un sistema de bombeo para tomar la muestra de agua. En el caso de los organismos e instituciones de gobierno encargadas del suministro de agua, deben garantizar el acceso de agua de calidad para sus poblaciones.
- c) Agua para ingesta, embotellada, envasada, hielo para consumo humano. Es agua que podemos consumir por ingesta y que debe tener los indicadores de calidad más estrictos; generalmente aplica para empresas comercializadoras de agua y todos sus productos derivados para el consumo humano, y para lo cual la Secretaría de Salud tiene especificaciones al respecto.
- d) Agua tratada para reuso. En este caso es agua que se quiere analizar para garantizar el reuso de agua tratada en sistemas de riego en jardines o agricultura; para tal caso debe cumplir con parámetros microbiológicos específicos y normatividad establecida, la cual explicaremos más adelante, en particular al tipo de muestreo.

- e) Agua de uso recreativo. La calidad del agua de albercas, fosas o cualquier sistema usado para nadar o bañarse también debe garantizar algunos parámetros microbiológicos importantes establecidos en la normatividad.

México cuenta con diversas normas para garantizar la calidad del agua y en ellas se especifican también los métodos de muestreo. El agua de la llave o grifo es agua potable y se define como aquella agua para uso y consumo humano, que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos, y que no causa efectos nocivos para la salud según SSA (28). El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor. Sin embargo, la norma no es aplicable para el agua de ingesta. En el ámbito de la seguridad y calidad del suministro de agua, se establecen pautas rigurosas para garantizar que el agua sea segura para el consumo humano. Entre estas pautas, se encuentra la desinfección con cloro o sus derivados. En caso de que se utilicen otros métodos para la desinfección del agua en el sistema de abastecimiento, las autoridades sanitarias pueden requerir la adición de cloro al agua distribuida para mantener una concentración de cloro residual libre dentro de los límites permitidos.

Los criterios de calidad en la NOM-201-SSA1-2015 son de cumplimiento obligatorio para los establecimientos que comercializan productos y servicios como es agua embotellada y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Entre estos criterios están los límites permisibles y métodos de prueba para análisis microbiológico, los cuales son más estrictos con respecto a otros para tipos de aguas, por tener impacto a la salud humana.

En la misma norma están detallados los métodos de análisis microbiológicos y los procesos de muestreo. Para los criterios de calidad microbiológicos indica la determinación de coliformes fecales y *E. coli* por la técnica del Número Más Probable (NMP).

En particular, para el método de muestreo de microorganismos para aguas de consumo humano, también se especifican lineamientos en la NOM-230-SSA1-2002; esta última es aplicable a instalaciones de tratamiento de aguas para uso y consumo humano, además de requisitos para el control microbiológico de aguas residuales tratadas.

Para la calidad del agua de cuerpos receptores de propiedad de la nación como ríos, arroyos y lagos, la norma aplicable es la NOM-001-SEMARNAT-2021. En esta norma solo hay lineamientos generales para el muestreo, por lo que es necesaria la aplicación de otras normas de apoyo, tales como la NMX-AA-014-1993 (muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, excluyendo aguas estuarinas y aguas marinas), la NMX-AA-003-1980 (muestreo de descargas de aguas residuales), la NOM-245-SSA1-2010 (criterios de calidad del agua para albercas y especificaciones para muestreo). En todas las normas anteriores, además de establecer los criterios de calidad sanitaria, se detallan los métodos de prueba microbiológicos. Como ejemplo, para la determinación de microorganismos en agua por el método de prueba en la NMX-AA-042-SCFI-2015, que consiste en la enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* a través del número más probable en tubos múltiples. También en la misma se considera el tipo de muestreo que debe realizarse según el tipo de agua.

El muestreo y el método de análisis dependen del tipo y uso de agua; en la Tabla 14 están relacionados con normas mexicanas y otros métodos de referencia estandarizados.

Tabla 14. Análisis microbiológico y tipo de muestreo según el uso de agua. Elaboración propia considerando las normas mexicanas y otras fuentes.

NOM Fuente de agua	Microorganismo	Métodos de análisis y/o muestreo
NOM-001-SE-MARNAT-2021. Aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.	Coliformes totales, termotolerantes (fecales) y <i>E. coli</i>	ISO 9308-1:2014. <i>Escherichia coli</i> y bacterias coliformes Método de filtración por membrana. NMX-AA-042-SCFI-2015. Coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y <i>E. coli</i> . Método del NMP en tubos múltiples. NMX-AA-014-1993. Muestreo de cuerpos receptores. NMX-AA-003-1980. Muestro de aguas residuales.
	Enterococos fecales	NMX-AA-120-SCFI-2006. Enterococos por método de sustrato cromogénico. NOM-210-SSA1-2014. <i>Salmonella</i> spp. <i>S. aureus</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , enterococos, coliformes fecales, <i>E. coli</i> . Método de referencia para el aislamiento.
	Huevos de helmintos	NMX-AA-113-SCFI-2012. Huevos de helminto por observación microscópica. Método de muestreo.
	Toxicidad aguda (bioensayo) <i>Vibrio fischeri</i>	ISO 113483:2007. <i>Vibrio fischeri</i> , prueba de bacterias luminiscentes. NMX-AA-112-SFCI-2017. Evaluación de la toxicidad aguda con <i>Vibrio fischeri</i> . Método de muestreo.
NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano.	<i>E. coli</i> o coliformes termotolerantes	NOM-210-SSA1-2014. <i>Salmonella</i> spp, <i>S. aureus</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , enterococos, coliformes fecales, <i>E. coli</i> . Método de referencia para el aislamiento. NOM-230-SSA1-2002. Requisitos para el control microbiológico del agua residual tratada. Método de muestreo.
	Algas, fitotoxinas, microcistina-LR	NOM-127-SSA1-2021. Microcistinas y nodularinas por extracción en fase sólida y cromatografía líquida y espectrometría de masas en tándem. Método de muestreo.

	<i>Giardia lamblia</i>	NOM-127-SSA1-2021. Quistes de <i>Giardia lamblia</i> . Método de muestreo.
NOM-201-SSA1-2015. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel.	Coliformes totales	NOM-210-SSA1-2014. <i>Salmonella</i> spp, <i>S. aureus</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , enterococos, coliformes fecales, <i>E. coli</i> . Método de referencia para el aislamiento. NOM-201-SSA1-2015. <i>Pseudomonas aeruginosa</i> . Método de prueba para el NMP. Esporas de <i>Clostridium</i> sulfito reductores.
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	
	Enterococos fecales	
	Esporas de <i>Clostridium</i> sulfito reductores	
NOM-003-SEMARNAT-1997. Aguas residuales tratadas para reuso en servicios al público.	Coliformes totales, termotolerantes (fecales) y <i>E. coli</i>	NMX-AA-042-SCFI-2015. Coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y <i>E. coli</i> por el método NMP en tubos múltiples. NMX-AA-003-1980. Método de muestreo.
	Huevos de helminto	NMX-AA-113-SCFI-2012. Número de huevos de helminto por observación microscópica. Método de muestreo.
NOM-245-SSA1-2010. Aguas recreativas, albercas.	Coliformes fecales	NOM-245-SSA1-2010. Coliformes fecales. Método del número más probable (NMP). <i>Naegleria</i> spp y <i>Acanthamoeba</i> spp. Pruebas de enflagelación y morfología microscópica.
	Amebas de vida libre, específico: <i>Naegleria</i> spp y <i>Acanthamoeba</i> spp.	
	Enterococos fecales	ISO 7899-2:2000. Enterococos intestinales. Método de filtración por membrana. NOM-210-SSA1-2014. <i>Salmonella</i> spp, <i>S. aureus</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , enterococos, coliformes fecales, <i>E. coli</i> . Método de referencia para el aislamiento.

Consideraciones generales de muestreo microbiológico

El muestreo es una etapa crítica en cualquier análisis microbiológico, ya que la calidad de los resultados depende en gran medida de la representatividad y precisión de las muestras recolectadas. El objetivo principal de los métodos de muestreo microbiológico es recolectar una muestra que sea representativa del entorno o sustrato en estudio (ej., agua, alimentos,

suelo, aire, superficies) y que contenga los microorganismos de interés en cantidades y condiciones comparables a las del ambiente natural.

Por lo tanto, algunas condiciones específicas para realizar un muestreo microbiológico en agua son las que a continuación se describen:

1. Representatividad: Las muestras deben reflejar las condiciones del material o ambiente que se está evaluando. Esto incluye la distribución homogénea o heterogénea de los microorganismos y las condiciones fisicoquímicas.
2. Precisión y exactitud: Se debe minimizar la introducción de errores durante la recolección, transporte y análisis de la muestra.
3. Prevención de la contaminación: Se deben emplear técnicas asépticas para evitar la introducción de microorganismos externos que puedan alterar los resultados.
4. Conservación y transporte adecuado: Las muestras deben ser conservadas y transportadas de manera que se mantengan las condiciones originales de los microorganismos presentes. Esto incluye el uso de temperaturas adecuadas, tiempos de transporte cortos y medios de conservación cuando sea necesario.

El muestreo para la calidad del agua de los parámetros biológicos es complejo y variado, dependiendo del tipo de organismo vivo que nos interese identificar. Algunos nos proporcionan información sobre el impacto y degradación del hábitat ecohidrológico; por tanto, el monitoreo biológico o biomonitoreo es de gran importancia porque nos brinda información sobre la calidad del agua de ríos, arroyos, lagos, presas o lagunas, nos ayuda a tomar decisiones para su aprovechamiento y así garantizar agua segura para el abastecimiento de agua en las poblaciones. El término del manejo óptimo de los recursos requiere estándares predefinidos de calidad integral de agua, como componente de los criterios de optimización (36).

El muestreo requiere un proceso que garantice la calidad de la muestra para evitar la contaminación cruzada y generar falsos resultados. La calidad y representatividad de los resultados de laboratorio se perderá si el muestreo no se hace de manera adecuada. Un muestreo microbiológico generalmente son muestras puntuales y no se debe hacer una muestra

compuesta. Este proceso riguroso de muestreo y su cumplimiento con las normativas son esenciales para garantizar la integridad de las muestras y la fiabilidad de los resultados de los análisis microbiológicos en el monitoreo del agua. Los principales desafíos para prevenir la contaminación deben incluir protocolos básicos y precauciones para garantizar la seguridad de la muestra.

Los factores que determinan la presencia bacteriana en una muestra son:

- La acidez disminuye la presencia bacteriana y la materia orgánica aumenta.
- El aumento de oxígeno disuelto limita la presencia de bacterias anaerobias.
- El aumento de sales disminuye la presencia biológica en el agua.
- La filtración disminuye la presencia bacteriana.
- La temperatura influye de diversas maneras en el crecimiento bacteriano; por ello es importante garantizar temperaturas que marquen las técnicas de muestreo y análisis.
- La turbidez provoca aumento de la presencia de bacterias.
- El aumento de protozoarios disminuye la presencia de bacterias, porque muchos de ellos se alimentan de bacterias.

Como se mencionó en secciones anteriores, la planeación es crucial para cumplir con todos los objetivos y metas. La comunicación entre el laboratorio y el personal que realiza el muestreo es esencial para asegurar todos los requisitos del aseguramiento de la calidad de los resultados. Recapitulando, algunas de las consideraciones generales más importantes a considerar antes de iniciar el muestreo son:

- Realizar un plan de muestreo que incluya objetivo, antecedentes, mapas o planos, justificación y otra información útil.
- Solicitud de análisis. El laboratorio debe tener conocimiento previo del número de muestras para que se analicen dentro del tiempo límite.
- Revisar normatividad, métodos y procedimientos de los parámetros a analizar.
- Determinar parámetros a medir.
- Tiempo de recorrido de muestreo, número de muestras, preservación

- y tiempo de traslado.
- Realizar visita prospectiva para verificar los puntos con anticipación.
 - Revisar y calibrar equipo de campo.
 - Obtener permisos de entrada a los puntos de muestreo.
 - Acordar horarios y respetarlos.
 - Proponer estaciones de muestreo.
 - Verificar necesidades y equipo de seguridad, así como una brigada de campo y distribuir tareas, preferentemente cuatro, aunque con dos se puede realizar el muestreo.
 - Adquirir reactivos, recipientes, hieleras, suficientes frascos.
 - Etiquetar recipientes con tiempo y volumen adecuados.
 - Hacer lista de verificación y comprobar que se lleva todo antes de salir a campo.
 - Verificar el estado de equipos, revisar la carga de baterías de aquellos que lo requieran.

Procedimiento general de muestreos para análisis microbiológico

Los procedimientos de muestreo para análisis microbiológico comprenden un conjunto sistemático y estandarizado de técnicas que deben ejecutarse con rigurosa precisión para asegurar la representatividad de las muestras y evitar su contaminación durante la recolección, transporte y almacenamiento. Este proceso requiere la aplicación de protocolos específicos según la fuente de agua a analizar. El correcto muestreo permite la identificación precisa de microorganismos indicadores y patógenos relevantes.

Identificar el punto o fuente de muestreo

En caso de muestreo para parámetros fisicoquímicos y microbiológicos siempre se debe considerar el punto donde se toma la muestra, es importante estudiar el sitio que se va a mostrar y el tipo de muestreo que se va a realizar de acuerdo a la fuente de agua o uso; por ejemplo: una descarga de agua residual, un cuerpo de agua superficial (ej., río, arroyo, pozo, cisterna, agua de la llave) requieren un muestreo especí-

fico. Sin embargo, en el caso de muestreos microbiológicos siempre se deben considerar todas las actividades previas de aseguramiento de la calidad específicos para microbiología como preparación de medios y materiales, sus controles correspondientes y la documentación requerida para demostrar las actividades. Al salir a campo, se debe llevar un mapa de ubicación con las coordenadas del programa de muestreo, llevar un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, siglas del inglés Global Positioning System) para identificar los puntos de muestreo e investigar con anticipación el sitio para tomar todas las previsiones necesarias. Es muy importante la capacitación del personal en los procedimientos para el muestreo microbiológico.

Llenado de formatos y documentación

Llenar los registros de campo como etiquetas u otros documentos, con las coordenadas correspondientes a los puntos de muestreo; esto garantiza la cadena de custodia y el control de calidad desde el trabajo de campo hasta la entrega al laboratorio. Es importante siempre registrar un código de identificación por cada punto de muestreo; por ejemplo: “ID.001.02.25”: señalar el lugar, número de muestra, número de réplicas, año y nombre del lugar. Para el control de la muestra, debe llevarse un registro con el formato preestablecido con los datos anotados en la etiqueta del frasco o recipiente.

Los datos que debe tener la hoja de registro de campo deben incluir:

- Identificación del punto o sitio de muestreo, coordenadas geográficas.
- Identificación o código de la muestra.
- Lugar y fecha de la toma de muestra.
- Temperatura del agua, pH, cloro residual libre.
- Tipo de análisis a efectuar.
- En su caso, reactivo empleado para la preservación.
- Observaciones relativas a la toma de muestra: preferencias en situaciones de muestras especiales provenientes de alguna contingencia o evento ocasional.
- Nombre de la persona que realizó el muestreo.

Preparación del equipo de muestreo y materiales

Al realizar el análisis microbiológico, es importante llevar un control del equipo de muestreo y materiales necesarios para el muestreo. Desde los frascos estériles hasta equipos de campo para medir parámetros físico-químicos que son determinantes para el comportamiento bacteriano, como son el pH, conductividad, temperatura, compuestos orgánicos, así como identificar características importantes del sitio, como medir caudal y registro fotográfico del lugar. Es importante calibrar equipos y seguimiento de mantenimiento.

Diseñar una lista de verificación con el equipo y materiales que deben prepararse antes de la salida a campo:

- Hoja de registro de campo.
- Etiquetas a prueba de agua.
- Plumones a prueba de agua y tabla de campo.
- Torundas o algodón.
- Pissetas con agua destilada y alcohol.
- Agua potable para limpieza de equipo de campo.
- Papel para limpieza general.
- Bolsas de plástico estériles.
- Guantes.
- Cubrebocas.
- Bata y botas de campo.
- Equipo multiparamétrico Hanna® o YSI®.
- Hieleras.
- Caja de muestras.
- Overol para muestreo de agua.
- Equipo de muestreo: brazo, balde, botella Van Dorn.
- Instrumento con Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Identificación etiquetada a recipientes o bolsas de muestreo

Para la identificación de las muestras deben etiquetarse los frascos o recipientes con la siguiente información:

- Número o código de control para identificar la muestra.
- Fecha y hora de muestreo.
- Ubicación del punto de muestreo, coordenadas geográficas.
- Nombre del muestreador.

Preparación de los frascos o bolsas estériles

Para análisis microbiológico, utilizar frascos de vidrio o bolsas estériles con cierre hermético y capacidad de 125 mL o 250 mL. Para la esterilización de frascos que contendrán muestras de agua sin cloro residual libre, dejar en un horno a 170 °C por un tiempo mínimo de 60 min, o en autoclave a 120 °C durante 15 min. Antes de la esterilización, debe cubrirse el tapón del frasco con papel en forma de capuchón resistente a las condiciones del proceso. En caso de que las muestras de agua tengan cloro residual libre, agregar 0.1 mL de tiosulfato de sodio al 3 % por cada 120 mL de capacidad del recipiente. Los frascos de 120 mL de capacidad para muestras con alto contenido de metales (>1.0 mg/L), incluyendo cobre o zinc, deben contener 0.3 mL de solución de sal disódica de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) al 15 %, ajustando el pH de la solución a 6.5 antes de usar el frasco.

Entre las diferentes opciones para la recolección de muestras están las bolsas estériles *Whirl-Pak*® de 250 mL, que ofrecen una opción cómoda y efectiva, especialmente en situaciones donde el uso de frascos de vidrio o plástico no es viable o no es conveniente. Las bolsas *Whirl-Pak*® están fabricadas de polietileno, un material altamente resistente, y están esterilizadas desde fabricación; permiten el muestreo seguro de líquidos y sólidos (Figura 6).

