

**Universidad Nacional
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Escuela de Ciencias Biológicas**

**Informe Final
(PASANTÍA)**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL DE LA
MICROCUCENCA SANTA MARTA UBICADA EN LA ZONA DE LOS SANTOS**

Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos de la Universidad Estatal a Distancia

Trabajo Final de Graduación para optar al grado de Licenciatura en Biotecnología

**Estudiante: Paula del Milagro Portuguez Mora
(305010707)**

**Tutor:
MBA & MPM. Jorengeth Abad Rodríguez Rodríguez**

**Supervisor o guía:
M.Sc. Catalina Vargas Meneses**

**Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica**

Junio, 2025

Este trabajo de graduación fue **aprobado** por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Biotecnología.

ALICIA MARIA
FONSECA
SANCHEZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por
ALICIA MARIA FONSECA
SANCHEZ (FIRMA)
Fecha: 2025.10.08 14:36:49
-06'00'

MSc. Alicia Fonseca Sánchez

Representante, Decano, quién preside

HANNIA VEGA BOLAÑOS (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-0620-0622.
Fecha declarada: 06/10/2025 12:08:00 p.m.
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

M.Sc. Hannia Vega Bolaños

Representante de la Dirección de la (ECB)

JORENGETH ABAD RODRIGUEZ RODRIGUEZ (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-06-0354-0414.
Fecha declarada: 08/10/2025 11:52:05 a. m.
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

Máster. Abad Rodríguez Rodríguez

Tutor

CATALINA DE LOS
ANGELES VARGAS
MENESES (FIRMA)

Firmado digitalmente por
CATALINA DE LOS ANGELES
VARGAS MENESES (FIRMA)
Fecha: 2025.10.08 13:54:57 -06'00'

M.Sc. Catalina Vargas Meneses

Supervisora

SILVIA ECHEVERRIA SAENZ (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-1018-0553.
Fecha declarada: 06/10/2025 01:28:30 PM
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

M.Sc. Silvia Echeverría Sáenz

Invitada especial

Agradecimiento

Agradezco en primer lugar a Dios, por acompañarme en cada paso y permitirme llevar a cabo este trabajo. A mi familia por todo el respaldo, la comprensión y el amor incondicional que me brindaron a lo largo de este proceso. Al Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos de la Universidad Estatal a Distancia, expreso mi gratitud por el apoyo constante, por facilitar los medios necesarios para realizar las giras y análisis, y por depositar su confianza en mí. A mi tutor, MBA & MPM. Abad Rodríguez, gracias por su guía, apoyo y confianza durante todo el desarrollo de este trabajo. A mi asesora, M.Sc. Catalina Vargas Meneses, le agradezco sinceramente por su acompañamiento, su disposición y su valiosa orientación en cada etapa de este proceso de aprendizaje. Y a mis compañeros del laboratorio, gracias por estar siempre dispuestos a colaborar y por brindarme su ayuda y compañía en este camino.

Dedicatoria

Con todo mi amor y gratitud, dedico este trabajo a mis padres, quienes con su ejemplo, amor incondicional y entrega constante han sido mi mayor inspiración. Su apoyo inquebrantable, su comprensión en cada paso del camino y los valores que me inculcaron con sabiduría han sido la base sobre la cual he construido no solo mi formación académica, sino también mi esencia como persona. Gracias por creer en mí, por estar presentes en cada etapa y por enseñarme, con su vida, lo que significa el esfuerzo, la dedicación y el verdadero amor.

Índice

Miembros del tribunal	II
Agradecimiento	III
Dedicatoria.....	IV
Índice	V
Resumen	VI
Introducción.....	1
Justificación de la pasantía	2
Objetivos de la pasantía.....	6
Actividades realizadas o metodología de trabajo	7
Resultados obtenidos de la pasantía en la empresa o institución	10
Discusión de resultados	14
Relevancia de la pasantía en su perfil profesional y conocimientos adquiridos de la experiencia.....	20
Conclusiones.....	21
Recomendaciones	22
Referencias bibliográficas	23
Anexos	32

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar físico-química y microbiológicamente el agua superficial proveniente de los afluentes principales de la microcuenca Santa Marta ubicada en la Zona de los Santos mediante el uso de equipo de campo, cromatógrafo de iones y el sistema Quanti-Tray con el fin de conocer la calidad del agua de dicha cuenca como fuente para procesos agrícolas, especialmente el beneficiado húmedo del café. Para ello, se realizaron dos campañas de muestreo en once puntos, en las que se determinaron parámetros físico-químicos y microbiológicos establecidos en la normativa nacional. Los resultados mostraron que la mayoría de los parámetros se encontraron dentro de las clases 1 y 2 del Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales, indicando condiciones generalmente aceptables para su uso con tratamientos básicos o desinfección simple. Sin embargo, parámetros críticos como los nitratos y los coliformes fecales ubicaron el agua en clases de mayor deterioro, en especial en sitios como el punto 9, donde se identificó la influencia de descargas domésticas y actividades agrícolas. Estos hallazgos reflejan que la calidad del agua de la microcuenca no es uniforme y que existen focos de presión ambiental asociados a prácticas agrícolas y vertimientos residuales. A pesar de ello, el agua de la mayoría de los sitios podría destinarse a usos menos restrictivos, como el riego, aunque con limitaciones en puntos específicos. El estudio destaca la importancia de contar con protocolos estandarizados para garantizar la confiabilidad de los análisis, así como fortalecer el monitoreo de los cuerpos de agua. Los resultados obtenidos aportan información clave para la gestión sostenible del recurso hídrico en la región y sientan una base para futuras investigaciones y acciones orientadas a la protección de las fuentes de agua.

Palabras clave: Recurso hídrico, Contaminación, Monitoreo, Coliformes fecales, Cromatografía de iones.

Introducción

Historia de la empresa o institución y actividad o actividades económicas a la que se dedica

El Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos, es un espacio creado en el año 2019 mediante los esfuerzos de la Universidad Estatal a Distancia (UNED) y el Instituto de Desarrollo Rural (INDER), dedicada a la investigación y consultoría ambiental y a la venta de servicios de análisis de agua y suelos (Observatorio de Agua y Saneamiento [ObsAS], 2022).

Es un espacio multidisciplinario, ya que está conformado por profesionales de diferentes áreas como: ingeniería civil, ingeniería ambiental, ingeniería agrícola, agronomía, geología y biotecnología (ObsAS, 2022). Este aspecto es de gran importancia porque se generan investigaciones y análisis robustos, que abarcan estas disciplinas.

En cuanto a los servicios que ofrece el laboratorio se destacan los estudios técnicos de Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes en Costa Rica, conocidas como ASADAS, el análisis de agua potable según lo dispone el Reglamento para la calidad del Agua Potable No 38924-S y análisis físico químicos de suelos como pH, conductividad, humedad y densidad aparente y de partícula. Además, el laboratorio brinda el espacio para que estudiantes universitarios realicen sus investigaciones para sus trabajos finales de graduación.

El laboratorio se encuentra ubicado en “El Rodeo” contiguo a la Sede Universitaria de la Universidad Estatal a Distancia en San Marcos de Tarrazú, San José. La visión del laboratorio es:

Ser un laboratorio reconocido a nivel nacional por brindar una amplia oferta de servicios de análisis de agua y suelos, garantizando los más altos estándares de calidad en los procesos, así como generar información y transferencia de conocimiento producto de las investigaciones en el campo ambiental (ObsAS, 2022).

La misión, por su parte, es:

Proporcionar servicios de laboratorio de análisis de agua y suelos a caficultores, productores y personas particulares, en forma eficiente garantizando confiabilidad en los resultados de los ensayos. Asimismo, colaborar arduamente con la comunidad científica, estudiantil y productores para establecer proyectos de investigación según las necesidades de los diferentes entes del sector agropecuario, buscando la innovación y la formación según las nuevas tendencias del sector (ObsAS, 2022).

Justificación de la pasantía

El agua superficial se origina a partir del afloramiento de aguas subterráneas mediante manantiales o nacientes, así como del agua que cae producto de las precipitaciones (Alfaro, 2019). Son cuerpos de agua superficial los ríos, lagos, arroyos, canales y represas (Hairom et al; 2021). El agua superficial es un componente crucial que desempeña un papel importante en actividades del medio ambiente y humanas (Gu et al., 2023).

En el planeta la mayor cantidad del agua se encuentra en los océanos, glaciares continentales o aguas subterráneas o hielo subterráneo, pero solo aproximadamente el 0,01 % del recurso hídrico del planeta son cuerpos de agua continentales que fluyen. Estos cuerpos de agua poseen una rápida tasa de renovación y un tiempo de residencia corto, de entre 9 y 18 días, por lo que es un recurso sumamente importante para el ciclo hidrológico (Sogno et al., 2022).

Según Kılıç (2020) alrededor del 0,3 % del recurso hídrico es utilizado a nivel mundial. Sogno et al. (2022) menciona que de acuerdo con datos reportados las aguas superficiales cubren el 50 % de la demanda de agua potable, el 80 % de las necesidades de agua para riego y el 60 % del uso para la industria, claramente esto varía según cada país. Asimismo, el autor indica que las modificaciones en la dinámica del recurso hídrico superficial y en efecto la disponibilidad del mismo, afectan el entorno natural y la

antroposfera. Ya que el agua es un elemento clave para la vida, se debe tener presente el monitoreo de su calidad.

Según Lu et al. (2023), las aguas superficiales podrían verse afectadas por el cambio climático y el aumento de la población, por lo que se debe considerar la gestión y planificación de los recursos hídricos de manera eficaz, desde un enfoque integrado que involucre la población de la cuenca, zonas urbanas, cultivo y otros factores. Del mismo modo, en el Decreto Ejecutivo N°30480-MINAE del Sistema Costarricense de Información Jurídica se establece en el artículo 1 los principios que regirán la política nacional en materia de gestión de los recursos hídricos, mencionando que “La gestión del recurso hídrico debe ser integrada, descentralizada y participativa partiendo de la cuenca hidrográfica como unidad de planificación y gestión” (Decreto Ejecutivo N°30480-MINAE, 2002).

En Costa Rica existen tres reglamentos importantes que establecen las normas para regular y evaluar los diferentes tipos de cuerpos de agua. En el caso específico del agua para consumo humano se encuentra el Reglamento para la calidad del Agua Potable Decreto N° 38924-S publicado en La Gaceta N.º 170 en el año 2015, con respecto al agua superficial el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales N° 33903-S publicado en La Gaceta N.º 178 y en cuanto a aguas residuales el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N° 33601 publicado en La Gaceta N.º 55, ambos en el año 2007. Además, para aguas subterráneas se encuentra el Reglamento para la perforación de pozos y aprovechamiento de aguas subterráneas N° 43053 publicado en La Gaceta N.º 175 en el año 2021.

