

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Trabajo de Grado

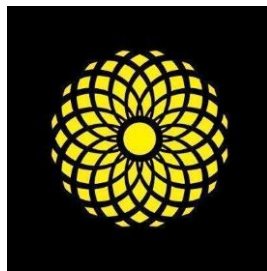
**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA PUNTUAL DEL
AGUA SUPERFICIAL DEL ARROYO CAAÑABÉ, CON
ÉNFASIS EN LA EVALUACIÓN DEL CROMO
HEXAVALENTE (Cr(VI))**

FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NÚÑEZ

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del
título de Grado de Licenciatura en Ciencias Mención “Geología”

SAN LORENZO – PARAGUAY

Julio – 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

Trabajo de Grado

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA PUNTUAL DEL
AGUA SUPERFICIAL DEL ARROYO CAAÑABÉ, CON
ÉNFASIS EN LA EVALUACIÓN DEL CROMO
HEXAVALENTE (Cr(VI))**

FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NÚÑEZ

Orientadora: **MSc. CLARA VIVIANA A. VELÁZQUEZ OLIVETTI**

Profesora: **MSc. SONIA MABEL MOLINAS RUIZ DÍAZ**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del
título de Grado de Licenciatura en Ciencias Mención “Geología”

SAN LORENZO – PARAGUAY

Julio - 2026

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA PUNTUAL DEL AGUA SUPERFICIAL DEL ARROYO CAAÑABÉ, CON ÉNFASIS EN LA EVALUACIÓN DEL CROMO HEXAVALENTE (Cr(VI))

FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NÚÑEZ

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del Grado de Licenciatura en Ciencias Mención “Geología”.

Fecha de aprobación: 17 de julio del 2026

MESA EXAMINADORA DE TESIS

MIEMBROS:

Prof. MSc. Higinio Moreno Resquín

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Sonia Mabel Molinas Ruíz Díaz

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Narciso Cubas Villalba

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

A mi esposa, Clara,

por creer en mí, por impulsarme a seguir adelante y por motivarme a culminar esta etapa tan importante de mi vida.

Este logro también es tuyo.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de este trabajo de investigación y de esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis padres y hermanos, por su amor, sus valores, su esfuerzo y el apoyo constante que me brindaron a lo largo de mi vida, siendo el pilar fundamental para alcanzar esta meta.

Al Prof. Lic. Nicolás Guefos Kapsalis, MAE, Decano de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción, por el respaldo institucional brindado durante mi formación académica.

Al Prof. MSc. Higinio Moreno Resquín, Director de la Carrera de Geología, y a la Prof. MSc. Sonia Mabel Molinas Ruiz Díaz, docente de la asignatura Trabajo de Grado, por sus orientaciones, apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

A mi orientadora, MSc. Clara Viviana Anahí Velázquez Olivetti, por su dedicación, paciencia y compromiso, así como por sus valiosas orientaciones y conocimientos, fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A todos los profesores de la Carrera de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por los conocimientos y experiencias compartidos durante mi formación universitaria.

Al Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción (FACEN–UNA), por el apoyo brindado en la realización de los análisis fisicoquímicos que hicieron posible esta investigación.

Al Geól. Jorge Cantero y al Geól. Federico Arguello, por su colaboración en la elaboración de la cartografía utilizada en este trabajo.

Al Ing. Ambiental Juan Céspedes, Jefe del Departamento de Estudios y Modelos del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), por facilitar información técnica, cartográfica y ambiental de gran importancia para esta investigación.

Al señor Néstor Baruja y a los baqueanos y conocedores de la zona, por su acompañamiento durante las jornadas de muestreo y por compartir generosamente sus conocimientos sobre la ciudad de Carapeguá, el arroyo Caañabé y su entorno, contribuyendo al exitoso desarrollo del trabajo de campo.

A todos ellos, mi más profunda gratitud.

CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA PUNTUAL DEL AGUA SUPERFICIAL DEL ARROYO CAAÑABÉ, CON ÉNFASIS EN LA EVALUACIÓN DEL CROMO HEXAVALENTE (Cr(VI))

Autor: FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NÚÑEZ

Orientadora: MSc. CLARA VIVIANA ANAHÍ VELÁZQUEZ OLIVETTI

Profesora: MSc. SONIA MABEL MOLINAS RUIZ DÍAZ

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo realizar una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé, con énfasis en la evaluación de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), comparando los resultados obtenidos con los criterios establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2. El estudio se desarrolló en un tramo del arroyo Caañabé, departamento de Paraguarí, Paraguay, donde se establecieron cuatro puntos de monitoreo distribuidos a lo largo del cauce principal, considerando criterios de representatividad espacial, accesibilidad y proximidad a actividades potencialmente generadoras de contaminación. La caracterización del área de estudio fue complementada mediante cartografía temática elaborada con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se determinaron el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica, la turbidez y la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) mediante metodologías analíticas estandarizadas. Los resultados evidenciaron valores de pH entre 7,44 y 7,85, conductividad eléctrica entre 91,0 y 117,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y turbidez entre 15,70 y 19,90 UNT, observándose una baja variabilidad espacial entre los puntos evaluados. En todas las muestras analizadas, las concentraciones de Cr(VI) fueron inferiores al límite de reporte del método analítico ($<0,001 \text{ mg/L}$). Asimismo, todos los parámetros determinados se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2. Los resultados permitieron caracterizar las condiciones fisicoquímicas del tramo evaluado del arroyo Caañabé durante la campaña de muestreo y constituyen una primera línea base para futuros programas de monitoreo ambiental y estudios relacionados con la calidad del agua superficial en la cuenca.

Palabras Claves: cromo hexavalente; Cr(VI); calidad del agua; parámetros fisicoquímicos; arroyo Caañabé; aguas superficiales.

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF SURFACE WATER AT SELECTED SAMPLING SITES IN THE CAAÑABÉ STREAM, WITH EMPHASIS ON THE ASSESSMENT OF HEXAVALENT CHROMIUM (Cr(VI))

Author: FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NÚÑEZ

Advisor: MSc. CLARA VIVIANA ANAHÍ VELÁZQUEZ OLIVETTI

Teacher: MSc. SONIA MABEL MOLINAS RUIZ DÍAZ

ABSTRACT

The present study aimed to conduct a point physicochemical characterization of the surface water of the Caañabé Stream, with emphasis on the assessment of hexavalent chromium (Cr(VI)) concentration, by comparing the results with the criteria established in SEAM Resolution No. 222/2002 for Class 2 surface waters. The study was carried out along a selected reach of the Caañabé Stream, Paraguari Department, Paraguay, where four monitoring sites were established along the main channel based on criteria of spatial representativeness, accessibility, and proximity to potential sources of contamination. The characterization of the study area was complemented using thematic cartography developed through Geographic Information Systems (GIS). The parameters determined included pH, electrical conductivity, turbidity, and hexavalent chromium (Cr(VI)) concentration, following standardized analytical methods. The results showed pH values ranging from 7.44 to 7.85, electrical conductivity between 91.0 and 117.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and turbidity between 15.70 and 19.90 NTU, indicating low spatial variability among the monitored sites. In all analyzed samples, Cr(VI) concentrations were below the analytical method reporting limit ($<0.001 \text{ mg/L}$). Furthermore, all measured parameters complied with the limits established by SEAM Resolution No. 222/2002 for Class 2 surface waters. The results allowed the physicochemical characterization of the evaluated reach of the Caañabé Stream during the sampling campaign and provide a first baseline for future environmental monitoring programs and studies related to surface water quality within the basin.