Algunas características importantes de estos productos incluyen:

- a) Capacidad. Volumen de 250 mL (también disponibles en otras capacidades) adecuado para muestreos microbiológicos de agua.
- b) Estériles. Esto garantiza que no se introduzcan contaminantes externos durante el muestreo.
- c) Cierre hermético. Las bolsas cuentan con lengüetas metálicas que permiten un sellado hermético y a prueba de fugas, lo que las hace ideales para el transporte de las muestras sin riesgo de derrames.

- d) Boca ancha. Facilita la recolección del agua directamente desde la fuente sin necesidad de tocar el punto de muestreo o manipular excesivamente la bolsa.



Figura 7. (a) Bolsa microbiológica Whirl-Pak® con tiosulfato, capacidad 120 mL y 300 mL. (b) Bolsas de muestra estériles Whirl-Pak® de 250 mL. (c) Frasco de vidrio tapa rosca azul Schott®, capacidad 100 mL y 500 mL.

Preparación previa al muestreo

La preparación previa al muestreo implica asegurar que la muestra sea representativa, homogénea y que se haya seguido el protocolo adecuado para evitar errores en los resultados. Además de las medidas de seguridad para el personal que tomará la muestra. Considere la siguiente lista como referencia para verificar cada actividad previa al muestreo:

- Lavarse manos y antebrazos con agua y jabón para reducir la posibilidad de contaminación.
- Colocarse el equipo de protección personal (guantes estériles, cubrebocas, bata y cofia) para evitar cualquier contacto directo con la muestra.
- Asegurarse de que el grifo o la válvula de muestreo esté en buen estado y libre de rupturas, incluyendo mangueras o filtros de plástico.
- Etiquetar la bolsa estéril antes de la toma de muestra.

Proceso de la toma de muestra

Según la fuente de agua o uso, el procedimiento de la recolección tiene algunas consideraciones importantes, pero en general se deben seguir las recomendaciones establecidas en los métodos de muestreo de las normas.

Muestreo de agua de la llave o grifo

Limpiar el punto de toma de muestra si es un grifo, cisterna o llave. Si el material del grifo lo permite, se puede aplicar calor con una flama directa para esterilizar el orificio de salida. En caso de que esto no sea posible, se debe limpiar la boca del grifo con una torunda estéril impregnada con alcohol o cloro. Si la limpieza del grifo o válvula seleccionada es dudosa, elegir otro grifo o válvula. Cuando se requiere tomar la muestra de un grifo o válvula de dudosa limpieza por propósitos especiales del muestreo, debe limpiarse el orificio de salida con una gasa estéril o torunda de algodón impregnada de solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 100 mg/L. Adicionalmente, cuando el material y las condiciones del punto de salida lo permitan, se podrá calentar a flama directa y posteriormente limpiarse con alcohol.

El purgado del sistema

Consiste en abrir el grifo y dejar correr el agua durante al menos 3 min o hasta que el agua alcance una temperatura estable. Esto asegura que el agua muestreada no contenga contaminantes que hayan estado estancados en las tuberías; además, se tiene una temperatura homogénea.

Recolección de la muestra en bolsas estériles

Las bolsas *Whirl-Pak*® se utilizan para la recolección, almacenamiento y transporte de muestras de laboratorio, tanto líquidas como sólidas. El procedimiento de uso se describe a continuación (ver Figura 7):

- Abrir la bolsa *Whirl-Pak*® cerca del punto de muestreo, asegurándose de no tocar la boca del grifo ni el interior de la bolsa.
- Colocar el flujo de agua directamente en la bolsa, llenándola hasta la capacidad de 250 mL. Asegurarse de no tocar las paredes internas o el grifo con la bolsa.
- Abrir la bolsa lo más cercano a la llave, a la mitad de la bolsa poner directamente el chorro de agua cuidando de no tocar la llave en ningún momento de este proceso. Rasgar la parte superior de la bolsa a

lo largo de la perforación. Tomar la bolsa de los extremos metálicos y doblar el borde girando la bolsa.

- Use las lengüetas de extracción en cada uno de los lados para abrir la bolsa. A veces, un pequeño tirón en el fondo de la bolsa ayuda a abrirla por completo.
- Coloque una muestra, líquida o sólida, en la bolsa. Deje suficiente espacio en la parte superior para cerrar y mezclar si es necesario.
- Girando la bolsa formará un sello más apretado. Las bolsas más grandes se pueden cerrar “doblando” la pestaña lo más fuertemente posible. Doble los extremos del cable sobre la bolsa para completar el cierre. Una vez llenada, rasgar la perforación en la parte superior de la bolsa y, usando las lengüetas metálicas, girar la parte superior para cerrarla herméticamente. Esto garantiza un sello a prueba de fugas.
- Cerca del orificio de salida, en el caso de frascos de vidrio con tapón esmerilado y protegidos con papel, deben quitarse simultáneamente el tapón del frasco y el papel de protección, manejándolos como unidad, evitando que se contaminen el tapón, el papel de protección y el cuello del frasco. Para lo anterior, es necesario sostener el tapón o tapa con el esmeril o rosca hacia abajo; en el caso de frascos estériles desechables desprender y eliminar el sello de seguridad y mantener la tapa con la rosca hacia abajo; para el uso de bolsas estériles desprender y eliminar el sello de seguridad de la bolsa.
- Proceder a tomar la muestra sin pérdida de tiempo y sin enjuagar el frasco; se debe dejar el espacio de cabeza requerido para la agitación de la muestra previa al análisis (aproximadamente 10% de volumen del frasco).
- Efectuada la toma de muestra, deben colocarse el tapón con el papel de protección o la tapa al frasco.

Almacenamiento y transporte de la muestra

- Coloca la muestra en una caja o contenedor refrigerado para mantenerla a una temperatura de entre 4°C y 6°C durante el transporte al laboratorio.
- Asegurar que la muestra llegue al laboratorio dentro del tiempo re-

comendado, que suele ser entre 6 y 24 horas para análisis microbiológicos.



Figura 8. Manejo de las bolsas de muestreo microbiológico.

Consideraciones adicionales

- Si la muestra es para análisis microbiológicos, es fundamental minimizar el tiempo entre la recolección y el análisis para evitar la multiplicación o muerte de microorganismos en el recipiente.
- Usar siempre guantes estériles y cubrebocas: seguir las normas de manipulación para garantizar la integridad de la muestra.

Estos pasos aseguran que el proceso de muestreo sea higiénico y adecuado para obtener resultados confiables en los análisis microbiológicos.

El procedimiento de muestreo microbiológico es similar en los otros tipos de fuentes de agua; solo cambia por la forma de recolectar la muestra, pero el envasado, etiquetado y transporte tienen el mismo procedimiento.

Las muestras deben transportarse de manera que se mantenga su in-

tegridad y no se deteriore. Esto puede incluir mantener las muestras a temperaturas adecuadas, según lo requiera el análisis a realizar. Al finalizar el muestreo, el laboratorio debe recibir las muestras sin perder la identificación de cada muestra para garantizar la cadena de custodia y realizar el análisis correspondiente.

Consideraciones para pozos profundos:

- Asegurarse de seguir los protocolos establecidos por las autoridades locales o internacionales para el muestreo de pozos profundos.
- Si la muestra es para análisis de coliformes o bacterias patógenas, minimizar la manipulación y asegurarse de usar recipientes estériles adecuados para evitar cualquier tipo de contaminación.
- La toma de muestra de pozos profundos requiere especial cuidado para evitar la contaminación desde la superficie o durante el uso de equipos.

Estos pasos aseguran que la muestra de agua del pozo profundo sea representativa y adecuada para el análisis microbiológico.

Muestreo de agua de pozo somero o fuente similar

Cuando no es posible tomar la muestra con la extensión del brazo, debe atarse al frasco un sobrepeso usando el extremo de un cordel limpio, o en su caso usar equipo muestreador comercial. Deben quitarse simultáneamente el tapón y el papel de protección, de acuerdo con lo mencionado anteriormente para la toma de una muestra microbiológica en agua potable. Proceder a tomar la muestra, bajando el frasco dentro del pozo hasta una profundidad de 15 a 30 cm, evitando que el frasco toque las paredes del pozo. Efectuada la toma de muestra, deben colocarse la tapa o el tapón con el papel de protección al frasco, o en su caso sellar la bolsa.

Consideraciones generales para muestreo en cisterna:

- Si la cisterna tiene una tapa o válvula de acceso, limpiar y desinfectar las áreas alrededor de la apertura conforme a los procedimientos establecidos en NOM-230-SSA1-2002.
- Si no hay un grifo o bomba conectada a la cisterna, y es necesario extraer la muestra directamente de la cisterna, deberás utilizar un dispositivo estéril para acceder al agua.

- Si usas una cuerda y un recipiente estéril (como un frasco o la propia bolsa Whirl-Pak®), asegúrate de que todo el equipo esté desinfectado para evitar contaminación.
- Sumerge el recipiente estéril en la cisterna a una profundidad media, evitando las capas superficiales del agua, que pueden contener contaminantes atmosféricos, y el fondo, que puede contener sedimentos.

En el caso de tanques de almacenamiento, si no es posible la toma de muestra de la forma indicada en esta sección, debe procederse como se menciona en las consideraciones generales para muestreo de agua de pozo somero o fuente similar.

Las muestras tomadas deben colocarse en hielera con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo cerradas para su transporte al laboratorio, a una temperatura entre 4 °C y 6 °C, cuidando de no congelar las muestras.

Muestreo de aguas residuales

Para el procedimiento de muestreo microbiológico en descarga de aguas residuales municipales y no municipales, debe considerarse lo establecido en NOM-001-SEMARNAT-2021 y los lineamientos generales y recomendaciones de NMX-AA-003-1980. Así, está establecido que el responsable de la descarga debe realizar el monitoreo de sus descargas de aguas residuales con la periodicidad especificada. En estos procedimientos, el laboratorio acreditado tiene responsabilidad específica y definida por la CONAGUA, referenciada aquí como “la Comisión” (16):

...En situaciones que justifiquen un mayor control, como protección de fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, emergencias hidroecológicas o procesos productivos fuera de control, la Comisión podrá modificar la periodicidad de muestreo, análisis e informe de resultados.

Todo informe de resultados de muestreo y análisis debe registrarse y firmarse en el sistema electrónico que para tal efecto la Comisión pone a disposición de los laboratorios, mismo que deberá firmarse a más tardar el séptimo día hábil posterior a que haya concluido el trimestre en cuestión...

Para el caso de la frecuencia de muestreo, el informe de resultados con carácter semestral, el registro y firma a que se refiere este párrafo, será en el trimestre en que se haya realizado el muestreo. El signatario autorizado del laboratorio deberá coleccionar las muestras simples en número e intervalo que refiere la norma (16), las cuales conforman la muestra compuesta.

Las descargas de aguas residuales se clasifican en función del caudal máximo registrado en el permiso de descarga correspondiente, definiéndose tres tipos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (16):

- Caudales menores o iguales a 30 L/s.
- Caudales mayores a 30 L/s y menores de 16 000 L/s.
- Caudales iguales o mayores a 16 000 L/s.

Toda descarga de aguas residuales, de acuerdo a la clasificación indicada anterior, debe contar con un puerto de muestreo constituido por:

- La infraestructura de conducción.
- Los dispositivos de medición.
- El sitio de colecta de muestras.
- La infraestructura asociada.

El puerto de muestreo debe ubicarse en el punto más cercano al cuerpo receptor, considerando su factibilidad de construcción y acceso para el equipo y el personal que realiza actividades relacionadas con la descarga de aguas residuales; este sitio debe ser consignado en el permiso de descarga correspondiente. La muestra simple será la que colecciona un laboratorio en el punto de descarga, en día normal de operación del proceso generador de la descarga, que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que la generan, durante el tiempo necesario y continuo para completar cuando menos un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio en el momento del muestreo. A efecto de comprobar lo anterior, el laboratorio que colecciona las muestras solicitará al responsable de la descarga el permiso emitido por la CONAGUA, lo cual se asentará en el informe de resultados de muestreo y análisis, con una descripción de las condiciones o circunstancias de operación al momento de la colecta de las muestras.

La CONAGUA, la PROFEPA o la Unidad de Verificación podrán recabar los documentos o la evidencia necesaria que acrediten que efectivamente las muestras simples se realizaron en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga.

En la NOM-001-SEMARNAT-2021 está establecido que para los parámetros *Escherichia coli* y Enterococos fecales debe reportarse el valor promedio diario calculado de la media geométrica de los valores resultado del análisis de cada muestra simple colectada para conformar una muestra compuesta como se muestra en la Tabla 9.

Los valores de los parámetros básicos, contaminantes patógenos y parasitarios, metales y cianuros de control previstos en NOM-001-SEMARNAT-2021 deben reportarse como promedios diarios calculados con los resultados de análisis de las muestras compuestas. El valor de promedio mensual para estos debe ser el resultado del promedio ponderado en función del caudal de los valores en promedio diario que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas colectadas en el mismo mes calendario. Las excepciones a este lineamiento son: pH (valor tomado en campo durante la colecta de cada muestra simple), toxicidad aguda (valores obtenidos de cada muestra simple), temperatura (promedio aritmético de los valores tomados en campo en la colecta de cada una de las muestras simples) y grasas y aceites (promedio ponderado en función del caudal de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples colectadas para conformar la muestra compuesta, revisar Tabla 9).

La NOM-001-SEMARNAT-2021 establece que (16):

...La cadena de custodia, la hoja de campo y las demás evidencias que soporten los informes de resultados de muestreo y análisis deberán mantenerse por el laboratorio para su consulta por un periodo de 5 años posteriores a su emisión, registro y firma...

Los responsables de la descarga de aguas residuales a cualquier cuerpo receptor deberán prever en el sitio autorizado en el permiso de descarga emitido por la CONAGUA la existencia de infraestructura fija, segura y adecuada para que pueda realizarse la colecta de muestras, conforme a lo

establecido en la norma. El generador de las aguas residuales debe instalar en la obra de conducción una estructura que permita tomar muestras de la descarga para su análisis precedente, sin interrumpir su incorporación al punto final de la descarga, o bien ubicarse al final de la obra de conducción de manera que permita. En ambos casos, los dispositivos de medición, así como el aforo y el puerto de muestreo de la descarga de aguas residuales, deben seguir las especificaciones de la norma mexicana NMX-AA-003-1980. Una vez definido el tipo de puerto de muestreo, el personal debe poder tener acceso ininterrumpidamente a los andadores, rampas, escaleras, puentes o pasillos de acceso. El área de muestreo debe estar permanentemente libre de obstáculos y estructuras que pongan en riesgo u obstaculicen las actividades del personal relacionadas con el puerto de muestreo.

Muestreo en ríos y arroyos

En el muestreo de cuerpos receptores como ríos y arroyos, las consideraciones que deben seguirse están en función de lo establecido en la NMX-AA-014-1993. El responsable del muestreo debe seguir estas recomendaciones generales para la toma de muestras para análisis microbiológico, además de las especificaciones explicadas en los siguientes párrafos.

Aparatos y equipos

Los recipientes para el transporte y conservación de las muestras deben ser de materiales inertes al contenido que contendrán. En el caso de los recipientes para muestras para análisis bacteriológicos, deben ser de material resistente a presiones y temperaturas requeridas para la esterilización. Las tapas deben proporcionar un cierre hermético en los recipientes y ser de un material afín al del recipiente. La preparación de los recipientes es importante para eliminar cualquier sustancia que altere los resultados del análisis. La capacidad de los recipientes debe ser al menos de 2 L. En caso de recipientes para análisis bacteriológico, la capacidad debe ser no mayor de 250 mL. Para frascos de vidrio con

tapón esmerilado, quitar únicamente el papel de protección, evitando que se contamine, y en el caso de frascos y bolsas estériles desechables, desprender el sello de seguridad.

Equipo de recolección de muestras:

- a. Muestreadores automáticos. Se permite su empleo siempre y cuando se operen de acuerdo con las instrucciones del fabricante, dándoles el correcto y adecuado mantenimiento, asegurándose de obtener muestras representativas del cuerpo receptor.
- b. Recipiente muestreador. Debe ser de material inerte al tipo de aguas que contendrá, estar provisto de un mecanismo que permita el muestreo a diferentes niveles y su capacidad debe ser tal que la muestra sea representativa del estrato o nivel muestreado.

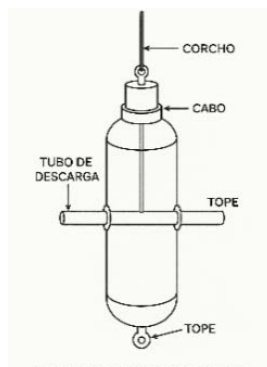


Figura 9. Ejemplo de botella Van Dorn (37).

Etiquetas para las muestras

Tomar las precauciones necesarias para que en cualquier momento sea posible identificar las muestras. Emplear etiquetas pegadas o colgadas, o numerar los frascos anotándose la información en el registro de muestreo. Estas etiquetas deben contener como mínimo la siguiente información:

- Cuerpo receptor en estudio.
- Número y nombre de la estación.
- Identificación de la descarga.
- Número de la muestra o identificación.
- Fecha y hora de muestreo.

- Nombre y firma de la persona que efectúa el muestreo.
- Análisis a efectuar.

Se debe utilizar etiquetas y tinta que no sufran alteraciones por el agua (Figura 9).



ETIQUETA PARA MUESTRA DE AGUA		
Fecha:		Hora:
Lugar:		Punto de muestra:
Conductividad:	Caudal:	PH:
Departamento/Municipio:		
Muestra Para	DQO:	
Responsable:		
ETIQUETA PARA MUESTRA DE AGUA		
Fecha:		Hora:

Figura 10. Ejemplo de identificación de una muestra en su frasco de muestreo, asegurar que no sufra alteraciones por la muestra misma u otro factor externo.

Hoja de registro o registro

Se debe llevar una hoja de registro (también referenciada simplemente como registro) con la información que permita identificar el origen de la muestra y todos los datos que en un momento dado permitan repetir el muestreo. El registro debe contener la siguiente información:

- Los datos citados anteriormente en la etiqueta de la muestra.
- Resultados de pruebas ejecutadas en los sitios de interés.
- Temperatura ambiental, temperatura del agua, pH y flujo.
- Localización de las estaciones de muestreo.
- Descripción detallada de las estaciones de muestreo, de manera que cualquier persona pueda tomar otras muestras en el mismo sitio.