El objetivo del Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales es “reglamentar los criterios y metodología que serán utilizados para la evaluación de la calidad de los cuerpos de agua superficiales y que ésta permita su clasificación para los diferentes usos que pueda darse a este bien” (MINAE, 2007). En cuanto al ámbito de aplicación “La metodología y criterios de evaluación y clasificación contemplados en este reglamento, se aplicará a todos los cuerpos de agua superficiales del país” (MINAE, 2007).

Primeramente, una cuenca hidrográfica se define como un espacio territorial delimitado por líneas divisorias de aguas que corresponden a las partes más altas de las montañas en donde se concentran los escurrimientos como ríos y arroyos, que convergen y se dirigen hacia un mismo punto de salida, como hacia un lago que en este caso formaría una cuenca endorreica o hacia el mar formando una cuenca exorreica (Cotler Ávalos et al., 2013). La cuenca se conforma por subcuencas y microcuencas, la primera corresponde a un conjunto de microcuencas que drenan hacia un único cauce principal, mientras que la microcuenca es un área en la que los escurrimientos drenan hacia el cauce principal de la subcuenca (Ordoñez Gálvez, 2011). El manejo de las cuencas es un proceso integral que permite planificar, implementar y evaluar acciones que lleven al equilibrio entre los procesos naturales y las actividades humanas dentro de la cuenca (Cotler Ávalos et al., 2013).

En Costa Rica la calidad de agua de las cuencas que es suministrada para áreas específicas está explícitamente relacionada con procesos que resultan de actividades humanas que se realizan en dichas cuencas, pero por lo general no se considera el manejo adecuado del recurso hídrico lo que genera riesgos para la salud de los habitantes (Bolaños, 2023). Además, el uso y manejo inadecuado del recurso hídrico, así como su escasez se han convertido en los principales factores que limitan el desarrollo sostenible a nivel mundial (Rojas & Rojas, 2023).

A nivel nacional, la caracterización del agua superficial se realiza en puntos específicos relacionados con problemas ambientales y de esta manera se conoce la calidad del agua de determinados sitios y las cuencas ubicadas en áreas distantes del valle central carecen de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de sus aguas (Bolaños, 2023). Para fortalecer la gestión del recurso hídrico, es recomendable que todos los cuerpos de agua del país sean caracterizados tanto físico, química y microbiológicamente, evaluados y monitoreados, de esta manera conocemos el estado de cada cuerpo de agua, su calidad y podemos generar estrategias específicas para cada uno de ellos, tomando en consideración las presiones socioambientales que se encuentran alrededor de cada punto.

La contaminación del agua superficial es provocada por actividades humanas debido a la ampliación de zonas urbanas, la industria y la agricultura, estos cuerpos de agua

son comúnmente los que reciben las aguas residuales que presentan microorganismos y sustancias químicas peligrosas (Hairom et al., 2021). Según Gil et al. (2018), las personas utilizan los cuerpos de agua como vertedero de las aguas residuales domésticas, industriales y las originadas de actividades agrícolas, esto provoca un gran impacto en la calidad del agua y, por ende, la mayoría de las aguas superficiales y muchas fuentes subterráneas requieren tratamiento previo antes de ser utilizadas para las necesidades humanas.

El agua que no cumple con los estándares de calidad para consumo humano, ya sea superficial, de manantial o proveniente de pozos, representa un riesgo para la salud de las personas. Esto se debe a que los contaminantes presentes en el agua pueden ingresar al cuerpo humano por diferentes vías: ingestión, inhalación o absorción a través de la piel. Además, la exposición puede ser indirecta, mediante la bioacumulación de compuestos químicos en las plantas debido al riego con agua de mala calidad o a través de la cadena trófica. Una vez en el cuerpo, algunas de estas sustancias pueden alcanzar las células, inducir toxicidad celular e incluso provocar mutaciones en el ADN (Gu et al., 2023).

Esta situación es preocupante, porque no se contempla un futuro alentador, el aumento de la población provoca una sobreexplotación del agua y esto a su vez genera consecuencias directas en la calidad y cantidad del recurso hídrico utilizado para consumo humano (Gil et al., 2018). Asimismo, el proceso de urbanización provoca un aumento en la contaminación del agua, deteriorando los suministros de agua potable (Sanae et al., 2024). Por lo que, es vital el uso sostenible y la conservación del recurso hídrico para aminorar los desafíos por la falta de agua (Almulhim & Abubakar, 2023).

El tema de conservación del recurso hídrico debe ser urgente, este es una necesidad para el desarrollo de la vida en el planeta (Kılıç, 2020), es de gran relevancia proponer estrategias de protección y prevenir la contaminación. Se debe dar a conocer la importancia del agua para el planeta y capacitar a la población en temas de protección del agua y el adecuado tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales. Las personas deben ser conscientes de que sin este recurso tan valioso no podemos vivir.

Específicamente en la Zona de los Santos el agua superficial es utilizada en el proceso de beneficiado del café, en sus cantones Dota, Tarrazú y León Cortés se emplea la

técnica de beneficiado húmedo en donde se utiliza el agua como materia prima para transportar y lavar los granos de café (Valenciano, 2008). Sin embargo, el uso de aguas contaminadas o en condiciones inadecuadas para el lavado de café provocan defectos en los granos, deterioran la calidad del café y arriesgan la inocuidad del producto (Puerta, 2015), esto conlleva a riesgos para la salud de la población.

Por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar físico-química y microbiológicamente el agua superficial proveniente de los afluentes principales de la microcuenca Santa Marta ubicada en la Zona de los Santos mediante el uso de equipo de campo, cromatógrafo de iones y el sistema Quanti-Tray para el conocimiento de la calidad del agua de dicha cuenca como fuente en procesos agrícolas, tales como el beneficiado del café, el riego de cultivos y otras actividades relacionadas con la producción agrícola. La microcuenca Santa Marta que se analizará en este estudio drena sus aguas hacia la subcuenca del río Pirrís y es uno de los puntos de mayor uso de agua en el beneficiado del café de una de las cooperativas más grandes de la Zona de los Santos.

Además, este trabajo, permitirá que el personal del Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos proponga estrategias para controlar o prevenir la contaminación del agua.

Objetivos de la pasantía

Objetivo general

Evaluar físico-química y microbiológicamente el agua superficial proveniente de los afluentes principales de la microcuenca Santa Marta ubicada en la Zona de los Santos mediante el uso de equipo de campo, cromatógrafo de iones y el sistema Quanti-Tray con el fin de conocer la calidad del agua de dicha cuenca como fuente para procesos agrícolas.

Objetivos específicos

Adaptar los protocolos de muestreo y laboratorio para los análisis físico-químicos y microbiológicos de muestras de agua superficial.

Realizar la medición de parámetros físico-químicos y microbiológicos de muestras de agua superficial mediante el uso de equipo de campo, cromatógrafo de iones y el sistema Quanti-Tray.

Determinar la calidad de agua de la microcuenca Santa Marta de acuerdo con los parámetros establecidos en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales.

Actividades realizadas o metodología de trabajo

Se establecieron 11 puntos de muestreo en la microcuenca Santa Marta, se realizó una visita previa al sitio para verificar su accesibilidad y minimizar riesgos. Se logró seleccionar puntos de fácil acceso; sin embargo, algunos presentaron obstáculos como caminos de tierra y abundante vegetación.

Seguidamente, se registró la ubicación de los puntos de muestreo mediante un localizador GPS, esta información se colocó en el Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto (QGIS) para ubicar los puntos en un mapa. Se sistematizó información a partir del libro “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (Baird et al., 2017), el Decreto N° 33903-MINAE-S “Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales” (MINAE, 2007) del Sistema Costarricense de Información Jurídica, diversos artículos científicos sobre calidad de agua superficial y los manuales de los equipos utilizados (Extech Instruments, 2011; HACH, 2017; HANNA Instruments, 2022; IDEXX Laboratories Inc., 2015; Thermo Fisher Scientific, 2015, 2016, 2020).

Redacción de protocolos

Se adaptaron protocolos para el muestreo y los análisis de agua superficial, incluyendo parámetros fisicoquímicos, químicos y microbiológicos, los cuales se encuentran detallados en el Manual de Procedimientos para el Análisis de Agua Superficial (ver Anexo 1) y en la infografía técnica de toma de muestra (ver Anexo 2). En el caso del protocolo de muestreo se consideraron los materiales que se deben llevar a campo, la cantidad de muestra

requerida para los distintos análisis, el recipiente adecuado para tomar la muestra, los datos que se deben registrar en cada muestra, así como el protocolo de ingreso de las muestras al laboratorio. Además, se diseñó una infografía explicativa que resume el procedimiento de muestreo, facilitando su aplicación en campo.

Los protocolos de los análisis físicoquímicos contenían la medición de color aparente, turbidez, temperatura, potencial de hidrógeno, sólidos totales disueltos y oxígeno disuelto. Para el análisis químico, se llevó a cabo la cromatografía de iones para la cuantificación de fluoruro, cloruro, nitrato y sulfato (Thermo Fisher Scientific, 2013). Con respecto al análisis microbiológico, se utilizó el sistema Quanti-Tray para la determinación de coliformes fecales (IDEXX Laboratories, Inc., 2015). En cada protocolo se consideraron aspectos como los materiales requeridos y el procedimiento que incluye la preparación de la muestra y la medición. Los protocolos se realizaron siguiendo las metodologías establecidas en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (Baird et al., 2017) y los procedimientos descritos en los manuales de cada equipo.

Todos estos documentos fueron compilados en un manual de procedimientos de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 10013 (Asociación Española de Normalización, 2021), la cual proporciona directrices para la gestión de la documentación en sistemas de calidad.

Calibración de equipos

Los equipos portátiles de medición que fueron:

- Medidor multiparamétrico HI9811-51 de HANNA instruments que permitió determinar pH, conductividad, sólidos totales disueltos y temperatura, calibrado según el manual (HANNA Instruments, 2022).
- Medidor de oxígeno disuelto SDL150 de EXTECH instruments, ajustado de acuerdo con las instrucciones del manual. (Extech Instruments, 2011).
- Turbidímetro 2100Q de HACH, configurado siguiendo las indicaciones del manual. (HACH, 2017).
- Colorímetro Orion AQ3700 de Thermo SCIENTIFIC, calibrado conforme a las especificaciones del manual (Thermo Fisher Scientific, 2020).

De la misma manera, el equipo multiparamétrico de mesa ORION VersaStar Pro de Thermo SCIENTIFIC se calibró según el manual (Thermo Fisher Scientific, 2015), empleando soluciones estándar certificadas.

Muestreo

El muestreo se llevó a cabo en época lluviosa julio y agosto 2024. Se recolectaron dos muestras de agua por punto de muestreo, una en un recipiente de plástico limpio y la otra en un recipiente estéril de vidrio, la primera para los análisis fisicoquímicos y la segunda para el análisis microbiológico. Cada recipiente fue rotulado con el número de muestra, tipo de muestra, nombre de la persona que recolecta la muestra, fecha, hora y lugar de recolección. Posterior a la recolección se colocaron las muestras en una hielera a 4 °C y se transportaron hasta el laboratorio. Lo anterior se fundamentó en lo establecido por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater en el apartado “1060 Recolección y conservación de muestras” (Baird et al., 2017).