Keywords: hexavalent chromium; Cr(VI); water quality; physicochemical parameters; Caañabé Stream; surface water.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivo.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Hipótesis.....	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Marco conceptual	6
2.1.1 Cromo en el ambiente	6
2.1.2 Cromo hexavalente en sistemas acuáticos	7
2.1.3 Parámetros fisicoquímicos del agua.....	9
2.1.3.1 Potencial de hidrógeno (pH)	10
2.1.3.2 Conductividad eléctrica.....	10
2.1.3.3 Turbidez	11
2.1.4 Calidad del agua superficial	11
2.1.5 Fuentes de cromo en el ambiente	12
2.1.5.1 Contaminación del cromo asociada a las curtiembres	13
2.2 Marco referencial	14
2.2.1 Antecedentes internacionales sobre contaminación por cromo en sistemas fluviales	15
2.2.2 Antecedentes en América Latina	16
2.2.3 Antecedentes nacionales y problemática ambiental del arroyo Caañabé..	17
2.2.4 Características físicas y ambientales del área de estudio	18
2.2.4.1 Localización geográfica	18
2.2.4.2 Cuenca hidrográfica	20

2.2.4.3	Clima	22
2.2.4.4	Evolución de la cobertura y uso del suelo en la cuneca del arroyo Caañabé	23
2.2.4.5	Geología del área de estudio	25
2.2.4.6	Contexto hidrogeológico	28
3.	METODOLOGÍA	33
3.1	Área de estudio.....	33
3.2	Enfoque y diseño de la investigación.....	44
3.3	Diseño metodológico	45
3.4	Parámetros analizados.....	48
3.5	Análisis de laboratorio	49
3.6	Procesamiento y análisis de datos	52
3.7	Elaboración cartográfica y análisis espacial	53
3.8	Criterios para la interpretación de resultados.....	55
3.9	Limitaciones del estudio	57
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1	Resultados	60
4.1.2.1	Resultados	61
4.1.2.2	Discusión.....	63
4.1.3.1	Resultados	64
4.1.3.2	Discusión.....	65
4.1.4.1	Resultados	67
4.1.4.2	Discusión.....	68
4.1.5.1	Resultados	69
4.1.5.2	Discusión.....	70
4.2	Posibles factores asociados a la no detección de cromo hexavalente (Cr(VI))	73
5.	CONCLUSIÓN.....	77
6.	RECOMENDACIONES.....	80
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

8. ANEXOS.....	87
8.1 Anexos A.....	87
8.2 Anexos B.....	91
8.3 Anexos C.....	92

LISTA DE FIGURAS

Página

1. Comparación entre las formas de cromo trivalente Cr(III) y hexavalente Cr(VI) y su comportamiento en sistemas acuáticos.	7
2. Especies predominantes de Cr(VI) en función del pH.	9
3. Principales fuentes de contaminación por cromo y su comportamiento en sistemas fluviales.	13
4. Cuenca hidrográfica del arroyo Caañabé y red de drenaje.	19
5. Cuencas hídricas de la Unidad Hidrográfica Caañabé.	21
6. Áreas inundables y humedales asociados a la cuenca del arroyo Caañabé en el entorno del lago Ypoá.	22
7. Clasificación supervisada de la cobertura y uso del suelo en la cuenca del arroyo Caañabé para el año 2000.	24
8. Clasificación supervisada de la cobertura y uso del suelo en la cuenca del arroyo Caañabé para el año 2025.	25
9. Mapa geológico de la Unidad Hidrográfica Caañabé.	26
10. Mapa hidrogeológico de la Unidad Hidrográfica Caañabé.	28
11. Vista del cauce principal del arroyo Caañabé en el área de estudio.	34
12. Ubicación general del área de estudio correspondiente al arroyo Caañabé.	34
13. Vista aérea del tramo del arroyo Caañabé donde se observan el cauce meandriforme, la vegetación ribereña y los principales usos del suelo del entorno. .	36
14. Distribución espacial de los puntos de muestreo AC1, AC2, AC3 y AC4 en el arroyo Caañabé.	38
15. Localización de curtiembres y otras actividades potencialmente contaminantes en relación con el arroyo Caañabé.	40
16. Recolección de muestras de agua superficial en el arroyo Caañabé durante la campaña de muestreo realizada en mayo de 2026.	41
17. Descarga puntual de efluente observada durante la campaña de muestreo en un sector próximo al área de estudio del arroyo Caañabé.	42