Procedimiento de toma de muestra

Las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el sitio y hora de muestreo, además de tener el volumen suficiente para efectuar las determinaciones correspondientes. Para el muestreo debe establecerse una red de muestreo que represente las condiciones particulares del agua, debiéndose tomar las muestras en la parte supe-

rior, media o inferior del cuerpo receptor. Con el objeto de conocer las variaciones de las condiciones particulares del cuerpo receptor, se debe establecer un ciclo anual de muestreo que cubra las épocas de precipitación pluvial y estiaje. Al efectuarse el muestreo, deben anotarse los datos para asegurar la correcta identificación y control de muestras delineados en la NMX-AA-014-1993.

El encargado debe muestrear y aforar en los siguientes puntos: (a) aguas arriba de la descarga, a una distancia tal que no se manifieste influencia de esta; (b) en la descarga misma, lo más próximo posible a su desembocadura al cuerpo receptor; (c) aguas abajo de la descarga, a una distancia tal que se considere que se haya efectuado una mezcla uniforme de la descarga en el cuerpo receptor. En todo caso, es recomendable muestrear a una distancia tal que se considere que el cuerpo receptor haya absorbido el efecto de la descarga, para apreciar el grado de recuperación del cuerpo receptor.

Para fines de estudio del cuerpo receptor, se debe muestrear en aquellos sitios en que se aprecien cambios fuertes de sección, caídas, zonas cubiertas de lirio u otros organismos eutroficantes.

Muestreo en lagos, lagunas, presas y embalses

Para el muestreo en lagos, lagunas, presas y embalses, los sitios de muestreo, además de los indicados en las secciones anteriores en este capítulo, se realizan en: (a) los afluentes, antes de desembocar al cuerpo receptor; (b) dentro del cuerpo receptor, donde se aprecie una mezcla uniforme o donde se aprecie una mezcla uniforme con los afluentes; y (c) en las salidas del cuerpo receptor.

Para el cierre de los recipientes de muestreo, las tapas de los recipientes deben fijarse de tal forma que se evite el derrame de muestra. Durante el tiempo de transporte de la muestra, del sitio de muestreo al laboratorio, las muestras deben mantenerse a la temperatura que evite la degradación del parámetro. Es muy importante tomar las debidas precauciones de seguridad y de higiene en el muestreo, en función del tipo de cuerpo receptor. Para parámetros microbiológicos, mantener la muestra para su transporte entre 4 °C y 6 °C. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Sumergir el frasco en el agua con el cuello hacia abajo hasta una profundidad de 15 a 30 cm, destapar y a continuación girar el frasco ligeramente permitiendo el llenado. En todos los casos debe evitarse tomar la muestra de la capa superficial o del fondo, donde puede haber nata o sedimento y en el caso de captación en cuerpos de agua superficiales, no deben tomarse muestras muy próximas a la orilla o muy distantes del punto de extracción. Si existe flujo en el cuerpo de agua, la toma de muestra debe efectuarse con la boca del frasco a contracorriente.
- Efectuada la toma de muestra debe colocarse el tapón o tapa, sacar el frasco del agua y colocar el papel de protección si aplica.
- Si se usa una bolsa, sumergirla a la profundidad arriba indicada. Tomar la muestra y cerrar la bolsa bajo el agua, posteriormente sellarla fuera del agua.
- Las muestras tomadas deben colocarse en hielera con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo cerradas para su transporte al laboratorio, a una temperatura entre 4°C y 6°C, cuidando de no congelar las muestras.
- En el laboratorio, las muestras deben ser refrigeradas y procesadas dentro de las primeras 6 horas tras la recolección. Si esto no es posible, se pueden conservar hasta un máximo de 24 horas bajo refrigeración, siempre que se cumplan las condiciones de temperatura. Para análisis microbiológico en óptimas condiciones de preservación y transporte hasta 6 horas. Para análisis fisicoquímicos y radiactivos el periodo depende de la preservación aplicada.

Muestreo para análisis de *Giardia lamblia* en agua potable

Giardia lamblia es un parásito protozoario que se encuentra en forma de quistes en el agua, que pueden sobrevivir fuera del cuerpo humano durante largos períodos, resistiendo condiciones ambientales adversas. Los quistes son una forma infecciosa y pueden ser ingeridos al consumir agua contaminada. Dado que estos quistes son pequeños, entre 8 y 12 μm , requieren métodos específicos de muestreo y análisis. El objetivo del muestreo para el análisis de *Giardia lamblia* es recolectar una muestra representativa de agua potable que permita la detección y cuantificación

de los quistes del protozoo. Esto implica el uso de técnicas de concentración de quistes específicas debido a su baja concentración en agua potable, así como la utilización de equipos y métodos especializados. El proceso de muestreo consiste en:

1. Selección del punto de muestreo.
 - a. El punto de muestreo debe ser representativo del sistema de distribución del agua potable, seleccionando grifos o puntos cercanos a los consumidores.
 - b. En el caso de sistemas grandes, es recomendable tomar muestras de diferentes partes del sistema para obtener una evaluación completa.
2. Volumen de la muestra.
 - a. Para detectar *Giardia lamblia*, se deben recolectar grandes volúmenes de agua, usualmente entre 1 y 3 L. Dado que los quistes de *Giardia lamblia* pueden estar presentes en concentraciones muy bajas, la recolección de grandes volúmenes es necesaria para asegurar la captura de una cantidad detectable.
3. Equipos de muestreo.
 - a. Emplear filtros especiales que pueden retener los quistes de *Giardia lamblia*. Estos filtros están diseñados para permitir el paso de grandes volúmenes de agua mientras capturan partículas y organismos como los quistes de protozoos.
 - b. Algunos de los dispositivos más utilizados son los sistemas de filtración de membrana o cartuchos de filtro de fibra de vidrio o espuma, que son capaces de retener partículas de entre 1 y 3 μm .
4. Preparación y montaje del sistema de filtración.
 - a. El equipo de filtración debe ser estéril o haber sido desinfectado adecuadamente antes de cada muestreo.
 - b. La unidad de filtración se conecta al sistema de suministro de agua, y el agua se bombea a través del filtro para atrapar los quistes presentes en el agua.
 - c. El flujo de agua debe ser constante y controlado para asegurar que se capture una muestra representativa.
5. Recolección de la muestra
 - a. Una vez filtrado el volumen adecuado de agua, el filtro que contiene los quistes se retira cuidadosamente con técnicas asépticas.

- b. El filtro se coloca en un recipiente estéril que contiene una solución tampón o un medio de conservación adecuado para mantener los quistes viables hasta su análisis en el laboratorio.
6. Transporte de la muestra.
- a. Las muestras deben ser transportadas al laboratorio lo más rápidamente posible, preferiblemente dentro de las 24 horas posteriores a la recolección.
 - b. Durante el transporte, las muestras deben mantenerse refrigeradas a una temperatura de entre 4 °C y 8 °C para evitar la degradación o muerte de los quistes.

Muestreo para microcistinas

Las microcistinas son toxinas producidas por ciertas cianobacterias (algas verdeazuladas) que pueden proliferar en cuerpos de agua dulce, especialmente en condiciones de eutrofización, en otras palabras, cuando existen exceso de nutrientes. Estas fitotoxinas representan un riesgo significativo para la salud humana si están presentes en el agua potable, ya que pueden causar daños hepáticos graves e incluso ser mortales en concentraciones elevadas. Por lo tanto, el muestreo adecuado para la detección de microcistinas en agua potable es crucial para la seguridad pública y la calidad del agua. El objetivo del muestreo es recolectar una muestra de agua que permita detectar la presencia y concentración de microcistinas. Esto debe hacerse de manera rigurosa para asegurar que las muestras sean representativas del cuerpo de agua y que los resultados del análisis sean precisos. El procedimiento es el siguiente:

1. Selección del punto de muestreo.
 - a. Los puntos de muestreo deben seleccionarse cuidadosamente para garantizar que representen la calidad del agua que se distribuye para el consumo humano.
 - b. En el caso de cuerpos de agua donde se ha observado la proliferación de cianobacterias o floraciones algales, es importante tomar muestras en áreas con mayor concentración visible de algas, como la superficie o áreas de baja circulación. Para sistemas de distribución de agua potable, los puntos de muestreo pueden incluir

plantas de tratamiento de agua, embalses o puntos de entrada al sistema de distribución.

2. Volumen de muestra.

- a. Se deben recolectar entre 500 mL y 1 L de agua para realizar el análisis de microcistinas. Este volumen permite realizar los análisis tanto para la fracción disuelta como para la fracción de microcistinas intracelulares, es decir, que están dentro de las células de las cianobacterias.

3. Equipos y recipientes de muestreo.

- a. Las muestras deben recolectarse en frascos estériles de vidrio o plástico, libres de compuestos orgánicos que puedan interferir con el análisis de microcistinas.
- b. Se recomienda el uso de frascos de vidrio ámbar o de plástico opaco para proteger las muestras de la luz, ya que la luz puede descomponer las toxinas.
- c. Los frascos deben estar prelavadas y enjuagadas con ácido clorhídrico al 10%, y posteriormente con agua destilada para eliminar cualquier contaminante orgánico.

4. Toma de la muestra.

a. Procedimiento en campo:

- i. Utilizar técnicas asépticas para evitar la introducción de contaminantes durante el proceso de muestreo.
- ii. Las muestras deben tomarse preferentemente de la superficie del agua, hasta 30 cm de profundidad, si se está muestreando un embalse o cuerpo de agua natural donde pueda haber floraciones algales.
- iii. En el caso de sistemas de agua potable, la muestra debe tomarse de un grifo limpio que esté representando el agua que llega a los usuarios.

b. Manipulación de la muestra:

- i. Se debe llenar el frasco hasta el volumen recomendado, dejando un pequeño espacio en la parte superior para evitar derrames durante el transporte.
- ii. Cerrar herméticamente el frasco y etiquetarlo con la información necesaria, incluyendo el punto de muestreo, fecha, hora y nombre del muestreador.

5. Conservación y transporte de la muestra.

- a. Las muestras deben mantenerse refrigeradas a una temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde el momento de la recolección hasta su llegada al laboratorio.
- b. El transporte debe realizarse en condiciones adecuadas, preferentemente en cajas isotérmicas con refrigerantes, para mantener la estabilidad de las microcistinas y evitar su degradación.
- c. Las muestras deben procesarse lo más rápidamente posible, preferiblemente dentro de las primeras 24 horas. Si esto no es factible, pueden conservarse hasta 48 horas, aunque se recomienda el análisis inmediato para obtener resultados precisos.

El muestreo adecuado de agua para el análisis de microcistinas es esencial para garantizar que el agua potable sea segura para consumo humano. Dado que estas toxinas pueden tener efectos graves sobre la salud, el monitoreo regular en cuerpos de agua susceptibles a floraciones algales y en sistemas de agua potable es una medida crítica de control. Con el uso de técnicas de muestreo correctas y análisis avanzados, se pueden identificar rápidamente los riesgos asociados a las microcistinas y tomar las medidas correctivas necesarias para proteger la salud.

Muestreo para huevos de helmintos en aguas residuales

El análisis de huevos de helmintos en aguas residuales es un aspecto esencial del monitoreo de la calidad del agua, particularmente en zonas donde se emplean aguas residuales para riego agrícola o se descargan en cuerpos de agua que podrían ser utilizados para otros fines. Los helmintos son parásitos intestinales cuyos huevos pueden transmitirse a través de agua contaminada, provocando infecciones en humanos y animales. Los helmintos más comunes incluyen *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Ancylostoma* y *Taenia* spp. El proceso de la toma de muestra consiste en los siguientes aspectos a considerar:

1. Selección del punto de muestreo.

- a. El punto de muestreo debe ser representativo de las condiciones del agua residual que será analizada, como las descargas de aguas

residuales tratadas, las lagunas de estabilización, o el efluente que será utilizado en la agricultura.

- b. Los puntos de muestreo deben seleccionarse en función del objetivo del estudio, como puntos antes y después del tratamiento del agua.
2. Volumen de la muestra.
 - a. Dado que los huevos de helmintos pueden encontrarse en bajas concentraciones, se recomienda recolectar un volumen de muestra relativamente grande, por lo general entre 5 y 10 L de agua residual.
 - b. En casos específicos, puede ser necesario recolectar volúmenes mayores para asegurar la captura de una cantidad representativa de huevos para el análisis.
 3. Equipo de muestreo.
 - a. Frascos o recipientes estériles de plástico o vidrio, con capacidad suficiente para recolectar el volumen requerido (5 a 10 L).
 - b. Se debe utilizar equipo limpio y desinfectado para evitar la contaminación de la muestra.
 - c. En algunos casos, puede utilizarse equipo especializado, como recipientes automáticos de muestreo, para obtener muestras compuestas durante un período de tiempo.
 4. Toma de la muestra.
 - a. Recolección directa: las muestras pueden tomarse directamente de canales, tuberías o lagunas donde se almacena o trata el agua residual. Si es posible, las muestras deben tomarse en puntos de mezcla o donde el flujo sea representativo de la calidad general del agua.
 - b. Las muestras deben tomarse en condiciones que representen el flujo de las aguas residuales, como durante el horario de máxima producción de efluentes en plantas de tratamiento.
 - c. Se debe evitar la toma de muestras en zonas estancadas o donde pueda haber sedimentación significativa, ya que los huevos de helmintos tienden a depositarse en el fondo debido a su peso.
 5. Técnicas de muestreo.
 - a. Si se recolecta una muestra puntual, es importante que el agua residual sea agitada antes de la toma de la muestra para asegurar que los huevos de helmintos y otras partículas en suspensión estén distribuidos uniformemente.

- b. Si se usa un método de muestreo compuesto, que implica recolectar muestras en diferentes momentos del día, las muestras parciales deben combinarse para obtener un volumen total representativo.
 - c. Los recipientes para las muestras deben llenarse completamente para evitar la oxidación y la alteración de las condiciones químicas del agua.
6. Conservación y transporte de la muestra.
- a. Las muestras deben transportarse al laboratorio lo más rápido posible, preferentemente dentro de las primeras 24 horas después de la recolección.
 - b. Si el análisis no puede realizarse de inmediato, las muestras pueden almacenarse a una temperatura de entre 4 °C y 10 °C para evitar la eclosión de los huevos o la degradación de la muestra.
 - c. Durante el transporte, se recomienda mantener las muestras en contenedores refrigerados para evitar cualquier cambio en las características fisicoquímicas del agua que pueda influir en la viabilidad de los huevos de helmintos.

El muestreo adecuado para el análisis de huevos de helmintos en aguas residuales es fundamental para la protección de la salud pública, especialmente en zonas donde las aguas residuales se reutilizan en la agricultura o se descargan en cuerpos de agua. El uso de métodos correctos de muestreo, transporte y análisis garantiza la detección precisa de estos patógenos y ayuda a evaluar la efectividad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Muestreo para pruebas de toxicidad con *Vibrio fischeri*

El muestreo para las pruebas de toxicidad con *Vibrio fischeri* es un paso crítico en la evaluación del potencial tóxico de diferentes tipos de matrices ambientales, como aguas residuales, aguas superficiales, lixiviados o productos químicos. Esta prueba utiliza la bioluminiscencia natural de la bacteria *Vibrio fischeri* como indicador de toxicidad; una reducción en la emisión de luz sugiere la presencia de sustancias tóxicas en la muestra. El procedimiento consta de las siguientes etapas:

1. Selección de la muestra.
 - a. El tipo de muestra a recolectar dependerá del estudio o evaluación que se esté realizando. Las más comunes son muestras de agua superficial, agua residual, aguas de proceso industrial o lixiviados de suelos y sedimentos.
2. Recolección de muestras.
 - a. Las muestras deben ser tomadas con recipientes de vidrio o plástico inerte, previamente limpios y esterilizados para evitar la contaminación cruzada.
 - b. Se debe llenar el frasco completamente, sin dejar espacio para aire, ya que la presencia de oxígeno puede alterar la composición química de la muestra.
 - c. El volumen mínimo sugerido para las pruebas de toxicidad es de 100 mL.
 - d. Si se recolectan muestras de agua de cuerpos naturales, como ríos o lagos, se deben tomar de áreas representativas, evitando zonas estancadas o con acumulaciones de residuos.
3. Preservación de la muestra.
 - a. Es fundamental conservar las muestras a bajas temperaturas durante su transporte y almacenamiento. Se recomienda mantenerlas refrigeradas entre 0°C y 6°C.
 - b. El tiempo entre la recolección y el análisis debe ser mínimo. Idealmente, las muestras deben analizarse en un plazo de 24 horas desde su recolección.
 - c. Durante el transporte, se deben usar hieleras o contenedores térmicos para garantizar que la muestra no sufra variaciones significativas en su composición.
4. Filtrado y preparación previa al ensayo.
 - a. Si las muestras contienen partículas suspendidas o sedimentos visibles, es necesario realizar un filtrado o decantado para evitar interferencias en el ensayo de toxicidad.
 - b. Las muestras deben diluirse adecuadamente si contienen concentraciones muy elevadas de contaminantes, utilizando agua destilada o soluciones de dilución estándar.
5. Condiciones de almacenamiento.

- a. Las muestras deben almacenarse de manera que se eviten cambios en su composición, principalmente en su contenido de oxígeno y compuestos orgánicos volátiles. Los recipientes deben estar bien cerrados y protegidos de la luz.
6. Validación del muestreo.
- a. Es fundamental que durante todo el proceso de muestreo se sigan procedimientos rigurosos para garantizar que las muestras sean representativas del medio que se está evaluando. El cumplimiento de los protocolos de muestreo asegura la precisión y reproducibilidad de los resultados en la prueba de toxicidad.
7. Importancia del muestreo adecuado.
- a. Un muestreo incorrecto puede llevar a resultados erróneos o inconsistentes, comprometiendo la interpretación de la toxicidad real de una muestra. Por lo tanto, garantizar la recolección adecuada y la conservación de las muestras es esencial para obtener resultados fiables en las pruebas de toxicidad con *Vibrio fischeri*. Estos resultados son de vital importancia en la evaluación de la calidad ambiental y la detección de posibles contaminantes tóxicos en ecosistemas acuáticos.