Análisis en campo y en laboratorio

Se realizaron mediciones *in situ* de los parámetros físico químicos en campo, para esto se introdujeron las sondas del medidor multiparamétrico, así como el medidor de oxígeno en el cuerpo de agua, para la medición del color se tomó una muestra de 10 mL en un vial, el cual fue insertado en el colorímetro, asimismo se tomó una alícuota de 20 mL en un vial y se insertó en el turbidímetro (HACH, 2017).

En el laboratorio se realizó el análisis microbiológico, en donde se colocaron 100 mL de la muestra en un frasco con tiosulfato de sodio y se le agregó el reactivo Colilert-18. Luego se transfirió el contenido a una bandeja, la cual fue sellada en el equipo Quanti-Tray Sealer PLUS y se incubó a 44,5 °C durante 18 horas, pasado este tiempo se realizó la lectura de los resultados (IDEXX Laboratories, Inc., 2017).

Para el análisis por cromatografía de iones, se filtraron 10 mL de la muestra con un filtro de polietersulfona de 25 mm de diámetro con un tamaño de poro de 0,45 µm y se colocaron en un vial, al cual se le colocó una tapa con filtro y seguidamente se ubicó en el automuestreador del equipo para su respectivo análisis (Thermo Fisher Scientific, 2016). A

continuación, se realizaron las mediciones de parámetros fisicoquímicos a las muestras con ayuda de las distintas sondas del equipo multiparamétrico (Thermo Fisher Scientific, 2015).

Análisis de datos

Los resultados de todos los análisis fueron registrados en una base de datos en Excel, posteriormente se analizaron los datos y fueron interpretados conforme a lo que se establece en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (MINAE, 2007).

Resultados obtenidos de la pasantía en la empresa o institución

La figura 1 muestra la distribución de los 11 puntos de muestreo a lo largo de la microcuenca Santa Marta, la cual está delimitada en color azul. Los puntos de monitoreo se concentran principalmente en áreas urbanas y rurales (P1-P13), abarcando espacios de menor intervención antrópica e influenciado por actividades agrícolas (P1, P2, P3, P8, P10, P12 y P13) y espacios con una mayor densidad de población (P5, P6, P7 y P9). En el cuadro 1 se presenta la descripción de los sitios de muestreo, donde se detallan las características generales de cada punto y las principales observaciones registradas durante el trabajo de campo.

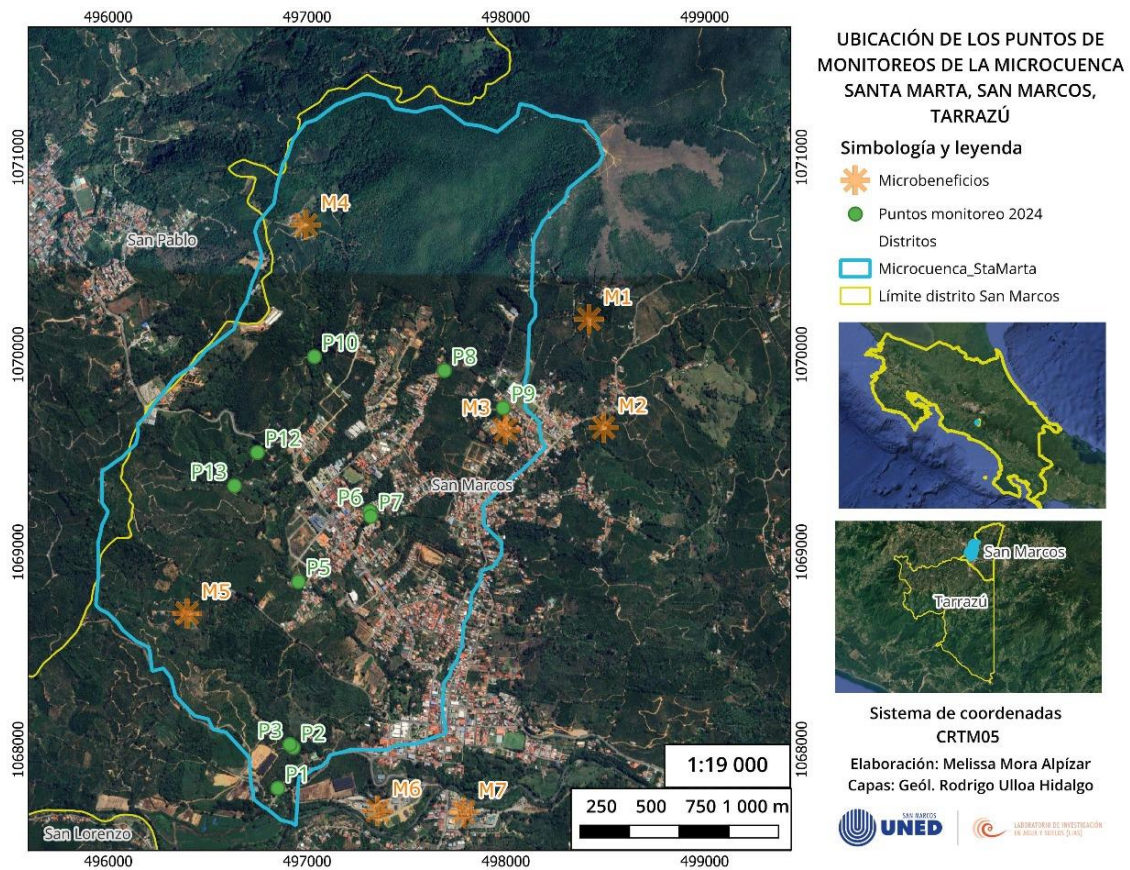


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo de la microcuenca Santa Marta.

Datum: CR05. Proyección: CRTM05. Fuente y diseño: Melissa Mora Alpizar, Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos.

Cuadro 1. Descripción de los sitios de muestreo de la microcuenca Santa Marta.

Sitio	Descripción del sitio
P1	Se localiza en un área predominantemente agrícola. Presenta vegetación ribereña y cultivos de café en sus alrededores, con un cauce de características rurales y buena cobertura vegetal. Se identifica un posible aporte de aguas de escorrentía agrícola proveniente de las zonas de cultivo cercanas.
P2	Se ubica en una zona con predominio de cultivos de café y vegetación ribereña que bordea el cauce. El entorno presenta condiciones típicamente rurales y agrícolas, con posible aporte de aguas de escorrentía agrícola procedentes de las áreas de cultivo adyacentes.
P3	Se encuentra en un entorno agrícola caracterizado por la presencia de cultivos de café y vegetación ribereña que protege parcialmente el cauce. El sitio muestra condiciones de buen sombreado y escasa intervención antrópica directa, aunque se identifica un posible aporte de aguas de escorrentía agrícola proveniente de los cafetales cercanos.
P5	Se ubica en una zona donde predomina el uso agropecuario del suelo. Alrededor del cauce se observa cobertura de pasto estrella, presencia de bosque y áreas destinadas al cultivo de café. El sitio mantiene cierta protección natural gracias a la vegetación circundante.

P6	Presenta un entorno predominantemente residencial. Alrededor del sitio se observan varias viviendas cercanas al cauce, lo que evidencia una influencia directa de las actividades domésticas en el entorno. Además, el punto no cuenta con cobertura vegetal directa sobre el cauce.
P7	Este sitio se encuentra rodeado de viviendas. Durante la visita se observaron vertimientos de desechos de construcción en las cercanías del cauce, lo que evidencia una intervención antrópica directa.
P8	Se localiza en una zona donde predomina el cultivo de café como principal uso del suelo. El cauce se localiza entre parcelas agrícolas y presenta condiciones de buena conservación, con escasa presencia de residuos visibles y mínima influencia antrópica directa.
P9	Presenta un uso mixto del suelo urbano y agrícola, con cultivos de café en las partes altas y viviendas a su alrededor. El sitio se encuentra completamente expuesto a la intemperie y es frecuentado por residentes del sector y animales domésticos, lo que evidencia una fuerte influencia de actividades humanas y la posible presencia de descargas residuales domésticas.
P10	Zona caracterizada por una cobertura boscosa que rodea el cauce y brinda protección natural al cuerpo de agua. Además, con áreas cercanas destinadas al cultivo de café.
P12	Se localiza en una zona rodeada por áreas con pasto estrella y cultivos de café. La vegetación circundante actúa como una barrera natural que favorece la conservación del sitio.
P13	Se ubica en un entorno rural con presencia de vegetación ribereña y cultivos de café. El sitio muestra un cauce bien definido y con cobertura vegetal en las márgenes, aunque se identifica un posible aporte de aguas de escorrentía agrícola proveniente de las áreas de cultivo cercanas.

Fuente: elaboración propia con base en observaciones de campo y mapa de monitoreo de la microcuenca Santa Marta.

En el Cuadro 2 se observan los resultados para los diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en los 11 puntos de muestreo de la microcuenca Santa Marta. Con respecto a la temperatura, los valores se mantuvieron estables en todos los sitios, mientras que el pH mostró variaciones desde condiciones ligeramente ácidas como en el sitio P9, clasificando este sitio en la clase 4, hasta valores neutros como en la mayoría de los sitios. La conductividad osciló entre 30 y 105 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflejando diferencias en la presencia de iones disueltos entre sitios. Los sólidos disueltos se encontraron en el rango de 20 a 50 mg/L , valores bajos para cuerpos de agua superficiales y dentro de la clase 1.

Cuadro 2. Valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en los 11 puntos de muestreo de la microcuenca Santa Marta.

	P1	P2	P3	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P12	P13
Temp (°C)	19,45	19,55	18,9	19,7	19,95	19,9	20,45	20,95	18,8	19,75	20,05
pH	7	6,9	7,1	6,7	6,15	6,5	6,25	5,65	6,75	7,1	7,3
Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	85	75	105	60	65	90	30	100	45	40	105
SD (mg/L)	40	40	50	30	30	45	20	50	25	20	50

OD (mg/L)	6,57	7,55	6,11	6,09	6,12	6,63	5,86	4,99	6,08	5,45	5,86
PSO (%)	83,7	86,65	79,25	79,4	77,75	82,85	78,55	64	69,9	77,65	80,55
Turb (UNT)	5,70	6,07	5,89	7,18	8,13	3,66	1,54	26,21	7,04	9,06	4,54
Color (Pt-Co)	51,5	48,5	49	59	65	41,5	ND	170,5	41,5	67	36,5
Cl⁻ (mg/L)	5,19	6,11	7,62	5,14	15,83	6,91	4,52	8,04	5,49	6,01	9,21
NO₃⁻ (mg/L)	11,03	11,21	11,80	9,51	11,86	17,13	6,75	11,44	7,72	6,19	16,25
SO₄²⁻ (mg/L)	7,50	7,75	5,45	6,58	10,58	9,08	8,07	15,05	7,43	4,87	5,16
CF (NMP/100 mL)	1011,2	308,8	93,7	173,3	>241 9,6	>241 9,6	35,9	>241 9,6	410,6	866,4	203,5

Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Fuente: elaboración propia con base en los resultados del estudio. Temp = Temperatura; pH = Potencial de hidrógeno; Cond = Conductividad; SD = Sólidos disueltos; OD = Oxígeno disuelto; PSO = Porcentaje de saturación de oxígeno; Turb = Turbiedad; Cl⁻ = Cloruros; NO₃⁻ = Nitratos; SO₄²⁻ = Sulfatos; CF = Coliformes fecales; ND = No detectable por el método utilizado. Para el fluoruro, los valores obtenidos fueron menores al límite de cuantificación de la técnica analítica empleada.