18. Muestras de agua superficial recolectadas y etiquetadas correspondientes a los puntos AC1, AC2, AC3 y AC4.....	43
19. Variación espacial de los valores de pH en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.....	62
20. Variación espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.....	65
21. Variación espacial de la turbidez en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.	68
22. Concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.....	70

LISTA DE TABLAS

Página

1. Coordenadas de los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.	38
2. Distancia aproximada entre los establecimientos de curtiembre identificados y el tramo del arroyo Caañabé considerado en el presente estudio.	40
3. Parámetros analizados durante la investigación.....	50
4. Fuentes cartográficas utilizadas durante la investigación	54
5. Resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos y concentración de cromo hexavalente Cr(VI).....	60
6. Estadísticos descriptivos.	61

LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo 1-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC1 del arroyo Caañabé.	87
Anexo 2-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC2 del arroyo Caañabé.	88
Anexo 3-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC3 del arroyo Caañabé.	89
Anexo 4-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC4 del arroyo Caañabé.	90
Anexo 5-B. Vista general del arroyo Caañabé en uno de los sectores de muestreo, donde se observan las características geomorfológicas del cauce y la cobertura vegetal ribereña asociada.	91
Anexo 6-B. Sector de la ribera del arroyo Caañabé utilizado durante el reconocimiento de campo y la selección de los puntos de muestreo. Se observan las condiciones de acceso al cauce, la vegetación ribereña y las características ambientales presentes en el área de estudio.	92

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

Abreviatura o sigla	Significado
APHA	<i>American Public Health Association</i>
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
Cr(III)	Cromo trivalente
Cr(VI)	Cromo hexavalente
FACEN	Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
MADES	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible
pH	Potencial de hidrógeno
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
SEAM	Secretaría del Ambiente
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SM	<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>
UNA	Universidad Nacional de Asunción
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WEF	<i>Water Environment Federation</i>
WGS 84	<i>World Geodetic System 1984</i>

LISTA DE SIMBOLOS Y UNIDADES

Símbolo o unidad	Significado
%	Porcentaje
<	Menor que
°C	Grado Celsius
Cm	Centímetro
G	Gramo
Kg	Kilogramo
L	Litro
M	Metro
mg/L	Miligramos por litro
µS/cm	Microsiemens por centímetro
UTN	Unidad de Turbidez Nefelométrica
‰	Por mil

1. INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso esencial para el desarrollo de los ecosistemas y las actividades humanas; sin embargo, su calidad se ve cada vez más comprometida por la presencia de contaminantes, entre los cuales los metales pesados representan una de las principales preocupaciones ambientales debido a su persistencia, toxicidad y potencial impacto sobre los ecosistemas y la salud humana. En este contexto, el cromo es un elemento de especial interés, ya que su comportamiento en el ambiente depende de su estado de oxidación, predominando las especies trivalente Cr(III) y hexavalente Cr(VI), esta última considerada la de mayor importancia ambiental por su elevada toxicidad y movilidad (Richard y Bourg, 1991).

En América Latina, diversos estudios han documentado la presencia de cromo en cuerpos de agua sometidos a presión antrópica, particularmente en cuencas influenciadas por actividades industriales, donde se han registrado concentraciones elevadas de este metal y efectos adversos sobre la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos (Ceballos *et al.*, 2021). Estos antecedentes evidencian la importancia de incorporar la determinación de cromo hexavalente Cr(VI) en los programas de monitoreo de cuerpos de agua potencialmente expuestos a fuentes de contaminación.

En Paraguay, diversas investigaciones han documentado procesos de deterioro ambiental en cursos de agua asociados al crecimiento urbano, las actividades industriales y las limitaciones en infraestructura de saneamiento (López Arias *et al.*, 2021). En particular, el arroyo Caañabé constituye un sistema fluvial de importancia ambiental por formar parte del sistema de humedales del lago Ypoá y atravesar sectores donde se desarrollan actividades potencialmente contaminantes, como curtiembres, mataderos, alcoholeras y otras industrias. Asimismo, se han reportado episodios de contaminación, mortandad de peces y afectación de los ecosistemas

asociados, evidenciando la necesidad de fortalecer el conocimiento sobre la calidad de sus aguas (Insfrán Ortiz *et al.*, 2025).