Capítulo 5

Preservación de muestras

En los capítulos de este libro están asentadas algunas recomendaciones para todos los aspectos del muestreo a través de la recolección de la muestra, incluyendo en algunos casos su preservación. Una vez recolectada, debe ser analizada inmediatamente o almacenada en un recipiente con un preservador para mantener la integridad de la muestra. En este capítulo se dan recomendaciones sobre los métodos de preservación, tiempos de retención, condiciones de almacenamiento y materiales de recipiente.

La preservación completa de las muestras, ya sean aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales o aguas naturales, es un problema práctico. A pesar de la naturaleza de la muestra, la estabilidad completa para cada uno de los constituyentes nunca puede lograrse. En el mejor de los casos, las técnicas de preservación pueden solo retardar los cambios biológicos y químicos que tienen lugar en una muestra después de que ha sido recolectada de la fuente original. Para mantener la integridad de la muestra, la selección apropiada de los recipientes, el pretratamiento de los recipientes si es necesario y los tiempos de retención forman parte integral del programa de preservación de la muestra.

Métodos de preservación

Los métodos de preservación son relativamente limitados y pretenden generalmente:

- Retardar la acción biológica.
- Retardar la hidrólisis de compuestos y complejos químicos.
- Reducir la volatilidad de los constituyentes.

Los métodos de preservación están limitados generalmente a la adición química, control de pH, refrigeración y congelamiento. Con frecuencia se usan combinaciones de estos métodos para la preservación de la muestra. En la Tabla 9 se muestran algunas sugerencias para la preservación, tiempo de almacenamiento y recipientes para muestras, usadas por EPA, las cuales son compatibles con las sugerencias de la SEMARNAT.

Adición química

El preservador más conveniente es una sustancia química, la cual puede añadirse al frasco de la muestra antes del muestreo. Cuando se añade la muestra, el preservador se dispersa inmediatamente y estabiliza los parámetros de interés por largos periodos de tiempo. Cuando el preservador añadido interfiere con otros parámetros a medir, deben recolectarse muestras adicionales para estos parámetros. Por ejemplo, el ácido nítrico concentrado añadido para la preservación de algunos metales podría interferir con la DBO_5 , así que debe recolectarse una muestra diferente para la DBO_5 .

Control de pH

El control del pH para preservar la muestra depende de la adición de una sustancia química. Como ejemplo, para mantener los iones metálicos en disolución, se añade ácido nítrico concentrado para bajar el $\text{pH} < 2$.

Congelamiento

El congelamiento ha sido objeto de muchos estudios de preservación. Para algunos, el congelamiento es un método para incrementar el tiempo de retención y permitir recolectar una sola muestra para todos los análisis. Sin embargo, los residuos sólidos componentes de las muestras (filtrables y no filtrables) cambian con el congelamiento y descongelamiento. Por lo que es necesario retornar al equilibrio con una alta velocidad de homogeneización antes de que cualquier análisis se lleve a cabo. Este método puede ser aceptable para ciertos análisis, pero no como un método general de preservación.

Refrigeración

La refrigeración o enfriamiento con hielo ha sido estudiado con diferentes resultados. Este es un método muy común usado en campo y no tiene un efecto experimental en la composición de la muestra. Sin embargo,

no mantiene la integridad de todos los parámetros; no interfiere con los métodos de análisis.

Métodos alternativos de preservación

Pueden usarse métodos alternativos con diferentes preservadores o condiciones de almacenamiento si se puede demostrar su efectividad por medio de datos obtenidos de estudios de preservación (ver Tabla 15). Tales estudios de preservación deben especificar:

1. Tipo de agua natural o agua residual usada como muestra en el experimento.
2. Tipo de recipientes usados.
3. Pretratamiento del recipiente y de la cristalería usada.
4. Métodos de preservación usados.
5. Temperaturas específicas o rangos de temperatura usados.
6. Duración del almacenamiento.
7. Almacenamiento en la oscuridad o en la luz.
8. Muestras para control de calidad, fortificadas, duplicadas.
9. Blancos de control.
10. Número de muestras analizadas y resultados.
11. Análisis estadístico, precisión y exactitud.

Tabla 15. Recipientes requeridos, técnicas de preservación y tiempos de almacenamiento. Traducido de (26).

Parámetro	Recipiente ¹	Preservador ^{2, 12}	Tiempo máximo de almacenamiento ³
Pruebas bacterianas			
Coliformes totales y fecales	P, V	Enfriar, 4 °C, 0.008 % Na ₂ S ₂ O ₃ 6	6 horas
Estreptococos fecales	P, V	Enfriar, 4 °C, 0.008 % Na ₂ S ₂ O ₃ ⁶	6 horas
Pruebas inorgánicas			
Acidez	P, V	Enfriar, 4 °C	14 días
Alcalinidad	P, V	Enfriar, 4 °C	14 días
Amonio	P, V	Enfriar, 4 °C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
DBO5	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
DBO5, carbonoso	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Bromuro	P, V	No requiere	28 días
DQO	P, V	Enfriar, 4 °C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Cloruro	P, V	No requiere	28 días
Cloro residual total	P, V	No requiere	Analizar inmediatamente
Color	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Cianuro, total y susceptible de cloración	P, V	Enfriar, 4 °C, NaOH a pH >12, 0.6g ácido ascórbico ⁶	14 días
Fluoruro	P	No requiere	28 días
Dureza	P, V	HNO ₃ a pH<2	6 meses
Ion hidrógeno (pH)	P, V	No requiere	Analizar inmediatamente
Nitrógeno Kjeldahl y orgánico	P, V	Enfriar, 4 °C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Metales⁴			
Cromo VI	P, V	Enfriar, 4 °C	24 horas
Mercurio	P, V	HNO ₃ a pH<2	28 días

Metales, excepto los anteriores	P, V	HNO ₃ a pH<2	6 meses
Nitrato	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Nitrato-nitrito	P, V	Enfriar, 4 °C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Nitrito	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Grasas y aceites	V	Enfriar, 4 °C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Carbono orgánico, TOC	P, V	Enfriar, 4 °C, HCl o H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Ortofosfatos	P, V	Filtrar inmediatamente, enfriar 4 °C	48 horas
Oxígeno disuelto, electrodo	Frasco de vidrio y tapa	No requiere	Analizar inmediatamente (en campo)
Oxígeno disuelto, Winkler	Frasco de vidrio y tapa	Fijar en campo y almacenar en oscuridad	8 horas
Fenoles	Solo V	Enfriar, 4 °C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Fósforo (elemental)	V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Fósforo total	P, V	Enfriar, 4 °C, H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
Sólidos totales	P, V	Enfriar, 4 °C	7 días
Sólidos filtrables	P, V	Enfriar, 4 °C	7 días
Sólidos no filtrables (SST)	P, V	Enfriar, 4 °C	7 días
Sólidos sedimentables	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Sólidos volátiles	P, V	Enfriar, 4 °C	7 días
Sílice	P	Enfriar, 4 °C	28 días
Conductancia específica	P, V	Enfriar, 4 °C	28 días
Sulfato	P, V	Enfriar, 4 °C	28 días
Sulfuro	P, V	Enfriar, 4 °C, añadir acetato de zinc y NaOH a pH>9	7 días

Sulfito	P, V	Enfriar, 4 °C	Analizar inmediatamente
Surfactantes, SAAM	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Temperatura	P, V	No requiere	Analizar inmediatamente
Turbiedad	P, V	Enfriar, 4 °C	48 horas
Pruebas orgánicas⁵			
Hidrocarburos purgables	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$	14 días
Aromáticos purgables	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$, HCl a pH<2	14 días
Acroleína y acrilonitrilo	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$, ajustar pH entre 4-5 ¹¹	14 días
Fenoles	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Bencidinas	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Ésteres de ftalatos	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Nitrosaminas ⁷	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$, almacenar en la oscuridad	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Bifenilos policlorados	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C ⁸ , ajustar pH 5-9	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción

Nitroaromáticos y isoforeno	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C,	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Hidrocarburos aromáticos polinucleares	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$, almacenar en la oscuridad	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Haloéteres	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Hidrocarburos clorados	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina)	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3^6$	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Pruebas de plaguicidas			
Plaguicidas	V, septo cubierto de teflón	Enfriar, 4 °C, pH entre 5-9 8	7 días hasta extracción, 40 días después de extracción
Pruebas radiológicas			
Alfa, beta y radio			
	P, V	HNO_3 a pH<2	6 meses

Notas:

¹ P = polietileno, V = vidrio, SST = sólidos suspendidos totales.

² La preservación de la muestra debe hacerse inmediatamente después de la recolección. Para muestras compuestas, cada alícuota debe preservarse en el tiempo de la recolección. Cuando se usa un muestreador automático puede preservarse cada alícuota, después las muestras pueden preservarse si se mantiene la temperatura a 4 °C hasta completar y dividir la muestra compuesta.

³ Las muestras deben analizarse tan pronto como sea posible después de la recolección. Los tiempos enlistados son los máximos tiempo que las muestras pueden almacenarse antes de analizarse y considerarse válido. Las muestras pueden conservarse por periodos más largos sólo si el encargado o responsable del laboratorio, tiene los datos de

estudios en archivo que demuestren que para el tipo de muestra es estable por más tiempo. Algunas muestras no son estables en el tiempo máximo dado en la tabla. El responsable o encargado del laboratorio está obligado a conservar la muestra por un tiempo más corto si existe el conocimiento para mantener la estabilidad de la muestra.

⁴ Las muestras deben filtrarse inmediatamente en el sitio antes de añadir los preservadores para disolver los metales.

⁵ Recomendaciones aplicables a las muestras que se analizarán por cromatografía de gases, cromatografía de líquidos o cromatografía de gases con detector selectivo de masas, para compuestos específicos.

⁶ Solo debe usarse en presencia de cloro residual.

⁷ Para el análisis de difenilnitrosamina, añadir 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y ajustar el pH entre 7 y 10 con NaOH dentro de las 24 horas de muestreo.

⁸ El ajuste del pH debe hacerse sobre el recipiente en el laboratorio y puede omitirse si las muestras se extraen dentro de las 72 horas de recolección. Para el análisis de aldrín, añadir 0.008 % $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

⁹ El tiempo máximo de retención es de 24 horas cuando hay sulfuro presente.

¹⁰ Las muestras que no recibieron ajuste de pH deben analizarse dentro de los 7 días de muestreo.

¹¹ Las muestras para acroleína que no recibieron ajuste de pH deben analizarse dentro de los 3 días del muestreo.

¹² Cuando cualquier muestra va a ser enviada por mensajería común o por correo, debe cumplir con las regulaciones vigentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) referente al manejo y transporte de materiales peligrosos, y establecer las responsabilidades correspondientes (SCT, 2003 a y b).

Recipientes

Una variedad de factores afecta la selección del material del recipiente y de la tapa. Estos incluyen resistencia a la ruptura, tamaño, peso, interferencia con los constituyentes, costo y disponibilidad. Hay también varios procedimientos para la limpieza y preparación de los frascos que dependen del análisis a llevar a cabo con la muestra.

Los dos principales tipos de materiales para recipientes son el plástico y el vidrio.

Vidrio:

1. Marca Kimax® o Pyrex® – boro-silicato.
2. Vycor® – generalmente artículos de laboratorio.
3. Ray-Sorbor® bajo actínico - generalmente artículos de laboratorio.
4. Corex® - generalmente artículos de laboratorio.

Plástico:

1. Polietileno convencional.
2. Polietileno lineal.
3. Polipropileno.
4. Policarbonato.
5. Cloruro de polivinilo rígido.
6. Teflón.

Todos estos materiales tienen varias desventajas y ventajas. Las marcas de vidrio borosilicato Kimax® y Pyrex® son inertes da la mayoría de los materiales y se recomiendan cuando se van a usar recipientes de vidrio. El polietileno convencional debe usarse cuando el plástico es aceptable por razones de costo y menos absorción de iones metálicos. La situación específica determinará el uso de vidrio o plástico. Sin embargo, use recipientes de vidrio para plaguicidas, grasas y aceites, y otros compuestos orgánicos. En la Tabla 16 se resumen las ventajas y desventajas de estos materiales.

Tabla 16. Comparación entre los recipientes de vidrio y plástico. Modificado de (26).

Aspecto	Vidrio borosilicato	Polietileno convencional
Interferencia con la muestra	Inerte a todos los constituyentes excepto a los álcalis fuertes	Bueno para la mayoría de los constituyentes excepto para los compuestos orgánicos y grasas y aceites
Peso	Pesado	Ligero
Resistencia a la ruptura	Muy frágil	Durable
Limpieza	Fácil de limpiar	Cierta dificultad en la eliminación de componentes adsorbidos
Esterilización	Si	En algunos casos
Espacio	Toman espacio considerable	Recipientes cúbicos, ahorro substancial de espacio durante los estudios de campo extendidos

Hay dos tipos principales de plástico usados para las tapas de los recipientes: el polietileno y la baquelita con revestimiento. Las tapas de polietileno

son recomendadas por la facilidad de limpieza, excepto cuando se van a analizar grasas y aceites en las muestras. Los materiales de goma de silicón deben evitarse para trazas de metales debido a las contaminaciones de zinc. Hay tres tipos de recubrimientos disponibles con sus ventajas y desventajas, listados en la Tabla 17.

Tabla 17. Comparaciones entre recubrimientos de tapas de recipientes. Modificado de (26).

Tipo de recubrimiento	Ventajas	Desventajas
Papel recubierto de cera	Generalmente aplicable a la mayoría de las muestras, no es costoso.	Debe inspeccionarse antes porque se deteriora. No puede usarse con compuestos orgánicos.
Neopreno	Lo mismo que el papel recubierto de cera.	Lo mismo que el papel recubierto de cera.
Teflón	Aplicable para todos los análisis. Minimiza la interacción recipiente/ muestra.	Alto costo.
Limpieza	Fácil de limpiar	Cierta dificultad en la eliminación de componentes adsorbidos

Use recipientes de boca ancha en la mayoría de los casos. Esta estructura permitirá el llenado y eliminación fácil de la muestra. También es de limpieza fácil, secado rápido y puede almacenarse invertido. Use un frasco de cuello angosto cuando deba minimizarse la interacción con el recubrimiento de la tapa o con el ambiente exterior. Use un contenedor de vidrio limpiado con solvente para la recolección de muestra para plaguicidas.

Use recipientes desechables cuando el costo de la limpieza sea alto. Estos recipientes deben prelimpiarse y esterilizarse. El tipo de recipiente desechable más usado de este tipo es el contenedor cúbico de polietileno limpio y estéril para el comprador. Sin embargo, ya que su forma cúbica y lados flexibles los hacen casi imposibles de limpiarse completamente, use estos recipientes solo una vez.

Limpieza de recipientes

El siguiente procedimiento debe seguirse para lavar los recipientes y tapas para parámetros inorgánicos y generales:

1. Lave los recipientes y tapas con un detergente no fosfatado y talle fuertemente con un cepillo; si es posible, lave los recubrimientos y tapas por separado.
2. Enjuague con agua potable, después con agua destilada.
3. Invierta para drenar y secar.
4. Inspeccione visualmente para detectar cualquier contaminación antes del almacenamiento.
5. Si el recipiente requiere limpieza adicional, enjuague con una disolución de ácido crómico (35 mL de una disolución de dicromato de sodio en 1 L de ácido sulfúrico; esta disolución puede reusarse). Después, enjuague con agua potable y agua destilada y seque como se indica arriba.

Para ciertos parámetros, se necesita un procedimiento especial de limpieza para evitar la adsorción o contaminación debido a la interacción con las paredes del recipiente. Estos procedimientos se describen abajo:

1. Metales. Si se van a analizar metales, enjuague el recipiente con una disolución de una parte de ácido nítrico y cuatro partes de agua, después con agua destilada. Si se va a analizar fósforo, enjuague el recipiente con una disolución de una parte de ácido clorhídrico y una parte de agua, seguido de un agua destilada. Trate las tapas de forma similar.
2. Orgánicos. Si se va a analizar grasas y aceites o plaguicidas, enjuague el contendor de la muestra con cloruro de metileno, seguido de acetona. Para análisis de plaguicidas, use hexano o acetona grado plaguicida. El contendor debe ser limpiado previamente con una disolución de ácido crómico como se explicó anteriormente. Trate las tapas de los recipientes de forma similar.
3. Esterilización. Para análisis microbiológicos, esterilice el recipiente y su tapa en una autoclave a 121°C por 15 minutos o por secado a 180°C por dos horas. Los frascos de plástico sensibles al calor pueden esterilizarse con óxido de etileno a bajas temperaturas. Envuelva los

frascos en papel de estraza o cubra con hoja de aluminio antes de la esterilización para protegerlo de la contaminación. Una alternativa aceptable para emergencias o de uso en campo es la esterilización de los recipientes hirviéndolos en agua por 15 minutos.

Tiempo de retención

El tiempo de retención es el intervalo de tiempo entre la recolección y el análisis. En general, mientras más corto sea el tiempo que pasa entre la recolección de una muestra y su análisis, más confiables serán los resultados analíticos.

Es imposible establecer exactamente cuánto tiempo debe permitirse entre la recolección de una muestra y su análisis; esto depende del carácter de la muestra, de los análisis particulares a realizarse y de las condiciones de almacenamiento.

El establecimiento de un tiempo máximo de retención es una exigencia científica, normativa y ética que garantiza la validez, representatividad y trazabilidad de los resultados analíticos. La definición de este tiempo debe basarse en una evaluación detallada de los parámetros críticos que afectan la estabilidad de los analitos, incluyendo factores fisicoquímicos, microbiológicos y ambientales, así como consideraciones logísticas y operativas.

El incumplimiento de los tiempos de retención puede comprometer gravemente la validez de los resultados y la toma de decisiones en materia de salud pública, protección ambiental e industrial, y en la mayoría de los casos, la repetición del muestreo y análisis es la única alternativa aceptable. Las estrategias de corrección, como la aplicación de factores de degradación o el uso de métodos alternativos de análisis, deben aplicarse solo en casos excepcionales y con la debida justificación y documentación.