En cuanto al oxígeno disuelto, varió entre 4,99 y 7,55 mg/L, así como el porcentaje de saturación de oxígeno entre 64 y 86,65 %, este con algunos sitios en clase 2 y otros en clase 3; asimismo, la turbidez mostró fluctuaciones entre sitios, pero la mayoría de sus valores se ubicaron en clase 1. En cuanto a los iones, las concentraciones de cloruros y sulfatos se mantuvieron mayoritariamente en clase 1, sin representar riesgo según la normativa. No obstante, la concentración de nitratos varió entre los sitios de muestreo, mostrando diferencias en la clasificación de calidad. Finalmente, los coliformes fecales se detectaron en todos los puntos de muestreo, clasificando la calidad del agua principalmente en las clases 3 y 4.

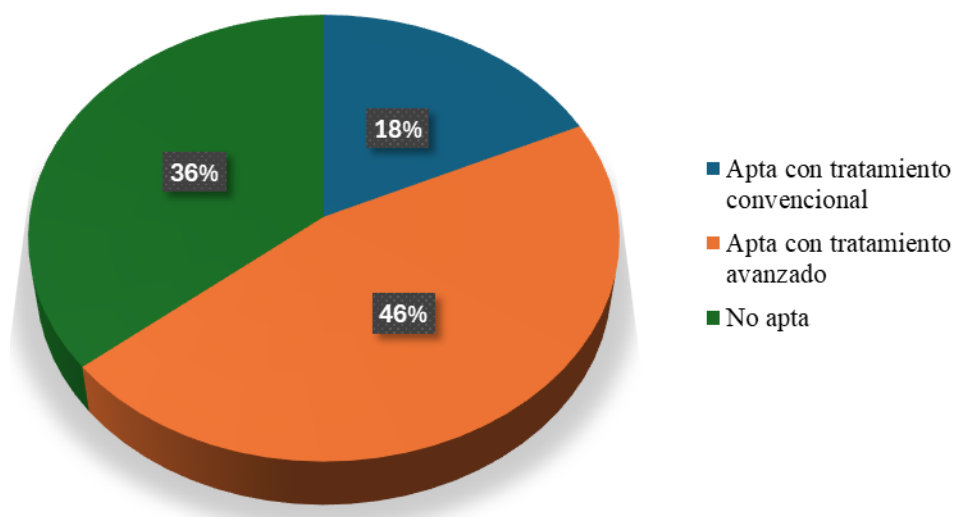


Figura 2. Evaluación de la calidad del agua de la microcuenca Santa Marta para el beneficiado de café y riego.

La evaluación del agua superficial se realizó con base en los valores obtenidos para los parámetros fisicoquímicos de los 11 puntos de muestreo, comparados con los límites establecidos en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. En la Figura 2 se muestra la distribución porcentual de la aptitud del agua superficial de la microcuenca Santa Marta según los resultados obtenidos. El 18 % del agua evaluada es apta para el beneficiado de café y riego con tratamiento sencillo, el 46 % requiere tratamiento avanzado y el 36 % no es apta para ninguno de estos usos.

Discusión de resultados

La estandarización de los protocolos es fundamental para fomentar la confianza en la calidad de las investigaciones y en la fiabilidad de los hallazgos, el uso de un método validado permite lograr resultados consistentes y fiables (Danopoulos et al., 2020). Debido a la importancia de la verificación de la exactitud y representatividad de los datos, se le da mayor énfasis al uso de técnicas adecuadas de recolección, seguimiento y conservación de muestras (Baird et al., 2017), este es el propósito de la infografía creada en este estudio.

En este estudio, los valores de pH en su mayoría se mantuvieron dentro de rangos que favorecen la presencia de coliformes fecales, lo cual coincide con lo señalado por Saalidong et al. (2022), quienes indican que estas bacterias sobreviven mejor en condiciones

óptimas de pH. No obstante, se reconoce que factores como la escorrentía, la temperatura y la radiación solar influyen aún más en su distribución. En adición, los cambios de pH pueden influir en la reactividad, la volatilidad de una sustancia química, así como la modificación de la especiación (Adams et al., 2022).

Los valores altos de pH suelen provocar la precipitación de metales y algunos compuestos químicos se vuelven más tóxicos para los seres vivos de los ecosistemas acuáticos, mientras que, los valores bajos de pH permiten una mayor solubilidad y biodisponibilidad de los metales y estos suelen ser más tóxicos (Adams et al., 2022; Saalidong et al., 2022). En este estudio, los valores de pH para el sitio P9 muestran una tendencia a la acidificación que podría atribuirse a la descarga de aguas residuales domésticas e industriales en la cuenca (Lemus et al., 2022).

Con respecto a los sólidos totales disueltos, Márquez et al. (2024) mencionan que son un indicador fundamental de la calidad del agua, puesto que, indica la concentración de sales, minerales y materia orgánica y cualquier otra sustancia disuelta en el agua. En este trabajo los valores obtenidos para los sólidos disueltos indican una concentración baja, ubicando todos los sitios de muestreo dentro de la clase 1, esto posiblemente porque el muestreo se realizó en época de lluvias, en donde los valores disminuyen debido al incremento del caudal del río y a las precipitaciones, que provocan un efecto de dilución (Blandón, 2019).

En un estudio realizado por Barriga et al. (2022) en Perú para determinar la calidad del agua superficial determinaron que el total de los sólidos disueltos del área estudiada se debe a la suma de los metales, minerales y las sales que se encuentran disueltos en el agua. Otro estudio indicó que los sólidos disueltos totales están meramente relacionados con la presencia de sales de cloruros, nitratos, fosfatos y sulfatos, asimismo, la disolución de sales influye en la presencia de sólidos disueltos (Saalidong et al., 2022). En el presente estudio, si bien los valores de todos los sitios se mantuvieron dentro de los rangos permitidos, las concentraciones de sólidos disueltos estuvieron particularmente influenciadas por la presencia de cloruros, sulfatos y, en especial, de nitratos, los cuales alcanzaron niveles elevados en la mayoría de los puntos de muestreo.

Aunque el parámetro de conductividad no es considerado en el reglamento de Costa Rica para la clasificación y monitoreo de los cuerpos de agua superficiales, Ahmadianfar et al. (2020) mencionan la importancia de la conductividad eléctrica como un indicador del riesgo de salinidad en agua apta para consumo humano y agua para riego, un valor superior a los 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no es adecuado para esos usos y según la Organización Mundial de la Salud el valor máximo admisible para agua de consumo es 1 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al igual que lo señalado anteriormente para los sólidos disueltos, estos resultados pueden explicarse porque el muestreo se realizó en época de lluvias, lo que provocó un efecto de dilución.

Adicionalmente a la salinidad, la conductividad también puede verse influenciada por la presencia de otros iones y varía en función de la temperatura del agua, siendo este un factor adicional que puede influir en los valores registrados (Barriga et al., 2022). En el caso de la microcuenca Santa Marta, no se identificó riesgo de contaminación por agua salada, ya que se trata de una zona montañosa sin influencia marina.

En el caso del oxígeno disuelto, Fábrega et al. (2022) indican que este parámetro es un indicador del impacto que ejercen las actividades humanas sobre el ecosistema; la concentración de oxígeno disuelto en el agua depende en gran medida de la temperatura, en el caso del agua de los ríos de Costa Rica la temperatura se encuentra aproximadamente entre 20 °C y 25 °C, por lo que los valores de oxígeno disuelto se estiman entre 7,0 mg/L y 7,7 mg/L (Calvo-Brenes, 2019). En este trabajo, tanto los valores de temperatura como los de oxígeno reflejan una variación relativamente estrecha entre los diferentes puntos.

Con respecto al porcentaje de saturación de oxígeno, el 100 % representa la cantidad máxima de oxígeno que el agua puede disolver en ciertas condiciones, valores inferiores indican que hay menos oxígeno disuelto posiblemente por contaminación, mientras que valores superiores indican aguas sobresaturadas que puede ser señal de un crecimiento excesivo de algas (Arias, 2016). Además de la contaminación, la disminución del oxígeno disuelto en cuerpos de agua puede estar influenciada por factores físicos, biológicos y climáticos, como la temperatura, la presencia de materia orgánica, microorganismos o partículas en suspensión, que interfieren con el proceso natural de oxigenación del agua (Blanco-Zuñiga et al., 2021).

En este estudio los valores obtenidos para el porcentaje de saturación de oxígeno indican posible contaminación por vertimientos residuales de aguas residuales domésticas o actividades agrícolas cercanas, que provocan un aumento en el consumo de oxígeno, disminuyendo de esta manera la cantidad de oxígeno disuelto disponible (Oñate & Cortéz, 2020). Esta situación se evidenció principalmente en el punto 9, que presentó el menor porcentaje de oxígeno disuelto. Dicho punto se ubica en una zona con presencia de viviendas y se encuentra completamente expuesto a la intemperie, condiciones que favorecen esta disminución. De acuerdo con este parámetro, el punto 9 se clasifica en la clase 3, mientras que la mayoría de los sitios evaluados se encuentran en la clase 2, lo que indica un menor impacto por descargas residuales.

Asimismo, la presencia de microorganismos, materia orgánica y arcillas, arrastradas por deslizamientos y escorrentía de aguas lluvia, afectan los procesos de restauración y la distribución del oxígeno disuelto en el agua (Blanco-Zuñiga et al., 2021). Este fenómeno está estrechamente relacionado con la época lluviosa en la que se llevó a cabo el muestreo.

Con respecto a la turbidez, Tomperi et al. (2020) consideran que es un parámetro fundamental de la calidad de agua, ya que es un indicador de la contaminación de los cuerpos de agua, esta turbidez es generada por partículas orgánicas e inorgánicas disueltas y componentes disueltos que absorben luz y la dispersan, lo que disminuye la claridad del agua. En este estudio, los valores de turbidez para la mayoría de los sitios se encuentran en la clase 1 del reglamento, a excepción del punto 9, que se clasificó en la clase 3, debido posiblemente a la influencia de vertimientos de aguas residuales.

Asimismo, dado que los sólidos disueltos en el agua contribuyen a la turbidez de la misma (Saalidong et al., 2022), los valores obtenidos pueden explicarse por la actividad agrícola localizada aguas arriba del punto 9, la cual genera sedimentos, así como por procesos de erosión que favorecen el transporte de partículas mediante la escorrentía hacia los cuerpos de agua.