A pesar de estos antecedentes, hasta la fecha no se dispone de investigaciones publicadas que evalúen específicamente la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del arroyo Caañabé, situación que limita la disponibilidad de información científica sobre este contaminante y dificulta la generación de una línea base para futuras evaluaciones y programas de monitoreo ambiental en la cuenca.

En este contexto, la presente investigación tuvo como finalidad realizar una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé, con énfasis en la evaluación de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), mediante la determinación del pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, comparando los resultados obtenidos con los criterios establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2. Los resultados obtenidos constituyen una primera línea base para el monitoreo de este contaminante en el tramo evaluado del arroyo Caañabé y aportan información científica que podrá servir de referencia para futuras investigaciones y para la gestión ambiental de la cuenca.

1.1 Planteamiento del Problema

El arroyo Caañabé, cuya cuenca abarca sectores de los departamentos de Paraguarí y Central, constituye un sistema fluvial de relevancia en la región central del Paraguay. A lo largo de su recorrido atraviesa zonas con intensa actividad antrópica, incluyendo áreas urbanas e industriales, particularmente en el entorno de Carapeguá, donde se concentran curtiembres, mataderos y otros establecimientos potencialmente generadores de contaminantes.

Diversos estudios y reportes ambientales han documentado el deterioro de la calidad del agua en este sistema, evidenciado por episodios de contaminación, mortandad de peces y alteraciones en los ecosistemas acuáticos (López *et al.*, 2016; Insfrán *et al.*, 2025). Estas investigaciones indican que dichos procesos están relacionados principalmente con descargas de origen industrial, agropecuario y

doméstico, además de las limitaciones en la infraestructura de saneamiento dentro de la cuenca.

En Paraguay, aunque se han desarrollado investigaciones sobre la calidad del agua y la presencia de metales pesados en cuerpos de agua superficiales, la mayoría de los estudios se ha centrado en la determinación de concentraciones totales de metales o en parámetros fisicoquímicos convencionales, existiendo escasa información sobre la presencia específica de cromo hexavalente Cr(VI) en sistemas fluviales (Salinas *et al.*, 2021). Aunque existen antecedentes que evidencian el deterioro ambiental del arroyo Caañabé, hasta la fecha no se dispone de información puntual sobre la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del sistema. Esta ausencia de información limita una evaluación preliminar del riesgo asociado a las actividades potencialmente generadoras de cromo presentes en la cuenca y restringe la disponibilidad de una línea base científica que sirva de apoyo para futuras investigaciones y programas de monitoreo ambiental.

Considerando el alcance de la presente investigación, basada en una campaña puntual de muestreo y en la determinación del pH, la conductividad eléctrica, la turbidez y la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el problema de investigación se orienta a la necesidad de realizar una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé, generando información científica básica sobre la presencia de Cr(VI) y las condiciones fisicoquímicas observadas durante el período de estudio.

En este contexto, surgen las siguientes interrogantes de investigación: ¿Cuál es la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del arroyo Caañabé durante el período de estudio?, ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua superficial en los puntos de monitoreo seleccionados?, ¿Cómo se distribuyen espacialmente el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez en el tramo evaluado del arroyo?, ¿Qué información preliminar aportan estos resultados sobre la calidad del agua superficial del arroyo Caañabé?

1.2 Justificación

La presente investigación se justifica por la importancia ambiental del cromo hexavalente Cr(VI), considerado una de las formas de mayor interés debido a su elevada toxicidad y movilidad en sistemas acuáticos (Richard y Bourg, 1991). Su determinación, junto con parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, proporciona información útil para realizar una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial y fortalecer el conocimiento sobre la calidad de este recurso.