La implementación de sistemas de gestión de calidad basados en normas internacionales como la ISO 15189:2022 y la ISO/IEC 17025, la capacitación continua del personal, la utilización de tecnologías de análisis *in situ* y la digitalización de la cadena de custodia son herramientas clave para mejorar la gestión del tiempo de retención y garantizar la fiabilidad de los resultados analíticos.

En contextos de difícil acceso o condiciones logísticas adversas, la planificación cuidadosa, la adaptación de los procedimientos y la transparencia en la documentación son esenciales para minimizar los riesgos y asegurar la interpretación adecuada de los datos. El avance de la tecnología y la investigación en estabilidad de analitos seguirán ampliando las posibilidades de gestión y control del tiempo de retención, contribuyendo a la mejora continua de la calidad y la representatividad de los análisis de agua.

En definitiva, el tiempo de retención de las muestras de agua no es solo un parámetro operativo, sino un componente esencial de la garantía de calidad, la protección de la salud y el medio ambiente, y la credibilidad científica y legal de los resultados analíticos. Su gestión adecuada requiere un enfoque integral, basado en la evidencia científica, la normativa vigente y la mejora continua de los procesos y tecnologías involucradas.

La investigación en la estabilidad de los analitos presentes en el agua y el desarrollo de modelos matemáticos para la estimación de tasas de degradación están permitiendo una mejor comprensión de los procesos que afectan la validez de los resultados analíticos. Estos estudios son esenciales para la definición de factores de corrección y la justificación científica de los tiempos máximos de retención establecidos en las normativas internacionales. Sin embargo, la aplicación de factores de corrección sigue siendo un tema controvertido, debido a la variabilidad inherente de las matrices de agua y a la incertidumbre asociada a la estimación de las tasas de degradación. Por ello, la mayoría de las normativas recomiendan su uso solo en casos excepcionales y con la debida justificación y documentación.

En el caso de compuestos orgánicos, los tiempos máximos de retención varían según el tipo de compuesto y la preservación aplicada. Es fundamental considerar que estos tiempos representan máximos y el análisis debe realizarse lo antes posible para garantizar resultados óptimos (Tabla 18).

Tabla 18. Tiempo máximo de retención según tipo de compuestos: compuestos orgánicos volátiles (COV) o compuestos orgánicos semivolátiles (COSV)

Tipo de compuesto	Tiempo máximo de retención
COV en agua (refrigerados solamente)	7 días técnicos/5 días contractuales
COV en agua (acidificados y refrigerados)	14 días técnicos/10 días contractuales
COSV	Generalmente de 7 a 14 días dependiendo del compuesto específico
Muestras para bioensayos	Tiempos significativamente cortos, generalmente de 24 a 48 horas

El análisis preciso de compuestos orgánicos en diferentes matrices acuosas requiere procedimientos rigurosos de muestreo y preservación. Por lo que es importante establecer metodologías basadas en estándares normalizados para garantizar la representatividad e integridad de las muestras desde su recolección hasta el análisis final, considerando las diferencias entre compuestos volátiles, semivolátiles y purgables. Un factor que influye en estas metodologías es la gran variedad de compuestos orgánicos naturales y sintéticos que hacen muy difícil establecer un solo listado que contenga reglamentaciones para cada uno de ellos; en estos casos deben aplicarse criterios científicos, toxicológicos y legales de acuerdo a los objetivos del programa de muestreo.

Los métodos analíticos para la identificación de compuestos orgánicos pueden encontrarse en muchas publicaciones como *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (38) y en algunas normas mexicanas (39). Sin embargo, los resultados analíticos son solo significativos si la muestra analizada es verdaderamente representativa del medio que se está examinando. Los análisis químicos para compuestos orgánicos presentes en bajas concentraciones establecen altas demandas en las técnicas de muestreo.

Antes de iniciar cualquier procedimiento de muestreo, es fundamental establecer los objetivos analíticos claros que determinarán el tipo de equipo, recipientes, técnicas de preservación y tiempos máximos de retención. Los programas de muestreo deben diseñarse considerando, entre otros:

- Tipo de compuestos orgánicos a analizar.
- Niveles de concentración esperados.

- Características de la matriz acuosa.
- Posibles interferencias.
- Requisitos regulatorios aplicables.

Muestreo manual

Las consideraciones establecidas al inicio de este capítulo son aplicables. Sin embargo, el recolector de muestras y el recipiente deben construirse de vidrio borosilicato para minimizar la contaminación de la muestra (Figura 10). Las muestras simples obtenidas para el análisis de compuestos orgánicos purgables se sellan para eliminar el aire atrapado (espacio de cabeza).



Figura 11. Ejemplos de recipientes para recolectar muestras destinadas al análisis de compuestos orgánicos.

Muestreo automático

A pesar de que el muestreo automático continuo es probablemente el mejor método para la recolección de muestras verdaderamente representativas, deben tomarse ciertas precauciones.

El equipo de muestreo automático debe estar libre de *Tygon*® y otra fuente potencial de contaminación como componentes de plástico o caucho. La tubería de *Tygon*® es una fuente potencial de contaminación de ésteres de ftalato. El teflón es aceptable y puede usarse en los sistemas de muestreo como se requiera.

Los muestreadores automáticos usados para obtener muestras para análisis de compuestos orgánicos en concentraciones bajas pueden requerir características de diseño especiales.

Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles constituyen un grupo de sustancias caracterizadas por su alta presión de vapor y baja solubilidad en agua. Para la identificación y cuantificación de compuestos orgánicos volátiles (COV) en agua potable, aguas subterráneas y otros sistemas hídricos. Se puede mencionar el Método EPA 524.2 (40), que está diseñado específicamente para la identificación y cuantificación de aproximadamente 85 COV diferentes en agua potable, aguas subterráneas y otros sistemas hídricos. Además, también está la NMX-AA-185-SCFI-2021, que aplica a la medición de COV en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (39).

Para el muestreo de COV se requiere extremo cuidado para prevenir pérdidas por volatilización:

- **Recolección.** Llenar completamente el recipiente sin dejar espacio de cabeza.
- **Evitar agitación.** Minimizar la turbulencia durante el llenado.
- **Recipientes.** Viales de vidrio con septos de teflón/silicona.
- **Duplicados de campo.** Recomendados para control de calidad.

Según el método SW-846 8260, las muestras de agua para análisis de COV deben ser preservadas mediante enfriamiento a $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un tiempo de retención técnico de 7 días desde la recolección o 5 días desde su recepción en el laboratorio. Alternativamente, acidificadas con HCl a $\text{pH} < 2$ y refrigeradas a $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que extiende el tiempo de retención técnico a 14 días desde la recolección o 10 días desde su recepción en el laboratorio (41).

Compuestos orgánicos purgables

Los compuestos orgánicos purgables (COP) pueden analizarse mediante métodos como EPA-EAD 624.1 (42) que utiliza cromatografía de gases con detección por espectrometría de masas. Estos compuestos son extraídos de la matriz acuosa mediante técnicas de purga y trampa.

Las técnicas para muestreo de COP comparten muchas similitudes con las utilizadas para COV.

- Recipientes. Viales de vidrio con cierre hermético.
- Llenado. Sin espacio de cabeza para minimizar pérdidas.
- Preservación. Refrigeración inmediata.
- Agentes reductores. Adición de tiosulfato de sodio cuando hay presencia de cloro residual.

Recolecte muestras simples en recipientes de vidrio. El procedimiento para el llenado y sellado de los recipientes para las muestras es el siguiente:

- Lentamente llene cada recipiente hasta desbordarse. Con cuidado coloque el recipiente a nivel de la superficie. Coloque el septo con la cara de teflón boca abajo sobre el menisco convexo de la muestra.
- Selle la muestra con una tapa de rosca. Para asegurarse que la muestra ha sido propiamente sellada, invertir la muestra y dar unos golpes ligeros a la tapa sobre una superficie sólida. La ausencia de burbujas de aire atrapadas indica un sellado adecuado. Si hay burbujas de aire presentes, abra el frasco, añada muestra adicional y vuelva a sellar (de la misma manera como se estableció). La muestra debe permanecer herméticamente sellada hasta ser analizada.
- Mantener las muestras a 4°C durante el transporte y almacenamiento previo al análisis.
- Si la muestra se toma de agua de la llave, abra la llave y permita que el sistema se lave. Cuando la temperatura del agua se haya estabilizado, ajuste el flujo a cerca de 500 mL/min y recolecte las muestras como se indica arriba.

Compuestos orgánicos semivolátiles

Los compuestos orgánicos semivolátiles (COSV) presentan una presión de vapor intermedia y generalmente mayor solubilidad en agua que los COV. El método EPA 8270E (43) es ampliamente utilizado para el análisis de COSV en muestras de aguas residuales. El muestreo para COSV requiere consideraciones específicas:

- Recipientes. Frascos de vidrio ámbar con tapas revestidas de teflón
- Volumen. Generalmente, de 1 a 4 L, dependiendo de los límites de

detección requeridos.

- Filtración. No recomendada en campo a menos que sea específicamente requerida por el método.
- Blancos de campo. Esenciales para identificar posible contaminación durante el muestreo.

Recolecte muestras simples en recipientes de vidrio. Deben seguirse las prácticas convencionales de muestreo, excepto que el frasco no debe prelavarse con la muestra antes de la recolección. Las muestras compuestas deben ser recolectadas en recipientes de vidrio refrigerados de acuerdo con los requerimientos del programa. El equipo de muestreo automático debe estar libre de Tygon® y otra fuente potencial de contaminación.

Diferencias entre métodos de muestreo para compuestos orgánicos

Los protocolos de muestreo varían significativamente entre COV, COSV y COP, debido a sus propiedades fisicoquímicas. Estas diferencias se manifiestan en cinco aspectos críticos:

1. Elección de recipientes y condiciones de llenado.
2. Técnicas de preservación.
3. Manejo de muestras en campo.
4. Tiempos máximos de retención.
5. Técnicas analíticas asociadas.

La selección adecuada de recipientes y las condiciones de llenado influyen directamente en la integridad, representatividad y confiabilidad de los resultados analíticos. En la Tabla 19 se examinan los aspectos técnicos fundamentales que justifican la importancia de estos factores, considerando la clasificación aplicada a los compuestos orgánicos, cada uno con características fisicoquímicas particulares que requieren consideraciones específicas durante el proceso de muestreo.

Los fenómenos de adsorción a las paredes del recipiente pueden reducir significativamente la concentración de compuestos orgánicos en solución, especialmente para sustancias hidrofóbicas. La magnitud de

la adsorción depende de las propiedades fisicoquímicas del compuesto (principalmente hidrofobicidad), la naturaleza del material del recipiente, la relación superficie/volumen, temperatura, pH y fuerza iónica.

Los compuestos semivolátiles con elevado coeficiente de partición octanol-agua (K_{ow}), como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y pesticidas organoclorados, presentan particular tendencia a la adsorción en superficies. Esta problemática puede mitigarse mediante la adición de solventes orgánicos miscibles (ej., metanol al 1-5 %) que compiten por los sitios de adsorción, aunque esta aproximación debe evaluarse considerando posibles interferencias en el análisis posterior.

La adsorción no uniforme a lo largo del tiempo puede generar resultados incoherentes en análisis secuenciales de una misma muestra. Por tanto, la estandarización del tiempo transcurrido entre el muestreo y el análisis resulta fundamental para la comparabilidad de resultados.

Tabla 19. Diferencias en la elección de recipientes de muestreo y condiciones de llenado para compuestos orgánicos (44) (45).

Parámetro	COV/COP	COSV
Material	Vidrio con septo PTFE/silicona	Vidrio ámbar con tapa teflón
Capacidad	40-60 mL (llenado completo)	1-4 L
Espacio de cabeza	Cero (eliminación total)	Permitido
Ejemplo método	EPA 524.2	EPA 8270E

Las técnicas de preservación de muestras acuosas son fundamentales para garantizar la integridad analítica de compuestos orgánicos, cuya estabilidad varía significativamente según su clasificación. La degradación, adsorción o volatilización durante el almacenamiento pueden generar sesgos que invalidan los resultados, especialmente en concentraciones traza ($\mu\text{g/L}$ o inferiores). Esta diferencia se hace patente en la Tabla 20, donde se analizan los métodos específicos para cada categoría, basándose en estudios técnicos y evidencias experimentales recientes.

Tabla 20. Diferencias en las técnicas de preservación.

COV	COSV	COP
Refrigeración inmediata a 4°C $\pm$ 2°C más acidificación con HCl (pH <2) cuando no hay carbonatos	Refrigeración a 4°C sin aditivos químicos	Similar a COV, pero con énfasis en evitar cualquier agitación durante el transporte
Adición de tiosulfato sódico si existe cloro residual		

El manejo de muestras en campo constituye una etapa determinante para garantizar la integridad de compuestos orgánicos en aguas, especialmente en el caso de volátiles, semivolátiles y purgables. Las decisiones técnicas durante esta fase influyen directamente en la representatividad de los resultados, con márgenes de error que pueden superar el 50 % si no se aplican protocolos rigurosos (Tabla 21). Este análisis se fundamenta en estudios de la EPA y metodologías validadas para cada categoría de compuestos.

Tabla 21. Diferencias en el manejo de muestra en campo para análisis de compuestos orgánicos (46).

Tipo de compuesto orgánico	Manejo de muestra en campo
COV/COP	• Prohibida la filtración previa • Muestreo por sistema de flujo laminar • Uso obligatorio de duplicados de campo
COSV	• Permite filtración cuando hay sólidos suspendidos • Homogeneización mecánica aceptable • Muestras compuestas permitidas

El tiempo máximo de retención y las técnicas analíticas seleccionadas son críticos para garantizar la integridad de muestras y la precisión de resultados en el análisis de compuestos orgánicos en aguas. Su relevancia varía según la clasificación de los compuestos (Tabla 22).

Otros factores transversales críticos a considerar incluyen la legislación, las matrices complejas y el control de calidad (ej., uso de estándares internos).

Tabla 22. Diferencias entre los tiempos máximos de retención para compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y purgables (46).

Condición	COV/COP	COSV
Solo refrigeración	7 días	14 días
Acidificados	14 días	No aplica
Congelación	No recomendada	Aceptable

El incumplimiento de los tiempos de retención o el uso de técnicas inadecuadas genera sesgos analíticos irreversibles (Tabla 23), especialmente en compuestos volátiles y purgables. Métodos como GC-MS/MS y protocolos de preservación estandarizados (ej., acidificación, refrigeración) son esenciales para cumplir requisitos regulatorios y asegurar la trazabilidad ambiental.

Tabla 23. Contraste de las técnicas analíticas asociadas a los compuestos orgánicos.

COV	COP	COSV
Purga y trampa con GC-MS (método EPA 524.2)	Sustracción matemática (TOC - NPOC)	Extracción líquido-líquido o Soxhlet
Medición directa con detectores PID	Sistemas de purga con detección electroquímica	Cromatografía de gases con detectores específicos

GC-MS: Cromatografía de gases y espectrometría de masas, siglas del inglés *Gas Chromatography-Mass Spectrometry*.

TOC: Carbono orgánico total, siglas del inglés Total organic carbon.

NPOC: Carbono orgánico no purgable, siglas del inglés Non-Purgeable Organic Carbon.

PID: Detector de fotoionización, siglas del inglés Photoionization Detector.

Los protocolos mexicanos para la identificación y cuantificación de compuestos orgánicos tienen equivalencias con las normas ISO 5667-1:2023 (47) y métodos EPA (42) (40).

Analice las muestras tan pronto como sea posible. Preserve y almacene las muestras recolectadas para análisis de acuerdo a las recomendaciones si se van a aplicar los métodos de análisis estandarizados o los descritos por las normas mexicanas existentes, o siga las recomendaciones del método de análisis seleccionado. El número de métodos recomendados por las normas mexicanas para el análisis de compuestos orgánicos es

limitado; por esta razón se hace referencia principalmente a los emitidos por otros organismos internacionales reconocidos.

Capítulo 6

Muestreo para análisis de radiactividad

La radiactividad en el medioambiente se debe a los procesos de desintegración de radionúclidos individuales, que son los isótopos inestables de los diversos elementos químicos. Los isótopos radiactivos poseen las mismas propiedades químicas que los isótopos estables de un elemento determinado. Las normas y precauciones que deben observarse para la recolección, manipulación y conservación de muestras de un elemento o compuesto específico se aplican también a sus formas radiactivas.

Las pruebas radiológicas sobre contaminación radiactiva en aguas revelan una diversidad significativa en las metodologías de muestreo, análisis y evaluación de riesgos radiológicos a nivel mundial. La investigación científica en este campo abarca desde el análisis de radionúclidos naturales como el ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{228}Ra y ^{40}K hasta la evaluación de contaminantes artificiales como el ^3H y ^{137}Cs .

Las concentraciones de radiactividad encontradas varían considerablemente según la región geográfica, el tipo de fuente de agua y la presencia de actividades nucleares antropogénicas, con valores que oscilan desde niveles de fondo natural hasta concentraciones que requieren monitoreo continuo y evaluación de riesgos para la salud pública.

Los radionúclidos de origen natural constituyen la base de la mayoría de los programas de monitoreo radiológico en aguas.

- El ^{226}Ra , con una vida media de 1600 años (48), es uno de los parámetros más frecuentemente analizados debido a su presencia ubicua en aguas subterráneas y su significancia radiológica.
- El ^{40}K , con una vida media de 1.3×10^9 años (48), representa otro radionúclido natural importante.
- El ^{222}Rn , debido a su corta vida media de 3.8 días (49) y su naturaleza gaseosa, requiere métodos de análisis especializados.

Los radionúclidos artificiales, particularmente el ^3H , han adquirido mayor relevancia debido a incidentes nucleares y liberaciones controladas. El caso de Fukushima ilustra la complejidad del manejo de tritio en agua, donde más de 1 millón de toneladas de agua radiactiva han sido liberadas al océano después de la remoción de radionúclidos de larga duración como ^{137}Cs y ^{90}Sr (50). El tritio, como agua tritiada (HTO, siglas de hidrógeno, tritio y oxígeno), presenta desafíos únicos debido a

su comportamiento químico idéntico al agua normal, lo que dificulta su separación y concentración.