Relacionado con el parámetro de color, Trujillo & Cajigas (2018) mencionan que uno de los métodos más utilizados actualmente para medir color es el método de platino-cobalto propuesto por APHA, AWWA, WEF (2012), el mismo utilizado en este estudio. Los

resultados obtenidos para la microcuenca Santa Marta evidenciaron que la mayoría de los sitios se ubican dentro de la clase 2 del reglamento nacional. Sin embargo, el punto 9 presentó el valor más elevado, superando esta categoría, lo que podría asociarse con la presencia de materia orgánica y partículas suspendidas, entre ellas las de tamaño coloidal, en el agua superficial (Baird et al., 2017).

Con respecto a los iones, los niveles de nitrato fueron moderadamente altos en los puntos 7 y 13, mientras que el resto de los sitios se ubicaron en las clases 2 y 3 del reglamento, condición que podría estar asociada al uso de fertilizantes nitrogenados empleados en las actividades agrícolas de la zona (Galindo et al., 2020). Además, el nitrato no se retiene en el suelo por lo que es altamente susceptible a la lixiviación y dado que la cuenca se localiza en una zona rural este ion representa uno de los contaminantes más comunes en aguas subterráneas cuyas altas concentraciones pueden generar riesgos significativos para la salud pública (Sasakova et al., 2018).

Relacionado con los cloruros, Muñoz (2020) indica que el agua con presencia de altas concentraciones de cloruro no puede ser utilizada para riego porque es tóxico para las plantas. Los sulfatos están presentes naturalmente en el suelo, las rocas y los minerales, el aire, el agua y en las plantas, sin embargo, en altas concentraciones genera la dureza del agua por lo que se considera un contaminante inorgánico del medio ambiente (Salem & Draz, 2020). En este estudio, los valores de cloruros y sulfatos en todos los sitios se mantuvieron dentro del rango establecido para la clase 1 según el reglamento nacional, lo que indica que no representan un riesgo para el uso del agua.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos establece las normas secundarias para el agua en donde considera algunos de los mismos parámetros que se especifican en la normativa costarricense. Entre estos, el pH con una cantidad mínima y máxima permitida entre 6,5 a 8,5, sólidos disueltos con un límite de 500 mg/L, color con un máximo de 15 unidades de color, así como los iones fluoruro y cloruro con valores máximos de 2,0 mg/L y 250 mg/L, respectivamente (Environmental Protection Agency, 2024).

En el caso de la Organización Mundial de la Salud (2018) establece valores de referencia para el fluoruro de 1,5 mg/L y nitrato 50 mg/L. De acuerdo con estas normativas

internacionales, los valores obtenidos en todos los sitios para los distintos parámetros se mantuvieron por debajo de los límites máximos establecidos, con excepción del parámetro de color, que superó el valor recomendado por la EPA en la mayoría de los sitios, salvo en el punto 8.

Con respecto a los valores obtenidos para los coliformes fecales o termotolerantes evidenciaron la presencia de coliformes fecales mayoritariamente en los puntos 6, 7 y 9 que se clasifican en la clase 4, lo que sugiere una contaminación por residuos fecales posiblemente por descarga de aguas residuales, dado que estos sitios se encuentran en áreas con mayor influencia de viviendas o urbanismo. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Arce-Villalobos et al. (2022), Badilla & Mora (2019), Huaman-Vilca et al. (2020) y Rodríguez, & Silva (2015) quienes indican que la presencia de coliformes fecales en el agua es un indicador de contaminación proveniente de aguas residuales urbanas e industriales, así como de excrementos de animales en áreas cercanas a los cuerpos de agua.

De la misma manera, los coliformes fecales reflejan contaminación fecal atribuible a desechos animales o descargas de aguas residuales domésticas (Arias-Echandi et al., 2023; Orozco-Gutiérrez, 2019). Asimismo, en Costa Rica la contaminación por organismos termotolerantes podría estar relacionada con la presencia de materia orgánica en el cuerpo de agua (Pérez-Gómez et al., 2021), lo que sugiere que los niveles detectados en los diferentes afluentes de la microcuenca pueden estar influenciados por la carga orgánica proveniente de distintas fuentes.

El análisis de los parámetros complementarios que establece la normativa nacional referente a la evaluación de las aguas superficiales permite determinar la contaminación de los cuerpos de agua y muestra el estado ambiental de los mismos (Alfaro, 2019), así como interpretar la calidad del agua y realizar su clasificación de acuerdo con las clases establecidas.

En este sentido, los resultados de este trabajo muestran que el agua de los puntos 5 y 12 puede destinarse al beneficiado húmedo de café mediante tratamiento convencional y también resulta apta para riego. Los puntos 1, 2, 3, 8 y 10 presentan una calidad de agua que permite su utilización en el beneficiado húmedo de café únicamente con tratamiento

avanzado, siendo igualmente aprovechables para riego. Por el contrario, los puntos 6, 7, 9 y 13 no cumplen con las condiciones necesarias para ser empleados en el beneficiado húmedo de café ni para actividades de riego.

Es importante considerar que, para realizar la evaluación de calidad del agua superficial, es de gran importancia considerar la mayor cantidad de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, ya que, por ejemplo, el índice de calidad holandés únicamente toma en cuenta tres indicadores fisicoquímicos para conocer la calidad de agua, dando prioridad únicamente a procesos de degradación (Pérez-Gómez et al., 2021). Cabe destacar que, en este estudio no se consideraron parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno que sí se considera en la normativa costarricense y fue considerada por los investigadores Alfaro (2019), Anchia (2021), Bolaños (2023) y Huaman-Vilca et al. (2020) en sus estudios como un parámetro para evaluar la calidad del agua superficial.

Relevancia de la pasantía en su perfil profesional y conocimientos adquiridos de la experiencia

La pasantía representó una oportunidad valiosa para aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera de Biotecnología en un entorno real de trabajo. Esta experiencia, combinada con los nuevos aprendizajes obtenidos a lo largo del proyecto, me permitió alcanzar los objetivos propuestos y enfrentar desafíos concretos del ámbito profesional.

Uno de los principales aportes de esta experiencia fue el conocimiento y la aplicación de metodologías estándar utilizadas a nivel nacional e internacional para el análisis de muestras de agua. A partir de estas metodologías y de los manuales de uso de los equipos, fue posible adaptar protocolos estandarizados adaptados a las condiciones y necesidades del laboratorio. Asimismo, el estudio de la normativa costarricense relacionada con el agua potable y el agua superficial, así como los valores límite establecidos para cada parámetro, me brindó una visión más clara y completa del marco legal vigente en materia de recursos hídricos.

Esta pasantía también fortaleció mis habilidades técnicas, tanto en el trabajo de campo como en el laboratorio. Aprendí a realizar una correcta recolección de muestras, mediciones *in situ*, almacenamiento y transporte adecuado, así como el registro de datos y la ejecución de los análisis físico-químicos y microbiológicos, garantizando la trazabilidad de las muestras. Además, tuve la oportunidad de utilizar equipos especializados como el cromatógrafo de iones y tecnologías innovadoras como el sistema Quanti-Tray para la identificación y cuantificación de coliformes totales, fecales y *Escherichia coli*, lo cual fue clave para fortalecer mis competencias profesionales.

Durante el desarrollo de la pasantía, enfrenté diversos retos tanto en campo como en el laboratorio. Estas situaciones me permitieron desarrollar habilidades como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la capacidad de adaptación, elementos esenciales para mi crecimiento profesional. La colaboración con un equipo multidisciplinario también fue enriquecedora, ya que me permitió integrar los conocimientos de Biotecnología con otras áreas del conocimiento, ampliando así mi perspectiva y comprensión del trabajo científico en equipo.

Finalmente, los conocimientos y habilidades adquiridos en la carrera me permitieron evaluar la calidad del agua de la Microcuenca Santa Marta, contribuyendo así a la generación de información relevante para la investigación ambiental. Esta experiencia reafirma el potencial de la Biotecnología como herramienta clave en la búsqueda de soluciones a los problemas ambientales que enfrentamos actualmente.

Conclusiones

Este trabajo permitió evaluar la calidad del agua superficial de la microcuenca Santa Marta mediante parámetros fisicoquímicos y microbiológicos establecidos en el Cuadro 2. Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de las aguas de cuerpos superficiales para las clases establecidas en el presente Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales (DE-33903-MINAE-S). En general, la mayoría de los parámetros analizados se encontraron dentro de los valores establecidos en las clases 1 y 2 del reglamento nacional, lo que indica que, en varios sectores,

el agua presenta condiciones aceptables para su aprovechamiento en el beneficiado del café con tratamientos básicos o desinfección simple.

Sin embargo, parámetros como los nitratos y los coliformes fecales mostraron valores que clasifican el agua en clases de mayor deterioro, principalmente en sitios específicos como el punto 9, donde la influencia de descargas domésticas y actividades agrícolas cercanas se hizo evidente. Estos resultados reflejan que la calidad del agua de la microcuenca no es homogénea y que existen focos de presión que limitan su uso seguro para consumo o procesos agroindustriales como el beneficiado del café.

En consecuencia, la clasificación de la microcuenca, de acuerdo con los parámetros más críticos, ubica el recurso hídrico en categorías que restringen su uso para fines sensibles, aunque su aprovechamiento con fines de riego o actividades menos demandantes podría ser viable en la mayoría de los puntos. Asimismo, este estudio evidencia la necesidad de un monitoreo constante y de un análisis más detallado por sitio de muestreo, ya que las variaciones observadas demuestran que cada punto responde a influencias locales diferentes, relacionadas tanto con la actividad agrícola como con las descargas residuales.

Finalmente, el trabajo confirma la importancia de considerar los parámetros complementarios establecidos en la normativa nacional e internacional para obtener una visión integral de la calidad del agua, así como la conveniencia de ampliar futuros estudios hacia la inclusión de otros indicadores, como el Índice Holandés de Valoración de la Calidad para los cuerpos de agua superficiales y el Índice Biológico, que permitan una evaluación más completa de los procesos de contaminación presentes en la microcuenca.

Recomendaciones

- Desarrollar un monitoreo continuo de la calidad del agua de la microcuenca Santa Marta con el fin de identificar cambios en la calidad del agua e implementar medidas correctivas. También, para determinar el comportamiento de los cuerpos de agua en la época seca y lluviosa.
- Establecer los requerimientos de tratamiento del agua según su calidad, aplicando tratamiento convencional para los puntos con condiciones aceptables, tratamiento

avanzado en aquellos con presencia de contaminantes químicos o microbiológicos, y restricción de uso en los sitios que no cumplen con los criterios de aptitud para beneficiado de café o riego.