Los isótopos de uranio, ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , son particularmente relevantes en áreas con antecedentes de pruebas nucleares o minería de uranio. Las relaciones isotópicas proporcionan información valiosa sobre el origen y los procesos de enriquecimiento del uranio en el ambiente.

Para indicadores de radiactividad bruta, se aplica la determinación de radiactividad alfa y beta bruta, que representa un método de cribado rápido y económico para evaluar los niveles generales de radioactividad en agua. Según las directrices de la OMS, el conteo de alfa y beta brutos constituye la prueba preliminar estipulada para la determinación de la calidad del agua.

En México, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) requiere que los laboratorios que realicen análisis radiológicos estén acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y participen en programas de intercomparación internacional. Además, los laboratorios que realicen muestreo y análisis de radiactividad alfa y beta bruta, la CNSNS requiere la obtención de una autorización para realizar actividades con material radiactivo y/o fuentes de radiación ionizante tipo A, que es una licencia de operación que permite el uso y manejo de fuentes de radiación ionizante en actividades industriales, médicas o de investigación (51).

Consideraciones para el muestreo

Los residuos radiactivos provienen de instalaciones nucleares tan diversas como minas y fábricas de uranio y torio, plantas de enriquecimiento y fabricación de combustible, centrales nucleares, reactores de prueba, plantas de reprocesamiento de combustible, lugares de enterramiento de residuos, hospitales con laboratorios de medicina nuclear, emplazamientos de armas nucleares, productores de productos radioquímicos, laboratorios de investigación y ensayo, y fabricantes de productos que incorporan sustancias radiactivas. Las descargas rutinarias de gases o líquidos desde instalaciones nucleares a zonas no restringidas contienen concentraciones relativamente bajas de material radiactivo; los residuos de alta actividad

se condensan, sellan y almacenan in situ o se transportan a vertederos de residuos radiactivos. Los tipos y cantidades de radionúclidos descargados varían considerablemente según la instalación.

Muchos radionúclidos naturales se encuentran en el suelo, el agua, el aire y la materia viva. Además, los radionúclidos artificiales se han extendido ampliamente en el medio ambiente natural durante las últimas décadas. Debido a su presencia, es necesario evaluar la radiactividad de fondo en los puntos de muestreo para determinar la cantidad real que una instalación nuclear aporta al medio ambiente. Las muestras de control tomadas aguas arriba del punto de descarga de líquidos proporcionan datos sobre los tipos y las cantidades de radionúclidos de fondo.

Además, los radionúclidos naturales y artificiales se presentan como impurezas en muchos materiales utilizados para contenedores de muestras, equipos y blindajes de detección de radiación, y reactivos químicos. Dado que estos contaminantes pueden producir interferencias en los análisis de radionúclidos, sus efectos deben evaluarse antes del muestreo.

Ubicación d el sitio de muestreo

A menos que se especifique en la normatividad mexicana o internacional cómo seleccionar los sitios adecuados para el muestreo, debe basarse en el criterio profesional. Las consideraciones siguientes son sugerencias de la EPA para el muestreo de aguas para pruebas radiológicas (26).

- Aguas superficiales. En los arroyos que reciben residuos líquidos, recolectar una muestra tanto aguas arriba como aguas abajo del punto de descarga. Obtener una muestra aguas abajo, fuera del área restringida, en un lugar no menos cercano a 10 veces el ancho del arroyo para permitir la mezcla y dilución. En emplazamientos de instalaciones en lagos o grandes masas de agua, tomar muestras cerca, pero más allá, del área turbulenta causada por la descarga. Registrar el caudal de descarga en el momento del muestreo.
- Agua potable. Muestrear todos los suministros de agua con tomas aguas abajo y en un radio de 16 km de una instalación nuclear. Si no existe ninguna, muestrear el primer suministro de agua en un radio de 160 km.

- Agua subterránea. El monitoreo es necesario cuando una instalación descarga residuos radiactivos a fosas o zanjas. Cuando se utilice agua subterránea local para consumo humano o riego, como mínimo, se debe muestrear el pozo afectado más cercano. El movimiento sub-superficial de la mayoría de los radionúclidos se ve retardado por la capacidad de filtración e intercambio iónico del suelo; sin embargo, el tritio se mueve más rápidamente que la mayoría de los radionúclidos.
- Sedimentos. Las muestras para detectar la acumulación de radionúclidos no disueltos o adsorbidos en lechos de arroyos u otras masas de agua que reciben efluentes líquidos de instalaciones nucleares se recolectan:
 - Aguas abajo, cerca del emisario de descarga, pero más allá de la zona turbulenta.
 - Aguas abajo de la descarga, en lugares donde se observa acumulación de sedimentos, como en curvas de arroyos o embalses de presas.
 - Aguas arriba, cerca del emisario de descarga, pero más allá de su influencia, para determinar los radionúclidos de fondo.

Volumen, recipientes y preservación de muestras

La determinación del volumen de muestra necesario depende del tipo y número de análisis a realizar y de la sensibilidad de los instrumentos analíticos disponibles. En la Tabla 24 hay referencia para volúmenes mínimos de muestra.

La acidificación de las muestras es un paso crucial para prevenir la adsorción de radionúclidos en las paredes de los recipientes. Los estudios indican que la adición de ácido nítrico hasta alcanzar un $\text{pH} < 2$ es efectiva para mantener los radionúclidos en solución durante el transporte y almacenamiento de las muestras.

Tabla 24. Volúmenes de muestra mínimos sugeridos por EPA (26).

Medición	Volumen, L
Espectroscopía de rayos gamma, detector NaI(Tl) o yoduro de sodio activado con talio	3.5*
Espectroscopía de rayos gamma, detector GeLi o germanio de litio	0.4
Solo radiactividad alfa y beta bruta	0.1
Centelleo líquido, sólo tritio	0.01

*El agua puede utilizarse posteriormente para análisis que requieran separaciones químicas (ej., ^{89}Sr , ^{90}Sr).

Utilice recipientes para muestras que minimicen las pérdidas de radionúclidos por adsorción u otros procesos durante la recolección y el almacenamiento. Se prefieren los recipientes de hidrocarburos fluorados (ej., teflón) debido a su resistencia a la adsorción. También se recomiendan el polietileno y el cloruro de polivinilo. Los recipientes de vidrio y metal tienden a retener radionúclidos. Los frascos de vidrio también son más propensos a romperse durante la manipulación.

Si persisten los problemas de adsorción, lave los recipientes y el equipo de muestreo con HCl o HNO_3 antes del muestreo o enjuague los recipientes y el equipo con el líquido que se va a recolectar antes del muestreo final. Compruebe la adsorción analizando los recipientes usados mediante espectroscopía de rayos gamma cuando exista este tipo de emisión de radionúclidos. Para otros emisores, utilice lixivitaciones ácidas sucesivas con agua regia caliente y analice el lixiviado.

Deseche los recipientes después de su uso para eliminar la posibilidad de contaminación cruzada por reutilización. Si por razones económicas es necesario volver a utilizar los contenedores más caros, realice una prueba para detectar contaminación adsorbida como se describe anteriormente.

Filtre las muestras de agua y aguas residuales para separar líquidos y sólidos cuando se determine el contenido de radionúclidos en las fracciones de sólidos suspendidos y materia disuelta, o en ambas. Filtre tan pronto como sea posible después de la recolección para asegurar que no se produzca redistribución durante el almacenamiento antes del análisis. Utilice filtros de membrana o fibra de vidrio, ya que estos tipos resisten

los efectos de adsorción. Filtre antes de añadir preservadores u otras sustancias a la muestra, ya que pueden alterar su distribución.

Los radionúclidos están sujetos a numerosos procesos químicos y físicos poco comprendidos en concentraciones muy bajas (partes por billón o menos), típicas de la mayoría de las muestras de agua ambiental. Las variaciones en la concentración u homogeneidad de la muestra original pueden deberse a:

- a) Adsorción en el dispositivo de muestreo, las paredes del recipiente o material sólido en la muestra.
- b) Coprecipitación de radionúclidos debido a la precipitación de Fe y Mn en muestras de agua subterránea expuestas al aire.
- c) Intercambio iónico con componentes de recipientes de vidrio.
- d) Absorción por bacterias, algas u otra materia biológica en la muestra.
- e) Formación de coloides.

Se cree que muchos de estos problemas ocurren porque las cantidades de isótopos estables son insuficientes para servir como portador de los nucleidos radiactivos del mismo elemento.

La técnica estándar de conservación de radionúclidos en muestras de agua y aguas residuales es la acidificación a un $\text{pH} < 2$ con HCl o HNO_3 . Existen varias excepciones como ^3H , ^{14}C , radiocesios, radioyodos.

Agregue el preservador ácido después de la recolección de la muestra, pero no antes de la filtración o tan pronto como sea posible, y no lo demore más de cinco días. Cuando no se desee la conservación ácida: (a) agregue portadores isotópicos de los mismos elementos que los radionúclidos; (b) refrigere las muestras a o cerca de su temperatura de congelación para retardar las velocidades de reacción química e inhibir el crecimiento bacteriano.

En México, la NOM-201-SSA1-2015 establece en su apartado de "Preservación de muestras", que para el análisis radiológico de agua para consumo humano (29): "Las muestras deben ser colectadas en envases de plástico en un mínimo de 1 L, acidificándolas en el momento del muestreo con ácido nítrico hasta obtener un pH entre 1.5 y 2.5; verificar el pH final con tira reactiva".

Procedimiento general de muestreo

El siguiente procedimiento resume las buenas prácticas para la recolección y conservación de muestras de cuerpos de agua, agua potable y aguas residuales para mediciones de radionúclidos. Estas directrices se aplican siempre que no existan circunstancias inusuales:

1. Enjuague las líneas de muestreo, el equipo u otros aparatos y el recipiente de muestra con el medio de muestreo para minimizar los efectos de adsorción. Utilice el tipo de recipiente que se ha recomendado.
2. Evite los residuos flotantes y los sedimentos del fondo al muestrear aguas superficiales. Al tomar alícuotas de muestras grandes que contengan cantidades significativas de sólidos en suspensión, agite o mezcle vigorosamente para asegurar submuestras representativas.
3. Lave el dispositivo de muestreo con agua destilada para minimizar la contaminación de las muestras subsiguientes.
4. Filtre la muestra lo antes posible después de la recolección cuando se deba determinar la distribución de radionúclidos en las fases solubles o insolubles. Utilice filtros de membrana o de fibra de vidrio.
5. Añada el preservador requerido a las muestras líquidas. Cuando se indique HCl concentrado o HNO_3 , añádalo hasta obtener un $\text{pH} < 2$. En el caso de mezclas de radionúclidos, para algunos (^3H , ^{14}C , ^{131}I) de los cuales no se recomienda la conservación con ácido, recopile muestras repetidas y trate solo una con ácido.
6. Selle herméticamente el recipiente de la muestra. Complete los datos en la etiqueta de la muestra, incluyendo la hora de recolección para correcciones por desintegración.
7. Analice las muestras que contengan radionúclidos de vida corta lo antes posible.
8. Deseche los recipientes de muestra después de su uso o realice pruebas de contaminación si se van a reutilizar recipientes costosos.

Capacidad de detección

La capacidad de identificar y medir concentraciones muy bajas de radionúclidos depende del tipo de instrumentación de conteo disponible y de

su sensibilidad. Un elemento importante que afecta la capacidad de detección es el nivel de fondo del instrumento, resultante de la radiactividad ambiental en la instalación de conteo, presente en el blindaje del detector y en el propio equipo de detección. Los equipos de conteo actualmente disponibles, junto con un control de fondo adecuado, proporcionan suficiente sensibilidad para medir radionúclidos a niveles inferiores a los estándares regulatorios.

El conocimiento de las capacidades de detección facilita el diseño del programa de muestreo, como el volumen de muestra necesario.

Algunos prefieren el conteo alfa y beta bruto, ya que los instrumentos son relativamente económicos y lo suficientemente sensibles como para determinar el cumplimiento de ciertas normas, como las del agua potable. Sin embargo, el uso eficaz de las mediciones brutas requiere del conocimiento de la composición de los radionúclidos.

Técnicas de medición de radionúclidos

El campo de la radioquímica analítica ha desarrollado una amplia gama de técnicas especializadas para la detección, separación y cuantificación de radionúclidos en muestras ambientales, biológicas e industriales. Las técnicas de separación química, los sistemas de detección especializados y los métodos de espectroscopía gamma representan los pilares fundamentales de la radioquímica analítica moderna, cada uno diseñado para abordar desafíos específicos en la identificación y cuantificación de radionúclidos con alta precisión y selectividad.

Técnicas de separación química

Las técnicas de separación química constituyen la base fundamental para el análisis radioquímico, permitiendo el aislamiento selectivo de radionúclidos específicos de matrices complejas. Estos métodos son esenciales cuando se requiere determinar radionúclidos a niveles de ultratrazas, donde la interferencia de elementos de la matriz y otros radionúclidos puede comprometer significativamente la precisión de las mediciones (52). La selección del método de separación adecuado depende críticamente de

la naturaleza química del radionúclido objetivo, la composición de la matriz de la muestra y el método de medición posterior que se empleará.

Resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico representan una clase especializada de materiales separadores que operan mediante el intercambio reversible de iones entre la resina y la solución (53). Estas resinas consisten típicamente en una matriz polimérica con grupos funcionales químicos ionizables que pueden intercambiar iones de manera selectiva. El principio fundamental se basa en la afinidad relativa de diferentes iones por los sitios de intercambio en la resina, permitiendo la separación basada en diferencias en carga, tamaño iónico y afinidad química.

Contadores proporcionales internos

Los contadores proporcionales internos constituyen una tecnología de detección altamente especializada diseñada para mediciones de radiación en entornos de bajo fondo (54). El principio operativo se basa en la ionización de un gas contador (comúnmente ^3He) cuando las partículas radiactivas interactúan con las moléculas del gas, creando pares ion-electrón que son recolectados por un campo eléctrico aplicado (54). La característica distintiva de estos detectores es que la muestra radiactiva se introduce directamente en el volumen activo del detector, maximizando la eficiencia geométrica de detección. Los diferentes tipos de partículas (alfa, beta, neutrones) producen patrones de ionización distintos que resultan en tiempos de subida característicos de los pulsos de salida.

Contadores beta de bajo fondo

Los contadores beta de bajo fondo representan instrumentos especializados diseñados para detectar radiación beta con niveles de ruido de fondo extremadamente reducidos, esenciales para mediciones de radionúclidos de baja actividad. El diseño fundamental incorpora múltiples estrategias de reducción de fondo, incluyendo blindaje pasivo (materiales de alta

densidad, capa exterior de Pb y capas internas de Cu o Fe), sistemas de anticoincidencia activa (para detectar y vetar eventos causados por radiación cósmica o radiación de fondo penetrante) y cámaras de conteo optimizadas geométricamente (55).

Contadores de centelleo líquido

Los contadores de centelleo líquido (LSC, siglas del inglés *Liquid Scintillation Counting*) representan una de las técnicas más versátiles y ampliamente utilizadas para la detección de radiación alfa y beta (55) (56). El principio fundamental se basa en la conversión de energía radiativa en luz visible mediante un proceso de dos pasos: la transferencia de energía desde la partícula radiactiva a un solvente centelleante primario, seguida por la transferencia de energía a un flúor secundario que emite fotones en el rango visible. Una característica técnica distintiva de los sistemas LSC modernos es su capacidad para discriminar entre eventos alfa y beta basándose en las diferencias en la forma del pulso (56). Las partículas alfa, debido a su alta densidad de ionización, producen pulsos con diferentes características temporales comparadas con las partículas beta.

El LSC es la técnica preferida para radionúclidos emisores de radiación beta pura como el ^3H , ^{14}C y radionúclidos alfa como algunos isótopos de uranio y radio. Esta técnica ofrece alta eficiencia de detección debido a la íntima mezcla entre la muestra y el material centelleador. Los contadores de centelleo líquido de ultrabajo nivel son capaces de detectar actividades tan bajas como 10^{-2} Bq/L para tritio (57).

En México, la NOM-201-SSA1-2015 propone la técnica de recuento por centelleo líquido para la determinación de radiactividad alfa y beta total en agua y hielo para consumo humano.

Emanación de radón y conteo por célula de centelleo alfa

La medición de radón mediante emanación y conteo por células de centelleo alfa representa una técnica especializada para la detección de ^{222}Rn y sus productos de desintegración (58) (59). El método se basa en la recolección de gas radón emanado de muestras sólidas o disuelto en

muestras líquidas, seguido por su transferencia a una célula de centelleo donde los eventos de desintegración alfa se detectan ópticamente.

Espectroscopía de rayos gamma

La espectroscopía de rayos gamma constituye una técnica fundamental para la identificación y cuantificación de radionúclidos emisores gamma, proporcionando información tanto cualitativa como cuantitativa basada en las energías características de los fotones emitidos (60). Los dos tipos principales de detectores son: (a) detectores de yoduro de sodio activado con talio NaI(Tl) de 10cm x 10cm, y (b) detectores de germanio-litio Ge(Li) de 85 cm³, que representan tecnologías complementarias con características de rendimiento distintas.

Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

Aunque no es específicamente una técnica radiométrica, la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (EM-PAI) se emplea para determinar concentraciones elementales totales de elementos radiactivos como uranio y torio. Esta técnica ofrece límites de detección extraordinariamente bajos, típicamente en el rango de ng/L para uranio, y puede proporcionar información isotópica cuando se combina con técnicas de separación de masas de alta resolución. EM-PAI es particularmente útil para evaluar la concentración total de uranio en agua, que luego puede correlacionarse con las mediciones de actividad específica obtenidas por espectrometría alfa. La técnica también permite la determinación simultánea de metales pesados asociados que pueden indicar procesos de lixiviación o contaminación (57).

Seguridad radiológica

El almacenamiento de grandes cantidades o volúmenes de muestras que contienen radiactividad es una fuente potencial de exposición para los trabajadores que ocupan el área. Sin embargo, esta exposición es

improbable con las muestras ambientales debido al bajo contenido de radionúclidos.