- Difundir los resultados obtenidos a las comunidades y usuarios locales de la microcuenca Santa Marta, mediante actividades de capacitación, talleres o materiales informativos, con el propósito de fortalecer la educación ambiental y promover prácticas sostenibles en el uso del recurso hídrico.
- Considerar en futuros estudios el índice holandés establecido en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales, incorporando la medición de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), con el fin de obtener una clasificación más completa y precisa de la microcuenca.
- Determinar la calidad biológica de la microcuenca Santa Marta mediante el desarrollo de un monitoreo de macroinvertebrados bentónicos, haciendo uso del Índice Biológico (BMWP-CR) para brindar un estudio más robusto de la calidad que presenta la microcuenca.
- Para futuras investigaciones estudiar las principales causas de la contaminación de la microcuenca Santa Marta, especialmente relacionadas con contaminaciones difusas y puntuales.

Referencias bibliográficas

- Adams, H., Burlingame, G., Ikehata, K., Furatian, L., & Suffet, I. H. (2022). The effect of pH on taste and odor production and control of drinking water. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(11), 1278-1290. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.133>
- Ahmadianfar, I., Jamei, M., & Chu, X. (2020). A novel hybrid wavelet-locally weighted linear regression (W-LWLR) model for electrical conductivity (EC) prediction in surface water. *Journal of Contaminant Hydrology*, 232, 103641. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103641>

- Alfaro, J. E. (2019). *Caracterización de la calidad del agua superficial en las subcuencas Quebrada Honda y Chiz-Maravilla, Cartago, Costa Rica*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Costa Rica]. <http://hdl.handle.net/11056/18785>
- Almulhim, A. I., & Abubakar, I. R. (2023). Developing a sustainable water conservation strategy for Saudi Arabian cities. *Groundwater for Sustainable Development*, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101040>
- Anchia, L. D. (2021). *Caracterización y diagnóstico de la calidad de agua en la cuenca alta del Río Bermudez, Heredia, Costa Rica*. [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11052>
- Arce-Villalobos, K., Sánchez-Gutiérrez, R., Centeno-Morales, J., Marín-León, R., & Rodríguez-Rodríguez, J. A. (2022). Calidad del agua superficial y presiones socioambientales en la microcuenca alta del río Poás. *Uniciencia*, 36(1), 382-404. <http://dx.doi.org/10.15359/ru.36-1.24>
- Arias Araya, M. F. (2016). Calidad de cuerpos receptores de agua, según el Índice Holandés de Valoración, en la Cuenca del Bebedero, Guanacaste. *Repositorio Institucional de la Universidad Técnica Nacional*. <http://repositorio.utn.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/218>
- Arias-Echandi, M. L., Barrantes, G., & Retana, M. (2023). Effect of trout farming activity on the concentration of total coliforms and Escherichia coli in waters of the upper Savegre river basin, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 71(1), e52425. <http://dx.doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71i1.52425>
- Asociación Española de Normalización. (2021). *UNE-ISO 10013:2021. Sistemas de gestión de la calidad — Orientación para la información documentada*. UNE.

- Badilla, A. A., & Mora, A. D. (2019). Calidad Sanitaria de las Aguas Superficiales en litorales de Costa Rica: situación del 2012 al 2018. *Revista Tecnología en Marcha*, 32(10), 17-25. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4877>
- Baird, R. B., Eaton, A. D., Clesceri, L. S., & Rice, E. W. (Eds.). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Barriga Paria, C. J., Figueroa Condori, E. F., Chavez Quispe, B. J., Flores Arias, J. M., Flores Bautista, G. S., Mamani, E. E., Cabana Bautista, I. A., & Quispe Quispe, R. F. (2022). Calidad de aguas superficiales y subterráneas en la zona de influencia de una cantera de yeso en el Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 88(2), 101-116. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v88i2.383>
- Blanco-Zuñiga, C. R., Rojas-Arias, N., Peña-Pardo, L. Y., Mendoza-Oliveros, M. E., & Martínez-Ovalle, S. A. (2021). Study of the influence of clays on the transfer of dissolved oxygen in water. *Ingeniería*, 26(1), 5-14. <https://doi.org/10.14483/23448393.15846>
- Blandón, L. C. (2019). Calidad de las aguas superficiales en la microcuenca río Pire, municipio de Condega Nicaragua. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, (31), 58-64. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i31.8470>
- Bolaños, J. D. (2023). Calidad del agua superficial y sus implicaciones con el agua potable en Las Brisas de Zarcerro. *InterSedes*, 24(49), 196-215. <https://doi.org/10.15517/isucr.v24i49.50331>
- Calvo-Brenes, G. (2019). Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 32(4), 104-115. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4796>
- Cotler Ávalos, H., Galindo Alcántar, A., González Mora, I. D., Pineda López, R. F., & Ríos Patrón, E. (2013). *Cuencas hidrográficas: Fundamentos y perspectivas para su*

manejo y gestión (1ª. ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable.

Danopoulos, E., Twiddy, M., & Rotchell, J. M. (2020). Microplastic contamination of drinking water: A systematic review. *PloS One*, 15(7), e0236838. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236838>

Environmental Protection Agency. (2024). *Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals*. <https://www.epa.gov/sdwa/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals#why-set>

Extech Instruments. (2011). *Manual del usuario Medidor de oxígeno disuelto* [Manual de usuario].

Fábrega, J. J. H., Núñez, K., & González, A. (2022). Contaminación por coliformes y evaluación físicoquímica del agua en las cercanías de la desembocadura del río Mariato, Veraguas, Panamá. *Revista Colegiada de Ciencia*, 3(2), 90-101. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/334/3342999006/>

Galindo, L. A. G., Rivas, A. C., Melendez, J. P., & Mayorquín, N. (2020). Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. *Scientia et Technica*, 25(1), 172-183. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7368100>

Gil, J. A., González, Vizcaino, C., & Montaña, N. J. (2018). Evaluación de la calidad del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA). Caso de estudio: Cuenca del Río Guarapiche, Monagas, Venezuela. *Anales Científicos*, 79(1), 111-119. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1146>

Gu, W., Xue, F., Han, W., Wang, Z., Zhao, J., Zhang, L., Yang, C & Jiang, J. (2023). Assessment of the spatial association between multiple pollutants of surface water and digestive cancer incidence in China: A novel application of spatial machine

learning. *Ecological Indicators*, 154, 110897.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110897>

HACH. (2017). *Manual de usuario 2100Q y 2100Qis* [Manual de usuario].

Hairom, N. H. H., Soon, C. F., Mohamed, R. M. S. R., Morsin, M., Zainal, N., Nayan, N., Zulkifli, C. Z & Harun, N. H. (2021). A review of nanotechnological applications to detect and control surface water pollution. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102032. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102032>

HANNA Instruments. (2022). *Instruction manual HI9811-51 Portable pH / EC / TDS / Temperature Meter* [User manual].

Huaman-Vilca, S., Lucen-Espinoza, M., Paredes-Vite, M., & Alfaro, D. C. (2020). Evaluación de la calidad del agua de la Laguna Marvilla en los Pantanos de Villa (Lima–Perú). *South Sustainability*, 1(2), e019-e019. <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-019>

IDEXX Laboratories, Inc. (2015). *Quanti-Tray Sealer PLUS: User Manual (P/N: 06-0002210-00)* [User manual]. IDEXX Laboratories, Inc.

IDEXX Laboratories, Inc. (2017). *Colilert-18 Procedure* [Technical document]. IDEXX Laboratories.

Kılıç, Z. (2020). The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4(5), 239-241. DOI: [10.15406/ijh.2020.04.00250](https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00250)

Lemus, M., Cabrera, M., & Calmettes, X. (2022). Parámetros fisicoquímicos y calidad microbiológica de las aguas del río Yaque Norte, República Dominicana. *The Biologist*, 20(2), 323-330. <https://doi.org/10.24039/rtb20222021353>

Lu, H., Zhao, R., Zhao, L., Lyu, B., Wang, J., & Zhang, L. (2023). A contrarian growth: The spatiotemporal dynamics of open-surface water bodies on the northern slope of

- Kunlun Mountains. *Ecological Indicators*, 157, 111249. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111249>
- Márquez, E. Y. C., Astocaza, L. L. H., Huamaní, M. L. C., Huamán, W. S., Suazo, J. M. A., & Contreras, C. M. B. (2024). Sólidos totales disueltos en agua superficial para consumo humano en San Juan de Pillo, Perú. *Revista Alfa*, 8(24), 870-881. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i24.310>
- Ministerio del Ambiente y Energía de Costa Rica [MINAE]. 2002. *Decreto Ejecutivo N°30480-MINAE: Reglamento para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Diario Oficial La Gaceta.*
- Ministerio del Ambiente y Energía de Costa Rica [MINAE]. 2007. *Decreto N° 33903-MINAE-S: Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Aguas Superficiales. Diario Oficial La Gaceta.*
- Muñoz, H. A. C. (2020). Análisis de los parámetros de calidad del agua del efluente del río muerto para su posible reutilización del Cantón Manta, Ecuador. *Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional*, 5(2), 579-604. DOI: [10.23857/pc.v5i2.1299](https://doi.org/10.23857/pc.v5i2.1299)
- Observatorio de Agua y Saneamiento. (2022, 17 de febrero). Equipo de trabajo. *Observatorio de Agua y Saneamiento*. <https://investiga.uned.ac.cr/obsas/elementor-1063/>
- Observatorio de Agua y Saneamiento. (2022, 17 de febrero). Laboratorios de Investigación en Agua y Suelos San Marcos. *Observatorio de Agua y Saneamiento*. <https://investiga.uned.ac.cr/obsas/lab-agua-y-suelos/>
- Oñate Barraza, H. C., & Cortéz Henao, G. Y. (2020). Estado del agua del río Cesar por vertimientos residuales de la ciudad de Valledupar. Bioindicación por índice BMWP/Col. *Tecnura*, 24(65), 39-48. <https://doi.org/10.14483/22487638.15766>

- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica?* Sociedad Geográfica de Lima, Foro Peruano para el Agua - GWP Perú.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Organización Mundial de la Salud.
- Orozco-Gutiérrez, J. (2019). Clasificación de potenciales fuentes de abastecimiento subterráneas y subsuperficiales en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 32(10), 138–146. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i10.4887>
- Panca, O., & Palomino, G. (2022). Remoción del fluoruro en agua potable por precipitación-floculación con policloruro de aluminio y lechada de cal. *Revista Ciencia Agraria*, 1(2), 7-16. <https://doi.org/10.35622/j.rca.2022.02.001>
- Pérez-Gómez, G., Alvarado-García, V., Rodríguez-Rodríguez, J. A., Herrera, F., & Sánchez-Gutiérrez, R. (2021). Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua superficial del río Grande de Tárcoles, Costa Rica: un enfoque ecológico. *Cuadernos de Investigación UNED*, 13(1). <https://doi.org/10.22458/urj.v13i1.3148>
- Puerta, G. I. (2015). *Buenas prácticas para la prevención de los defectos de la calidad del café: Fermento reposado fenólico y mohoso*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). <http://hdl.handle.net/10778/675>
- Rodríguez, C., & Silva, M. (2015). Calidad del agua en la microcuenca alta de la quebrada Estero en San Ramón de Alajuela, Costa Rica. *Pensamiento Actual*, 15(25), 85-97. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamiento-actual/article/view/22597/24020>
- Rojas, R. P., & Rojas, L. N. (2023). Caracterización y determinación de la calidad de agua superficial. *Revista de Investigaciones*, 12(1), 65-80. <https://doi.org/10.26788/ri.v12i1.4014>