En caso de duda, inspeccione el área periódicamente con un instrumento de medición beta-gamma, como un contador Geiger-Mueller. Tenga en cuenta que los recipientes de muestras reducen toda la radiación de partículas alfa y gran parte de la radiación de partículas beta. Si en las estaciones de trabajo se detectan niveles de radiación superiores al fondo del instrumento, consulte a un especialista en seguridad radiológica para obtener información sobre los procedimientos para reducir los niveles de exposición y las técnicas adecuadas de eliminación cuando las muestras ya no sean necesarias.

Capítulo 7

Cadena de custodia y aseguramiento de la calidad

En México, la cadena de custodia de muestras de agua para análisis y los procedimientos relacionados con el aseguramiento de la calidad de los resultados analíticos están regulados por una combinación de leyes, reglamentos, normas oficiales mexicanas y lineamientos técnicos emitidos principalmente por SEMARNAT, CONAGUA y PROFEPA.

La implementación exitosa de un programa de monitoreo depende de la capacidad para producir datos válidos y demostrar su veracidad. Además de la recolección, preservación, almacenamiento y manejo adecuado de la muestra, es necesario tener procedimientos para la identificación de la muestra y para la cadena de custodia, que aseguren la validez de los datos.

En este capítulo se dan algunas sugerencias para estos casos, pero los procedimientos y requisitos pueden cambiarse de acuerdo a las necesidades propias del programa de muestreo. En algunos procedimientos deben incluirse los lineamientos normativos que correspondan. Las sugerencias que se describen a continuación son recomendaciones generales que provienen de diferentes fuentes (61) (22).

Identificación de la muestra

El método de identificación de una muestra depende del tipo de medición o análisis a realizar. Cuando es necesario realizar mediciones en el sitio, los datos se registran directamente en la bitácora de muestreo. La información que debe quedar escrita en la bitácora debe incluir el código de campo, el código del proyecto (si es que aplica), número de las estaciones, localización de la estación o sitio de la toma de muestra, fecha, hora, nombre y firma de los muestreadores, observaciones en campo, observaciones generales y cualquier otra información que el laboratorio encargado considere conveniente. Algunos ejemplos de mediciones que se hacen en campo son: pH, temperatura, oxígeno disuelto, materia flotante, conductividad y medición del flujo.

Las muestras que no requieren mediciones en campo y que se preservan para transportarse al laboratorio deben estar identificadas con una etiqueta o cualquier otra identificación apropiada que no dé lugar a confusiones. Estas muestras se transportan del sitio de muestreo al laboratorio u otro lugar para su análisis. Antes de transportar las muestras,

es muy común que se separen en porciones según los análisis a realizar. Cada porción es preservada de acuerdo con el procedimiento aplicable al parámetro de interés y después el frasco de la muestra se identifica con una etiqueta. Las etiquetas deben llevarse con toda la información solicitada en el formato, usar tinta a prueba de agua, solo si las condiciones meteorológicas lo permiten. Por ejemplo, en la bitácora se explica que se usó lápiz para llenar las etiquetas de la muestra porque una pluma de punto rodante no funcionaría en un ambiente muy frío.

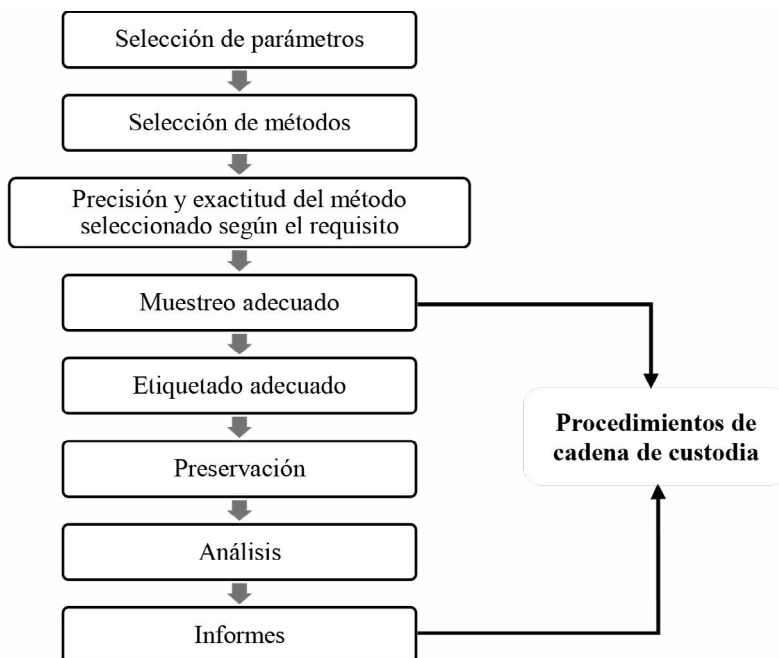
En la etiqueta de la muestra deben aparecer el código del proyecto, si aplica, el código de campo que fue asignado a la muestra, número de la estación, lugar de muestreo, fecha, hora, localización del muestreo, observaciones y cualquier otra información solicitada en el formato diseñado por el laboratorio.

Después de la recolección, separación, identificación y preservación, la muestra se mantiene bajo los procedimientos de cadena de custodia que se describen más adelante. Si una muestra compuesta o simple es dividida, se transfiere a otro frasco similar al original de donde se tomó. Las etiquetas para cada uno de los frascos se llenan de manera idéntica y se adhieren a cada uno, y se marca con la palabra “Dividida”. La etiqueta identifica a la muestra dividida cuando se mande a alguna oficina de gobierno, laboratorio, taller o compañía. De manera similar, todos los frascos que contengan muestras blanco o por duplicado deben marcarse como “Blanco” o “Duplicado”, respectivamente.

Cadena de custodia

La cadena de custodia es un documento o varios documentos donde los responsables registran la obtención de muestras, su transporte y entrega de estas al laboratorio para la realización de pruebas o de análisis (Figura 11). Debido a que la muestra recolectada sirve como evidencia legal durante las investigaciones jurídicas, su posesión debe ser fácil de determinar desde el tiempo en que son recolectadas hasta que son introducidas como evidencia en los procesos legales. Para mantener y documentar la posesión de la muestra, deben seguirse procedimientos de cadena de custodia (ver Tabla 25).

Figura 12. Los procedimientos de cadena de custodia en el análisis de la calidad del agua.



Una muestra bajo custodia se considera cuando está en posesión física individual de una persona, visible y en un lugar seguro; así, una muestra está bajo custodia si:

1. Está en su posesión, o
2. Está a su vista, después de haber estado en su posesión, o
3. Estuvo en su posesión y después fue guardada en un lugar seguro para evitar que sea alterada, o
4. Está en un área segura designada previamente.

El formato de cadena de custodia debe contener, al menos (ver Tabla 25):

- a. El nombre de la empresa y responsable del muestreo.
- b. Los datos de identificación del sitio.
- c. La fecha del muestreo.
- d. Las claves de las muestras.

- e. Nombre del laboratorio que recibe las muestras.
- f. Los análisis o la determinación requerida.
- g. El número de recipientes.
- h. Observaciones.
- i. La identificación de las personas que participan en las operaciones de entrega y recepción en cada una de las etapas de transporte, incluyendo fecha, hora y firma de los participantes.

Procedimientos para la custodia en campo

Los procedimientos de custodia en campo se refieren a las medidas tomadas para asegurar la integridad y trazabilidad de las muestras recolectadas, desde su recolección hasta su análisis o almacenamiento final. Estos procedimientos incluyen la planificación previa, la recolección responsable, el manejo y la documentación de las muestras.

1. Al recolectar muestras como evidencia, recolecte solo el número que provee una buena representación del medio a ser muestreado. En la medida de lo posible, la cantidad y tipos de muestras, y los sitios de muestreo se determinan antes del trabajo real en campo. Las muestras deben ser manejadas por el menor posible de personas.
2. El muestreador en campo es responsable personalmente del cuidado y custodia de las muestras recolectadas hasta que sean transferidas o despachadas apropiadamente.
3. El coordinador del proyecto determina cuáles son los procedimientos adecuados para la cadena de custodia que siguen al trabajo en campo y decide si se requieren muestras adicionales.

Transferencia de la cadena de custodia y transporte

La cadena de custodia debe documentar cada transferencia de muestras, desde el muestreador hasta el laboratorio, incluyendo firmas, fechas y horas. Las muestras deben ser empacadas adecuadamente y enviadas con registros separados para cada envío, incluyendo información sobre el método de transporte y el remitente.

1. Las muestras deben ir acompañadas de un registro de cadena de cus-

todia. Cuando se transfiera la posesión de las muestras, los individuos que la ceden y los que la reciben deberán firmar, con la fecha y hora en el registro. Este registro documenta la transferencia de la custodia del muestreador, con frecuencia a través de otra persona, al analista en un laboratorio móvil, o al laboratorio.

2. Las muestras serán empacadas adecuadamente para su transporte y enviadas al laboratorio seleccionado para su análisis, con un registro de custodia separado que acompañe a cada embarque (por ejemplo, uno para cada laboratorio en campo, uno para las muestras conducidas al laboratorio que las analizará). Los recipientes para el transporte deberán sellarse o encerrarse con candado para su transporte al laboratorio. El método de transporte, el nombre del mensajero y otra información pertinente se escriben en el recuadro de “observaciones”.
3. Siempre que las muestras sean divididas en el origen o por un órgano de gobierno, se anota en la sección de “Observaciones”. La nota indica con quién las muestras fueron divididas y es formada por el muestreador y el receptor. Si cualquiera de las partes rechaza una muestra dividida, esto debe anotarse y firmarse por ambas partes. La persona que rechaza la muestra para el laboratorio o para el órgano de gobierno debe solicitar la firma de un representante de la parte afectada, reconociendo la recepción de las muestras. Si el representante no está disponible o se rehúsa a firmar, esto debe anotarse en el espacio de “Observaciones”. Cuando sea apropiado, como en el caso de que el representante no esté disponible, el registro de custodia debe contener un enunciado que indique que la muestra fue entregada en el lugar designado en el tiempo establecido.
4. Todos los embarques deberán ir acompañados del registro de cadena de custodia que identifique su contenido. El registro original debe acompañar al embarque, y una copia la retendrá el coordinador del proyecto.
5. Si se envía por correo, el paquete será registrado con la solicitud del receptor. Si se envía con un mensajero común, deberá usarse un recibo oficial. Los envíos por aire se mandan para recogerse. Los comprobantes de envío, los formatos de la oficina de correos y los recibos de carga se retendrán como parte de la documentación permanente.

Tabla 25. Resumen de la documentación requerida para la cadena de custodia.

Documento	Descripción	Información que debe contener	Aplicación
Formato de cadena de custodia	Documento oficial que registra la historia de la muestra	Identificación única, fechas, horas, responsables, condiciones de preservación, firmas	Asegurar la integridad y trazabilidad de las muestras, desde su recolección hasta su análisis
Etiquetas de Identificación	Adheridas a cada recipiente	Código de muestra, fecha, hora, sitio, preservación aplicada, responsable	Aplicable a todos los muestreos
Bitácora de campo	Registro de condiciones <i>in situ</i>	Parámetros físicos medidos en campo, observaciones, condiciones ambientales	Requerido para asegurar calidad del muestreo
Registro de preservación	Documentación de métodos de preservación	Técnica aplicada, reactivos utilizados, condiciones de almacenamiento	Esencial para estabilidad de las muestras

Los formatos oficiales deben completarse con tinta indeleble y cualquier corrección debe ser firmada por el responsable del muestreo, evitando en lo posible tachaduras que comprometan la integridad del registro.

En ocasiones, algunos órganos de gobierno pueden solicitar el llenado de formatos específicos de índole legal, en el lugar y tiempo del muestreo. Estos documentos son adicionales a los registros y bitácoras que el responsable del muestreo debe llenar. Estos casos generalmente se presentan cuando los resultados serán usados en algún proceso legal, o como evidencia de que intervino un órgano gubernamental. Ya que, en los procedimientos legales, los registros pueden someterse a un examen cruzado para ser admitidos como evidencia, es necesario que todos los participantes en el muestreo, manejo y transporte se registren y firmen en todos los formatos requeridos.

Aseguramiento de la calidad del muestreo

El aseguramiento de la calidad es una parte integral de los programas de muestreo. Los objetivos del aseguramiento de la calidad son: importancia, representatividad, completo, preciso, exacto, comparable y admisible como evidencia legal.

Los datos deben estar bien documentados y ser representativos de las condiciones de monitoreo. Para permitir la comparación entre los diferentes datos y con los objetivos del programa, los datos deben presentarse en unidades estandarizadas, prefiriendo el Sistema Internacional de Unidades. Un buen programa para el aseguramiento de la calidad debe incluir la educación y entrenamiento continuo del personal involucrado en el programa de monitoreo.

Todo plan de aseguramiento de la calidad que sea importante y efectivo debe definir y documentar los objetivos que afectan la calidad de los datos. Estos objetivos escritos deben asegurar:

1. La participación efectiva, en el programa de aseguramiento de la calidad, de personal proveniente de las diferentes organizaciones involucradas en un programa de muestreo.
2. La homogeneización del alcance y la dirección entre el personal que participa en el programa de muestreo.
3. Un plan de acción integrado y planeado.
4. La evaluación de los objetivos establecidos.

Para lograr los puntos anteriores, debe designarse un coordinador de aseguramiento de la calidad entre el personal involucrado. Este coordinador es responsable de todas las actividades relacionadas con el aseguramiento de la calidad, como la planeación de la calidad, las auditorías y la formalidad. Así, que el plan de aseguramiento de la calidad contenga los elementos necesarios, tales como:

1. Una política para establecer los criterios de los parámetros analíticos (precisión, exactitud, límite de detección) para el monitoreo de las actividades. Los procedimientos de manejo de las muestras en campo se establecen mejor después de la política.
2. Una política sistemática para la selección y uso de una metodología

de medición y de muestreo. Siempre que sea posible, use una metodología que haya sido aprobada previamente; en caso contrario, deberán establecerse los criterios para documentar, justificar y aprobar la metodología propuesta.

3. Documentar los procedimientos operativos en formatos previamente establecidos.
4. Establecer auditorías internas bien documentadas. En los procedimientos operativos se establecen los criterios para:
 - a. Selección de personal.
 - b. Selección del sitio de muestreo.
 - c. Recolección, manejo y preservación de las muestras.
 - d. Calibración y mantenimiento de instrumentos y equipo, tanto de laboratorio como de campo.
 - e. Auditorías internas, en campo y en laboratorio, para la aceptación de los datos con la documentación para los organismos correspondientes.
 - f. Una auditoría realizada por el coordinador de aseguramiento de la calidad para verificar que se están haciendo todas las actividades anteriores.

Como primer paso en el aseguramiento de la calidad en la recolección de la muestra, el programa de muestreo debe delinear en detalle los sitios de muestreo, el tipo de muestras, la frecuencia del muestreo, el número de muestras, la duración del muestreo, el volumen de muestra, los métodos de recolección de las muestras y los tiempos de retención, el equipo a usar en la recolección de las muestras, los recipientes para las muestras, el pretratamiento de los recipientes, el tipo y cantidad de preservador a ser usado, los blancos, los duplicados o triplicados, las muestras fortificadas, las réplicas, los procedimientos de la cadena de custodia, y otros aspectos que se consideren importantes en el aseguramiento de la calidad cuando se muestrean y se manejan las muestras.

Como un segundo paso para el aseguramiento de la calidad, deben establecerse procedimientos y programas de mantenimiento y calibración del equipo usado en el muestreo. En estos programas deben establecer la rutina de mantenimiento, los intervalos de calibración y prueba, la lista de

los estándares de calibración requeridos y el sistema de documentación y registro. El equipo debe etiquetarse para indicar la fecha de calibración y la fecha de caducidad del mantenimiento y calibración.

El tercer paso es la verificación aleatoria de control para asegurarse de que se han seguido los procedimientos y sugerencias para la recolección, manejo y cadena de custodia, por parte del personal en campo, detectar las desviaciones y aplicar las medidas correctivas aplicables. En el laboratorio, el control de la calidad analítica se aplica en las muestras, blancos, duplicados y muestras fortificadas, donde la precisión se evalúa con gráficas de control.

Por otro lado, es relevante resaltar que la versión actual de la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece actividades específicas para los laboratorios y personal responsable del muestreo, como resaltan las siguientes citas (16):

“El responsable de la descarga realizará el monitoreo de las descargas de aguas residuales para determinar el promedio diario y el mensual, con la periodicidad establecida ... a través de un laboratorio.”

“Todo informe de resultados de muestreo y análisis deberá registrarse y firmarse en el sistema electrónico que para tal efecto la Comisión pondrá a disposición de los laboratorios...”

“El signatario autorizado del laboratorio deberá coleccionar las muestras simples en el número e intervalo...”

“La cadena de custodia, la hoja de campo y las demás evidencias que soporten los informes de resultados de muestreo y análisis deberán mantenerse por el laboratorio para su consulta por un periodo de 5 años posteriores a su emisión, registro y firma.”

“La Secretaría por conducto de la Comisión aprobará los Laboratorios y las Unidades de Verificación, en los términos establecidos en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Los Laboratorios realizarán el muestreo y el análisis de las muestras que se requieran para la evaluación de la conformidad de la presente norma.”

“El Laboratorio que realice el muestreo emitirá un informe de resultados de muestreo y análisis y al término de la verificación, quien realice la Evaluación de la conformidad emitirá y firmará el Dictamen de Conformidad que integrará todos los datos recabados durante las acciones de verificación y los resultados del análisis de Laboratorio.”

Al verificar en el numeral correspondiente a los términos y definiciones que para efectos de aplicación de la norma mexicana deben considerarse, se describe que (16):

“Laboratorio: Laboratorio de ensayo o prueba acreditado por una entidad de acreditación y aprobado por la Comisión para la realización de muestreos y análisis a que se refiere esta Norma.”

“Signatario Autorizado: Es la persona autorizada por una Entidad de Acreditación, para realizar el muestreo, firmar y aprobar los informes de ensayo, emitido por el laboratorio.”