- Saalidong, B. M., Aram, S. A., Otu, S., & Lartey, P. O. (2022). Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground and surface water systems. *PloS One*, *17*(1), e0262117. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262117>
- Salem, J. K., & Draz, M. A. (2020). Synthesis and application of silver nanorods for the colorimetric detection of sulfate in water. *Inorganic Chemistry Communications*, *116*, 107900. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107900>
- Sanae, B., Mohammed, B., Nisrine, I., Youness, G., Nariman, O., Mustapha, T., Hananne, T & Zakia, R. (2024). Assessment of surface water quality: Case study of Oued Fez catchment areas (Morocco). *Environmental and Sustainability Indicators*, *21*, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100326>
- Sasakova, N., Gregova, G., Takacova, D., Mojziso, J., Papajova, I., Venglovsky, J., Szaboova, T; & Kovacova, S. (2018). Pollution of surface and ground water by sources related to agricultural activities. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *2*, 42. doi: [10.3389/fsufs.2018.00042](https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00042)
- Sogno, P., Klein, I., & Kuenzer, C. (2022). Remote sensing of surface water dynamics in the context of global change—a review. *Remote Sensing*, *14*(10), 2475. <https://doi.org/10.3390/rs14102475>
- Thermo Fisher Scientific. (2013). *Dionex IonPac AS22 and Dionex IonPac AS22-Fast Columns: Product Manual (P/N: 065119-08)* [Product manual]. Thermo Fisher Scientific Inc.
- Thermo Fisher Scientific. (2015). *Manual de usuario del medidor Orion Versa Star Pro* [User manual].
- Thermo Fisher Scientific. (2016). *Dionex Aquion Ion Chromatography System Operator's Manual* [User manual].

- Thermo Fisher Scientific. (2020). *User Manual Thermo Scientific Orion AQUAfast AQ3700 Portable Multiparameter Colorimeter* [User manual].
- Tomperi, J., Isokangas, A., Tuuttila, T., & Paavola, M. (2020). Functionality of turbidity measurement under changing water quality and environmental conditions. *Environmental Technology*, 43(7), 1093-1101. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1815860>
- Trujillo, A. F. O., & Cajigas, M. E. M. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 7(1), 143-155. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.68086>
- Valenciano, J. A. (2008). *La actividad cafetalera en los santos: diagnóstico para un análisis de los medios de vida en la agrocadena*. Centro Internacional de Política Económica. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/8626>

Anexos

Anexo 1. Manual de Procedimientos para el Análisis de Agua Superficial, adaptado específicamente para el Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos, junio 2024

**UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN AGUA Y SUELOS**

**MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL ANÁLISIS DE AGUA
SUPERFICIAL**

Fecha de emisión: junio 2024

Versión: 01

Elaborado por: Paula Portuguez Mora

Índice

1. Introducción	3
2. Objetivo	3
3. Alcance	3
4. Referencias normativas	3
5. Procedimientos	4
5.1. Muestreo de agua superficial	4
5.2. Aniones (F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ y SO ₄ ²⁻)	4
5.3. Coliformes fecales	7
5.4. Color aparente	7
5.5. Oxígeno disuelto en campo	8
5.5. Oxígeno disuelto en laboratorio	9
5.6. pH en campo	9
5.7. pH en laboratorio	10
5.8. Porcentaje de saturación de oxígeno en campo	10
5.9. Porcentaje de saturación de oxígeno en laboratorio	11
5.10. Sólidos disueltos totales en campo	11
5.11. Sólidos disueltos totales en laboratorio	12
5.12. Temperatura en campo	13
5.13. Temperatura en laboratorio	13
5.14. Turbiedad	14

1. Introducción

Este manual tiene como finalidad estandarizar los procedimientos utilizados en el Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos para el análisis de agua superficial, garantizando la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

2. Objetivo

Establecer los procedimientos de muestreo y análisis fisicoquímicos y microbiológicos para el análisis de muestras de agua superficial, asegurando el cumplimiento de normativas vigentes y buenas prácticas de laboratorio.

3. Alcance

Este manual es aplicable a todas las actividades de muestreo y análisis de agua superficial realizadas en el laboratorio, incluyendo la recepción de muestras, preparación, análisis y registro de los resultados.

4. Referencias normativas

- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Baird et al., 2017).
- ISO 10013 Directrices para la gestión de la documentación en sistemas de calidad.
- Procedimientos descritos en los manuales de usuario de los equipos utilizados.

5. Procedimientos

5.1. Muestreo de agua superficial

Procedimiento:

1. Rotule el recipiente de muestra con la siguiente información: número de muestra, tipo de muestra, nombre del recolector, fecha, hora y lugar de recolección.

Nota: el recipiente debe estar completamente limpio, utilice un recipiente estéril para muestras utilizadas en el análisis microbiológico.

2. Ingrese al punto de muestreo.
3. Enjuague el recipiente 3 veces con el agua a analizar.

Nota: evite el paso 3 para muestras utilizadas en el análisis microbiológico.

4. Sumerja el recipiente hacia la corriente en ángulo de 45° aproximadamente y recolecte la muestra de agua. Llene el recipiente completamente.

Nota: para muestras utilizadas en el análisis microbiológico debe llenar el recipiente a $\frac{3}{4}$ de su volumen.

5. Almacene el recipiente de forma vertical en una hielera, con una temperatura entre 1-6 °C.
6. Traslade la muestra al laboratorio en un plazo menor a 8 horas.

5.2. Aniones (F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-})

Equipo: Cromatógrafo de iones

Procedimiento:

1. Prepare el eluyente. Para 1 litro de eluyente, mida 10 mL del concentrado que contiene 4.5 mM de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y 1.4 mM de bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$). Transfiera el concentrado a un matraz aforado de 1 litro

y complete hasta la línea de aforo con agua ultrapura tipo I. Mezcle homogéneamente antes de su uso.

Nota: estime previamente el volumen total de eluente que se utilizará durante toda la corrida y preparar una cantidad adecuada para evitar interrupciones o daños al sistema. Si el equipo opera sin eluente se dañará.

2. Coloque el eluente preparado en la botella que se encuentra en la parte superior del equipo.
3. Encienda el equipo y el automuestreador.
4. Espere unos minutos para que la computadora detecte el equipo mediante el software correspondiente.
5. Abra el Software Chromeleon.
6. En la pestaña "Home" del software, haga clic en el botón verde que indica "Desconectado" tanto en el módulo del muestreador (Sampler) como en el de la bomba (Pump), para establecer la conexión de ambos dispositivos con el software. Asegúrese de que el estado cambie a "Conectado" antes de continuar.
7. Purgue la bomba. Para esto, abra la válvula de purga dando una vuelta completa. En la pestaña "Pump" del software, haga clic en el botón Prime y el sistema mostrará un aviso solicitando la apertura de la válvula. Haga clic en el botón Ok. Espere aproximadamente 5 minutos.

Nota: durante el proceso, verifique visualmente que esté saliendo líquido por la manguera de purga, lo cual indica que el equipo está funcionando correctamente.

8. Haga clic en el botón "off" para finalizar la purga.
9. Cierre la válvula de purga.
10. Verifique las condiciones de trabajo en el software, de acuerdo con lo que indica el Informe de Control de Calidad de la columna que está utilizando.
11. Coloque el flujo determinado y enciéndalo. Espere a que aumente un poco la presión.

Nota: asegúrese de que haya flujo estable antes de encender el supresor, ya que la falta de flujo puede provocar el secado de las membranas internas, causando daños irreversibles.

12. Seleccione el supresor que está utilizando el equipo y enciéndalo. Con ayuda de las flechas, coloque la corriente adecuada.

Nota: verifique que el supresor esté funcionando correctamente. Para ello, observe la presencia de burbujas en la válvula de salida del supresor. Estas burbujas corresponden a la liberación de oxígeno e hidrógeno, un indicador de que el supresor opera adecuadamente.

13. Verifique la conductividad del sistema.

Nota: cuando se utiliza una fase móvil compuesta por carbonato y bicarbonato, se espera que la conductividad se encuentre en un rango aproximado de 18 a 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

14. Espere alrededor de una hora antes de iniciar el análisis, para que el sistema se estabilice.

Nota: la presión y la conductividad deberían alcanzar valores estables y adecuados para el funcionamiento óptimo del equipo.

15. Filtre la muestra de agua con un filtro de 0,45 μm .
16. Agregue la muestra filtrada en un vial hasta la línea marcada.
17. Coloque una tapa de filtro sobre el vial y presione con la herramienta de inserción.
18. Seleccione la pestaña "Data", seleccione la secuencia en donde realizará la corrida de las muestras.
19. Añada una nueva inyección, en la columna "Name" coloque el nombre de la muestra, en la columna "Position" coloque la posición en la que colocará el vial en el automuestreador.
20. Inserte el vial en el automuestreador, en la posición que corresponde.

21. Posterior a la hora de estabilización y la verificación de los parámetros en la pestaña "Instruments", seleccione en la pestaña "Data" el botón "Resume" para iniciar el análisis.
22. Al finalizar el análisis, haga doble clic en el cromatograma de la muestra para visualizar el mismo.
23. Seleccione la pestaña "Peak results" para visualizar los resultados.

5.3. Coliformes fecales

Equipo: Quanti-Tray Sealer PLUS

Procedimiento:

1. Agregue 100 mL de la muestra en un recipiente estéril con tiosulfato de sodio.

Nota: el tiosulfato de sodio neutraliza el cloro contenido en las muestras de agua.

2. Agregue el reactivo Colilert-18 al recipiente con la muestra.
3. Cierre y agite el recipiente hasta disolver completamente el reactivo.
4. Vierta la mezcla en una bandeja Quanti-Tray*/2000.
5. Selle la bandeja con el equipo Quanti-Tray Sealer PLUS.
6. Incube a $44,5 \pm 0,2$ °C durante 18 horas.
7. Cuente el número de pocillos amarillos y coloque el dato en el software generador de NMP para obtener el resultado.

Nota: un pocillo amarillo indica positivo para coliformes fecales.

5.4. Color aparente

Equipo: Colorímetro Orion AQ3700 de Thermo SCIENTIFIC

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.

2. Acceda a la lista de métodos.
3. Presione las teclas [Shift] + [2] [0] [4], luego presione la tecla [-].
4. Llene un vial limpio (24 mm Ø) con 10 mL del agua desionizada y cierre herméticamente con la tapa.
5. Limpie el exterior del vial con un pañuelo sin pelusa para eliminar huellas dactilares o gotas de agua antes de insertar el vial en la cámara de muestra.
6. Coloque el vial en la cámara de muestra asegurándose de que las marcas están alineadas.
7. Presione la tecla CERO.
8. Retire el vial de la cámara de muestra y vacíe completamente.
9. Llene un vial limpio (24 mm Ø) con 10 mL de la muestra de agua y cierre herméticamente con la tapa.
10. Coloque el vial en la cámara de muestra.
11. Presione la tecla [Test].
12. El resultado se muestra en la pantalla en Unidades Pt-Co (mg/l Pt).