Lo anterior implica que todo laboratorio y personal de muestreo involucrado en el indispensable para el cumplimiento de NOM-001-SEMAR-NAT-2021 deben estar autorizados por una entidad de acreditación en términos de Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Por lo que es obligatorio hablar de la implementación de un Sistema de Gestión de Calidad bajo estos requerimientos con una metodología estructurada que contemple las herramientas necesarias para garantizar la estandarización de los resultados y la mejora continua en los procesos. Para este efecto se vuelven relevantes la NMX-EC-17025-IMNC-2018 y la ISO/IEC 17025:2017, donde la primera es una adopción idéntica de la segunda (que es una norma internacional) al contexto mexicano, manteniendo los mismos principios fundamentales, pero adaptándolos al marco regulatorio nacional. Esta homologación permite que los laboratorios mexicanos que implementan la NMX-EC-17025-IMNC-2018 puedan demostrar su competencia técnica tanto en el ámbito nacional como internacional, facilitando el reconocimiento mutuo de los resultados de ensayos y calibraciones.

Para este propósito se estableció desde el año 2000 en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización la acreditación, como “el acto por el

cual una entidad de acreditación (la EMA para México desde 1999) reconoce la competencia técnica y confiabilidad de los organismos de certificación, de los laboratorios de prueba, de los laboratorios de calibración y de las unidades de verificación para la evaluación de la conformidad (62), tomando como base los requisitos de la NMX-EC-17025-IMNC-2018”.

Capacitación del personal

El éxito de la implantación de un plan de aseguramiento de la calidad depende del monitoreo del personal. Todo el personal involucrado en cualquier actividad que afecte la calidad de los datos debe estar suficientemente capacitado para registrar y contribuir con su trabajo a la calidad deseada de los datos generados durante el muestreo y en los análisis. Por esta razón, un plan de aseguramiento de la calidad debe contemplar las necesidades periódicas de capacitación y la manera en cómo se satisfacen. El entrenamiento puede ser interno o externo.

Los métodos de entrenamiento varían de acuerdo a su propósito, ya sea lograr el nivel de conocimientos adecuado o desarrollar las habilidades requeridas por las actividades propias del muestreo. La siguiente lista contiene los métodos de entrenamiento más comúnmente usados:

1. Capacitación en el trabajo. Este rubro consiste en observar al personal con mayor experiencia en las diferentes tareas del proceso. El personal en capacitación realiza tareas bajo la supervisión del personal experimentado. Por último, el personal en capacitación realiza las tareas de manera independiente, pero siguiendo los procedimientos de aseguramiento de la calidad establecidos.
2. Capacitación a través de un curso de corta duración. Estos cursos son externos al ambiente de trabajo, generalmente son ofertados por organismos gubernamentales, escuelas o universidades que proveen de los conocimientos y habilidades necesarias a los participantes. La duración de estos cursos es variable, pero normalmente suelen ser de dos semanas o menos.
3. Capacitación a través de un curso de larga duración. Las universidades, colegios o escuelas técnicas tienen cursos académicos de larga duración, cuatrimestrales o semestrales, donde se dan los conocimien-

tos necesarios en tratamiento de aguas residuales, química analítica, ingeniería ambiental u otras disciplinas.

4. Evaluación de la capacitación. Todo plan de aseguramiento de la calidad debe prever la evaluación de la capacitación. La evaluación debe hacerse en términos del nivel de conocimientos y habilidades logradas por el operador después de la capacitación, y de la efectividad del entrenamiento, que incluya las mejoras necesarias en las diferentes áreas. Una manera de medir la mejoría en las habilidades es asignarle al operador una tarea práctica. La precisión y el grado en que se completa la tarea asignada son indicadores que miden la eficiencia de la capacitación.

Además, la competencia del personal constituye un factor determinante para la implementación exitosa de un sistema de gestión de calidad basado en la NMX-EC-17025-IMNC-2018. La norma establece requisitos específicos para asegurar que el personal que realiza actividades técnicas, incluido el muestreo, posea la formación, experiencia y habilidades necesarias.

Criterios de aceptación y rechazo de muestras

No existe una regla única para decidir sobre la aceptación o rechazo de muestras (también relacionada con “conformidad” en términos de sistemas de gestión de la calidad); en cada situación específica debe seleccionarse la regla de decisión más apropiada. Los laboratorios deben documentar estas reglas y comunicarlas claramente a sus clientes. Si se toma como referencia la norma ISO/IEC 17025:2017, las declaraciones de “conformidad” deben identificar claramente la regla de decisión aplicada, estar basadas en el riesgo y considerar la incertidumbre.

La aplicación de criterios (ejemplo en la Tabla 26) para la aceptación y rechazo de muestras es fundamental para garantizar la validez jurídica y científica de los resultados analíticos, especialmente en casos donde estos puedan utilizarse en procesos regulatorios o legales.

Las reglas de decisión deben considerar el nivel de riesgo asociado a falsas aceptaciones o falsos rechazos. La norma ISO exige que los

laboratorios evalúen y documenten estos riesgos. La propagación de las declaraciones de conformidad debe seguir protocolos rigurosos y basados en la “Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medición” (GUM, siglas del inglés *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) (63).

Tabla 26. Ejemplos de criterios de aceptación y rechazo de muestras considerando condiciones de muestreo y análisis de las muestras.

Criterio	Condición de aceptación	Condición de rechazo	Norma o referencia
Integridad del recipiente	Recipientes sellados sin evidencia de fugas	Recipientes dañados o con fugas	Procedimiento estándar
Temperatura	Dentro del rango establecido según parámetro	Fuera del rango requerido	Variable según análisis
Tiempo desde muestreo	Dentro del tiempo máximo permitido	Excedido el tiempo máximo	Específico para cada parámetro
Preservación	Correctamente aplicada y documentada	Preservación inadecuada o no documentada	Según tipo de análisis
Documentación	Completa, legible y sin inconsistencias	Incompleta, ilegible o con inconsistencias	Requisito para cadena de custodia

Bibliografía

1. Urquidí, V. L. Comentario en la presentación del libro *Aire dividido: crítica a la política del aire en el Valle de México*; 2001.
2. Toledo Mazariegos, A. D.; Gallardo Loya, R. C.; Robles Medina, R. E. La inversión extranjera y la legislación ambiental en México en el marco del T-MEC. *Rev. DYCS Victoria* **2022**, December 15.
3. Puente Miranda, D. G.; Valenzuela Garcia, L. I.; Alarcón Herrera, M. T. Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México. *Rev. Int. Contam. Ambiental* **2023**, May 12.
4. Muñoz Mendoza, J.; Santacruz de León, G. Análisis crítico de la política y legislación de Reservas de biosfera en México. *Rev. Derecho Ambient.* **2022**, June 30.
5. Reyes Grande, J.; Hernández de la Cruz, M.; Ramos Reyes, R. Reflexión crítica sobre la mercantilización de la naturaleza: privatización de ‘recursos acuáticos’ en México. *Econ., Soc. Territ.* **2024**, July 16.
6. Aguilar Aguilar, C. E. Apuntes para una historia ambiental de la industria petrolera en México: algunas reflexiones y consideraciones. Ulúa. *Rev. Hist., Soc. Cult.* **2024**, April 29.
7. Almazán-Juárez, M. T.; Almazán-Juárez, A.; Carreto-Pérez, B. E. Calidad y clasificación de usos del agua en la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México. *Geography* **2016**, August 25.
8. Muñoz Raigosa, J. Historia ambiental desde abajo: los habitantes ribereños de la Ciénega de Chapala y la afectación ambiental por la construcción de las presas de Juanacatlán y Poncitlán en el río Santiago, Jalisco, México, 1893–1910. *Bajo el Volcán. Rev. Posgrado Sociol. BUAP* **2024**, December 5.
9. Saldaña, T. M. *Usos y abusos del agua en la historia del Río Grande. El agua en el norte de México y suroeste de los EEUU. In De la cultura del agua a los problemas transnacionales*; 2006.
10. Cardona, C.; Consuelo, M. Historia ambiental de una región de México: la Laguna de Metztitlán y sus alrededores, 1872–1949. *Geography* **2014**, 1872–1949.
11. Azamar Alonso, J. Legislación ambiental en la Cuarta Transformación: ¿avances o retrocesos? *Expresión Econ.* **2023**, March 24.

12. Castro Salazar, J. I.; Carpio Domínguez, J. L.; Hernández Rodríguez, R. Desarrollo sustentable e ideologías ambientales locales en la legislación sobre recursos naturales en México. *Int. J. Interdiscip. Stud.* **2022**, July 30.
13. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. *Ley de Aguas Nacionales*, 8th ed.; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2023.
14. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. *Ley General de Salud*, 7th ed.; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2024.
15. Secretaría de Salud (SSA). NOM-230-SSA1-2002. *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2005; p 12.
16. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). NOM-001-SEMARNAT-2021. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2022.
17. SEMARNAT. NOM-002-ECOL-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 1998.
18. SEMARNAT. NOM-003-ECOL-1997. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 1998; p 21.
19. Secretaría de Economía (SCFI). NMX-AA-003-1980. *Aguas residuales—muestreo*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 1980; p 8.
20. SCFI. NMX-AA-004-SCFI-2013. *Análisis de agua. Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2013; p 11.

21. SCFI. NMX-AA-014-1980. *Cuerpos receptores—muestreo*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 1980; p 8.
22. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *EPA Method 130.2: Total Hardness. Titrimetric EDTA*; 1982. <https://www.caslab.com/EPA-Methods/PDF/EPA-Method-1302.pdf> (accessed 2025).
23. Kukkola, E.; Schneidewind, U.; Haverson, M.; Kelleher, J. D.; Drummond, J. D.; Smith, G. S.; et al. Snapshot Sampling May Not Be Enough to Obtain Robust Estimates for Riverine Microplastic Loads. *ACS ES&T Water* **2024**, 4 (5), 11.
24. Moreno Núñez, X. V.; Bustos Terrones, Y. A.; Rangel-Peraza, J. G.; Loaiza, J. G. Análisis de la relación de los parámetros de calidad del agua subterránea en la región del noroeste de México. *Estud. Perspect. Rev. Cient. Acad.* **2025**, 5 (1), 16.
25. Vilmin, L.; Flipo, N.; Escoffier, N.; Groleau, A. Estimation of the water quality of a large urbanized river as defined by the European WFD: what is the optimal sampling frequency? *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2016**, 25, 17.
26. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater*; EPA: Cincinnati, OH, 1982. <https://www.epa.gov> (accessed 2024).
27. Secretaría de Economía (SE). PROY-NMX-AA-121/1-SCFI-2008. *Análisis de agua. Aguas naturales, epicontinentales, costeras y marinas—muestreo*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2009; p 37.
28. SSA. NOM-127-SSA1-2021. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2022; p 102.
29. SSA. NOM-201-SSA1-2015. *Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2015; p 82.
30. Parparov, A.; Hambright, K. D.; Hakanson, L. Water Quality Quantification: Basics and Implementation. *Hydrobiologia* **2006**, 560, 11.
31. Marín-Galván, R. *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: Tratamiento y control de calidad de aguas*; Santos, D. d., Ed.; 2019.

32. American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed.; APHA: Washington, DC, 2017.
33. Boyd, C. E. *Water Quality: An Introduction*; Springer: 2010.
34. Pan American Health Organization (PAHO/WHO). *Agua y saneamiento*. <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento> (accessed 2023).
35. Percival, S. L.; Yates, M. V.; Williams, D. W.; Chalmers, R. M.; Gray, N. F. *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks*, 2nd ed.; Elsevier: 2013.
36. Straskraba, M.; Gnauck, A. H. *Freshwater Ecosystems: Modelling and Simulation*; Elsevier: Amsterdam, 1985; Vol. 8, p 373.
37. The Environment Management SAC (TEM). *Assuring Nature's Harmony*. <https://tem.com.pe/shop/marine-plankton-tem/botella-vandorn-de-5l/> (accessed 2025).
38. APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed.; APHA: Washington, DC, 2012.
39. SE. NMX-AA-185-SCFI-2021. *Análisis de agua—medición de compuestos orgánicos volátiles (COV) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas—método de prueba*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2022; p 32.
40. U.S. EPA. *Method 524.2 Rev. 4.1: Measurement of Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry*; 1995. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-524.2.pdf> (accessed 2025).
41. U.S. EPA. *Method 8260D (SW-846): Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC/MS)*, Rev. 3; 2006. <https://www.epa.gov/esam/epa-method-8260d-sw-846-volatile-organic-compounds-gas-chromatography-mass-spectrometry-gcms> (accessed 2025).
42. U.S. EPA. *Method 624.1: Purgeables by GC/MS*; 2016. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-08/documents/method_624-1_2016.pdf (accessed 2025).
43. U.S. EPA. *Method 8270E (SW-846): Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC-MS)*; 2014.

- <https://www.epa.gov/esam/epa-method-8270e-sw-846-semivolatile-organic-compounds-gas-chromatographymass-spectrometry-gc> (accessed 2025).
44. Veolia Water Technologies. *¿Cuáles son los modos de los analizadores de carbono orgánico total (y cuál es el adecuado para usted)?* <https://www.watertechnologies.mx/sievers-resource-center/what-are-modes-total-organic-carbon-toc-analyzers-and-which-one-right-you> (accessed 2023).
 45. Instituto de Salud Pública de Chile. *Método CH-0030 – Muestreo de compuestos orgánicos volátiles*; Santiago, 2010. [https://www.ispch.cl/sites/default/files/METODO%20CH-30%20\(1\).pdf](https://www.ispch.cl/sites/default/files/METODO%20CH-30%20(1).pdf) (accessed 2025).
 46. Ihobe, S.A. *Guía Metodológica de Análisis Químico*; Sociedad Pública de Gestión Ambiental: País Vasco, Spain, n.d.
 47. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 5667-16:2023 Water Quality — Sampling — Part 16: Guidance on Bio-testing of Samples*; 2023. <https://www.iso.org/standard/65556.html> (accessed 2025).
 48. Audi, G.; Bersillon, O.; Blachot, J.; Wapstra, A. H. The NUBASE Evaluation of Nuclear and Decay Properties. *Nucl. Phys. A* **2003**, 729, 126.
 49. U.S. EPA. *EPA Facts about Radon*; 2002. <https://semspub.epa.gov/work/11/176336.pdf> (accessed June 2025).
 50. Maria, F. F.; Andrew, S.; Awadhesh, N. J. Controlled Release of Radioactive Water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Should We Be Concerned? *Environ. Sci. Technol.* **2024**, 58 (11), 4.
 51. Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNS-NS). *Autorización para realizar actividades con material radiactivo y/o fuentes de radiación ionizante Tipo A*. <https://www.gob.mx/tramites/ficha/autorizacion-para-realizar-actividades-con-material-radiactivo-y-o-fuentes-de-radiacion-ionizante-tipo-a/CNSNS3513> (accessed May 28, 2025).
 52. Ningjie, Z.; Lili, L.; Xiaofan, Y.; Yonggang, Z. Analytical Methods for the Determination of ^{90}Sr and $^{239,240}\text{Pu}$ in Environmental Samples. *Molecules* **2022**, 27, 1912.
 53. Vilas Kusumkar, V.; Galamboš, M.; Viglašová, E.; Daño, M.; Šmelková, A. Ion-Imprinted Polymers: Synthesis, Characterization,

- and Adsorption of Radionuclides. *Materials* **2021**, 14 (5), 29.
54. Langford, T. J.; Bass, C. D.; Beise, E. J.; Breuer, H.; Erwin, D. K.; Heimbach, C. R.; et al. Event Identification in ^3He Proportional Counters Using Risettime Discrimination. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **2017**, 10.
55. Schubert, M.; Kallmeyer, J. Liquid Scintillation Counting at the Limit of Detection in Biogeosciences. *Front. Microbiol.* **2023**, 14.
56. Piraner, O.; Eardley, K.; Button, P. Alpha and Beta Spillover in Liquid Scintillation Counting Analysis of Urine Samples. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2023**, 332 (9), 16.
57. Madzunya, D.; Dudu, V. P.; Mathuthu, M.; Manjoro, M. Radiological Health Risk Assessment of Drinking Water and Soil Dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa. *Heliyon* **2020**, 6 (2), e03337.
58. Sand, J.; Ihantola, S.; Peräjärvi, K.; Toivonen, H.; Toivonen, J. Optical Detection of Radon Decay in Air. *Sci. Rep.* **2016**, 6, 20838.
59. Stojković, I.; Todorović, N.; Nikolov, J. Radium Interference During Radon Measurements in Water: Comparison of One- and Two-phase Liquid Scintillation Counting. *Arch. Ind. Hyg. Toxicol.* **2021**, 72 (3), 11.
60. Lodge, M. A.; Holt, D. P.; Kinahan, P. E.; Wong, D. F.; Wahl, R. L. Performance Assessment of a NaI(Tl) Gamma Counter for PET Applications with Methods for Improved Quantitative Accuracy and Greater Standardization. *EJNMMI Phys.* **2015**, 2 (11), 13.
61. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, 2009; p 17.
62. Jiménez Guardiola, R. Metodología para la implementación de un sistema de gestión de calidad para laboratorios de análisis ambientales bajo la NMX-EC-17025-IMNC-2018. *Cienc. Lat. Rev. Multidiscip.* **2022**, 6 (6), 8.
63. Klauenberg, K.; Greenwood, A.; Foyer, C. Propagation of Conformity Statements in Compliance with the GUM and ISO/IEC 17025. *Metrologia* **2023**, 60 (5), 055001.

Muestreo de aguas: Una guía técnica para garantizar la calidad

Se terminó de editar en noviembre de 2025

en los talleres de Astra Ediciones

Av. Acueducto No. 829

Colonia Santa Margarita, C. P. 45140

Zapopan, Jalisco, México.

33 38 34 82 36

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

Este libro tiene como propósito servir como base para todos aquellos profesionales y estudiantes que se han involucrado en el mundo del monitoreo, control y eliminación de la contaminación de las aguas continentales.

Este libro tiene como referencias importantes las sugerencias y lineamientos que establece la Environmental Protection Agency (EPA) de EE. UU. y las Normas Oficiales Mexicanas vigentes publicadas en el Diario Oficial de la Federación a la fecha de la publicación de este libro, así como otras fuentes de organizaciones e instituciones de reconocido prestigio. Con respecto a las normas mexicanas, es necesario que el lector consulte la referencia más actual porque están en constante cambio para adaptarse a las necesidades y políticas ambientales de México.

ISBN: 979-13-87837-86-0



Consulta y descarga