5.5. Oxígeno disuelto en campo

Equipo: Medidor de oxígeno disuelto Extech instruments SDL150

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. Retire la tapa protectora del electrodo.

Nota: asegúrese de que en la pantalla se muestre la unidad mg/L. De lo contrario, presione el botón Function durante 1.5 segundos para cambiar el modo de medición.

3. Sumerja el electrodo aproximadamente 10 cm en el cuerpo de agua.
4. Espere a que se establezca la lectura.
5. En la pantalla se mostrará el resultado.

5.6. Oxígeno disuelto en laboratorio

Equipo: Medidor multiparamétrico de mesa ORION VersaStar Pro de Thermo SCIENTIFIC

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. En la pantalla se muestra el Canal 1 Medición de pH. Para cambiar el canal presione el botón Channel hasta que en la pantalla se muestre el Canal 3 Medición de oxígeno disuelto.

Nota: para cambiar de canal y modificar la configuración puede presionar el botón f3, con ayuda de las flechas del teclado seleccione el canal, posteriormente, presione dos veces el botón f2.

3. Si la unidad de medición no está en mg/L, presione el botón Mode.
4. Enjuague el electrodo con agua destilada.
5. Seque cuidadosamente el electrodo con una toalla de papel.
6. Coloque el electrodo en la muestra.
7. Presione el botón Measure.
8. Espere hasta que se establezca la medición.
9. En la pantalla se muestra el valor de oxígeno disuelto medido.

5.7. pH en campo

Equipo: Medidor multiparamétrico HI9811-51 de HANNA instruments

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. Retire la tapa protectora de la sonda.
3. Sumerja la punta de la sonda aproximadamente 4 cm en el cuerpo de agua.
4. Presione la tecla pH para seleccionar el modo de medición de pH.
5. Espere hasta que se establezca la medición.
6. En la pantalla se muestra el valor de pH medido.

5.8. pH en laboratorio

Equipo: Medidor multiparamétrico de mesa ORION VersaStar Pro de Thermo SCIENTIFIC

Procedimiento:

10. Encienda el equipo.
11. En la pantalla se muestra el Canal 1 Medición de pH. Si la pantalla no muestra este canal, presione el botón Channel para cambiar de canal.

Nota: para cambiar de canal y modificar la configuración puede presionar el botón f3, con ayuda de las flechas del teclado seleccione el canal, posteriormente, presione dos veces el botón f2.

12. Enjuague el electrodo con agua destilada.
13. Seque cuidadosamente el electrodo con una toalla de papel. ¡Cuidado! No debe tocar el bulbo de vidrio.
14. Coloque el electrodo en la muestra.
15. Presione el botón Measure.
16. Espere hasta que se establezca la medición.
17. En la pantalla se muestra el valor de pH medido.

5.9. Porcentaje de saturación de oxígeno en campo

Equipo: Medidor de oxígeno disuelto Extech instruments SDL150

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. Retire la tapa protectora del electrodo.

Nota: asegúrese de que en la pantalla se muestre %. De lo contrario, presione el botón Function durante 1.5 segundos para cambiar el modo de medición.

3. Sumerja el electrodo aproximadamente 10 cm en el cuerpo de agua.

4. Espere a que se estabilice la lectura.
5. En la pantalla se mostrará el resultado.

5.9. Porcentaje de saturación de oxígeno en laboratorio

Equipo: Medidor multiparamétrico de mesa ORION VersaStar Pro de Thermo SCIENTIFIC

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. En la pantalla se muestra el Canal 1 Medición de pH. Para cambiar el canal presione el botón Channel hasta que en la pantalla se muestre el Canal 3 Medición de oxígeno disuelto.

Nota: para cambiar de canal y modificar la configuración puede presionar el botón f3, con ayuda de las flechas del teclado seleccione el canal, posteriormente, presione dos veces el botón f2.

3. Si en la pantalla no indica %, presione el botón Mode.
4. Enjuague el electrodo con agua destilada.
5. Seque cuidadosamente el electrodo con una toalla de papel.
6. Coloque el electrodo en la muestra.
7. Presione el botón Measure.
8. Espere hasta que se estabilice la medición.
9. En la pantalla se muestra el valor de porcentaje de saturación de oxígeno medido.

5.10. Sólidos disueltos totales en campo

Equipo: Medidor multiparamétrico HI9811-51 de HANNA instruments

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.

2. Retire la tapa protectora de la sonda.
3. Sumerja la punta de la sonda aproximadamente 4 cm en el cuerpo de agua.
4. Presione la tecla ppm para seleccionar el modo de medición de sólidos disueltos totales.
5. Espere hasta que se estabilice la medición.
6. En la pantalla se muestra el valor de medido.

5.11. Sólidos disueltos totales en laboratorio

Equipo: Medidor multiparamétrico de mesa ORION VersaStar Pro de Thermo SCIENTIFIC

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. En la pantalla se muestra el Canal 1 Medición de pH. Presione el botón Channel para cambiar de canal, hasta que aparezca en la pantalla el Canal 2 Medición de conductividad.

Nota: para cambiar de canal y modificar la configuración puede presionar el botón f3, con ayuda de las flechas del teclado seleccione el canal, posteriormente, presione dos veces el botón f2.

3. Presione el botón Mode hasta que aparezca en la pantalla TDS que indica la medición de sólidos disueltos totales.
4. Enjuague el electrodo con agua destilada.
5. Seque cuidadosamente el electrodo con una toalla de papel.
6. Coloque el electrodo en la muestra.
7. Presione el botón Measure.
8. Espere hasta que se estabilice la medición.
9. En la pantalla se muestra el valor de sólidos disueltos totales medido.

5.12. Temperatura en campo

Equipo: Medidor multiparamétrico HI9811-51 de HANNA instruments

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. Retire la tapa protectora de la sonda.
3. Sumerja la punta de la sonda aproximadamente 4 cm en el cuerpo de agua.
4. Presione la tecla °C para seleccionar el modo de medición de temperatura.
5. Espere hasta que se establezca la medición.
6. En la pantalla se muestra el valor de temperatura medido.

5.13. Temperatura en laboratorio

Equipo: Medidor multiparamétrico de mesa ORION VersaStar Pro de Thermo SCIENTIFIC

Procedimiento:

1. Encienda el equipo.
2. En la pantalla se muestra el Canal 1 Medición de pH. Si la pantalla no muestra este canal, presione el botón Channel para cambiar de canal.

Nota: para cambiar de canal y modificar la configuración puede presionar el botón f3, con ayuda de las flechas del teclado seleccione el canal, posteriormente, presione dos veces el botón f2.

¡Importante! El electrodo de pH Thermo Scientific™ Orion™ ROSS Ultra™ Triode™ cuenta con un sensor de temperatura incorporado.

3. Enjuague el electrodo con agua destilada.
4. Seque cuidadosamente el electrodo con una toalla de papel. ¡Cuidado! No debe tocar el bulbo de vidrio.

5. Coloque el electrodo en la muestra.
6. En la pantalla se muestra el valor de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) medido.

5.14. Turbiedad

Equipo: Turbidímetro portátil 2100Q de HACH

Procedimiento:

1. Encienda el turbidímetro.
2. Llene un vial limpio con la muestra hasta la línea (aproximadamente 15 mL) y cierre herméticamente con la tapa.
3. Limpie el vial con un paño suave, sin pelusas, para eliminar las gotas de agua y huellas dactilares. Asegúrese de que las muestras frías no "empañen" el vial.
4. Invierta el vial suavemente.
5. Introduzca el vial en el equipo, alineando la marca de orientación del vial con el equipo.
6. Cierre la tapa del equipo.
7. Presione la tecla derecha que indica medición.
8. La pantalla muestra la indicación de Estabilizando.
9. El resultado se muestra en la pantalla en UNT.

Anexo 2. Infografía técnica: Toma de muestra de agua, desarrollada como herramienta visual de apoyo para la capacitación y la correcta ejecución del muestreo en campo

Toma de muestra de agua

Materiales



Recipiente



Marcador



Guantes



Alcohol 70%



Hielera

Rotulación



Con ayuda de un marcador permanente rotule correctamente la muestra, colocando los siguientes datos:

- ✓ Nombre de la persona que recolecta la muestra
- ✓ Tipo de muestra
- ✓ Fecha
- ✓ Hora
- ✓ Ubicación

Agua Potable

Análisis microbiológico

Utilice un recipiente estéril de plástico de mínimo 100 mL, este se puede conseguir en las farmacias.



Limpie la boca del grifo con un paño y alcohol al 70% (si el tubo es de metal flamee con un mechero la boca del grifo).

Deje salir el agua por un periodo de 2 a 3 minutos.



Abra el recipiente estéril y tome la muestra de agua, dejando un espacio para la aireación.

Coloque la muestra en una hielera para mantener la muestra en frío $\leq 6^{\circ}\text{C}$ y traslade al laboratorio para su respectivo análisis.

Análisis físicoquímico

Utilice un recipiente limpio de plástico de mínimo 250 mL, puede ser una botella. Para limpiar el recipiente, lave muy bien con agua y jabón para eliminar cualquier residuo.



Limpie la boca del grifo con un paño y alcohol al 70% (si el tubo es de metal flamee con un mechero la boca del grifo).



Deje salir el agua por un periodo de 2 a 3 minutos.

Enjuague el recipiente 3 veces y tome la muestra de agua, dejando un espacio para la aireación.

Coloque la muestra en una hielera para mantener la muestra en frío $\leq 6^{\circ}\text{C}$ y traslade al laboratorio para su respectivo análisis.

Agua Superficial y Residual

Análisis microbiológico

Utilice un recipiente estéril de plástico de mínimo 100 mL, este se puede conseguir en las farmacias.



Abra el recipiente estéril debajo de la superficie y tome la muestra de agua con la boca del recipiente hacia la corriente, deje un espacio para la aireación.



Coloque la muestra en una hielera para mantener la muestra en frío y traslade al laboratorio para su respectivo análisis.

Análisis físicoquímico

Utilice un recipiente limpio de plástico de mínimo 250 mL, puede ser una botella. Para limpiar el recipiente, lave muy bien con agua y jabón para eliminar cualquier residuo.



Enjuague el recipiente 3 veces y tome la muestra de agua debajo de la superficie con la boca del recipiente hacia la corriente, deje un espacio para la aireación.



Coloque la muestra en una hielera para mantener la muestra en frío y traslade al laboratorio para su respectivo análisis.

¡Importante!

Las muestras para análisis microbiológico deben ser tomadas, lunes, martes o miércoles y se deben transportar directamente al laboratorio para ser analizadas, esto porque deben incubarse por 24 horas. Cuando almacena la muestra no se debe romper la cadena de frío porque la muestra se daña.

Fuentes de información:

Protocolos de muestreo del Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos, AyS-AP-01 y AyS-ASR-01