Asimismo, la investigación adquiere relevancia debido a las características ambientales del arroyo Caañabé, cuya cuenca se encuentra sometida a diferentes usos del suelo y actividades productivas potencialmente generadoras de contaminantes, entre ellas curtiembres, mataderos, alcoholeras y otras industrias. Aunque diversos estudios han documentado problemas de calidad del agua y episodios de afectación ambiental en este sistema, aún no se dispone de información específica sobre la presencia de cromo hexavalente Cr(VI) en sus aguas superficiales (López *et al.*, 2016; Insfrán *et al.*, 2025).

En Paraguay, los estudios disponibles se han enfocado principalmente en la determinación de concentraciones totales de metales o en la evaluación de parámetros fisicoquímicos convencionales, existiendo escasa información sobre la presencia específica de Cr(VI) en aguas superficiales (Salinas *et al.*, 2021; López Arias *et al.*, 2021). Esta situación evidencia la necesidad de generar información científica que contribuya al conocimiento de este contaminante en cuerpos de agua superficiales del país.

Finalmente, los resultados obtenidos constituirán una referencia sobre las condiciones fisicoquímicas del agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé durante el período de estudio, aportando una primera línea base para futuras investigaciones y programas de monitoreo ambiental, así como información de apoyo para la gestión y conservación de los recursos hídricos de la cuenca.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar las condiciones fisicoquímicas puntuales del agua superficial del arroyo Caañabé mediante la determinación de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, comparando los resultados obtenidos con los criterios establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del arroyo Caañabé en los puntos de muestreo establecidos.

Caracterizar la variación espacial del pH, la conductividad eléctrica y la turbidez en los puntos de monitoreo seleccionados.

Comparar los resultados obtenidos con los criterios establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2.

Interpretar las condiciones fisicoquímicas puntuales del agua superficial del arroyo Caañabé en función de los resultados obtenidos y del marco normativo vigente.

1.4 Hipótesis

La concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del arroyo Caañabé presenta un comportamiento espacial en función de la proximidad a actividades potencialmente generadoras de contaminación y de las condiciones fisicoquímicas registradas durante la campaña de muestreo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Cromo en el ambiente

El cromo (Cr) es un elemento traza que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre y cuya presencia en el ambiente está asociada principalmente a minerales presentes en rocas ígneas y metamórficas, especialmente aquellas de composición máfica y ultramáfica. Su comportamiento geoquímico depende del estado de oxidación en el que se encuentre, siendo las especies trivalente Cr(III) y hexavalente Cr(VI) las formas más estables y ambientalmente relevantes (Richard y Bourg, 1991).

En sistemas naturales, ambas especies presentan propiedades fisicoquímicas contrastantes. El Cr(III) posee baja solubilidad en agua y una elevada afinidad por minerales arcillosos, óxidos de hierro y materia orgánica, lo que favorece su retención en los sedimentos y limita su movilidad. En contraste, el Cr(VI) presenta mayor solubilidad y permanece predominantemente disuelto en la fase acuosa, facilitando su transporte en sistemas superficiales y subterráneos. Además, esta especie es considerada la de mayor importancia ambiental debido a su elevada movilidad, biodisponibilidad y toxicidad (Alloway, 2013).

La distribución del cromo en el ambiente responde tanto a procesos naturales como a actividades antrópicas. Las fuentes naturales están relacionadas con la meteorización de minerales portadores de cromo, mientras que las fuentes antrópicas incluyen principalmente actividades industriales, entre ellas las curtiembres, la galvanoplastia, la industria metalúrgica y la fabricación de pigmentos, que pueden

incorporar este elemento a los cuerpos de agua mediante la descarga de efluentes (Richard y Bourg, 1991).

Las diferencias entre las especies Cr(III) y Cr(VI), como se observa en la Figura 1, determinan su comportamiento ambiental y explican la necesidad de evaluar específicamente la presencia de cromo hexavalente en estudios de calidad del agua. Mientras el Cr(III) presenta una menor capacidad de transporte y tiende a permanecer asociado a la fase sólida, el Cr(VI) puede desplazarse con mayor facilidad en el medio acuático, incrementando su potencial impacto sobre los ecosistemas y la salud humana (Alloway, 2013).

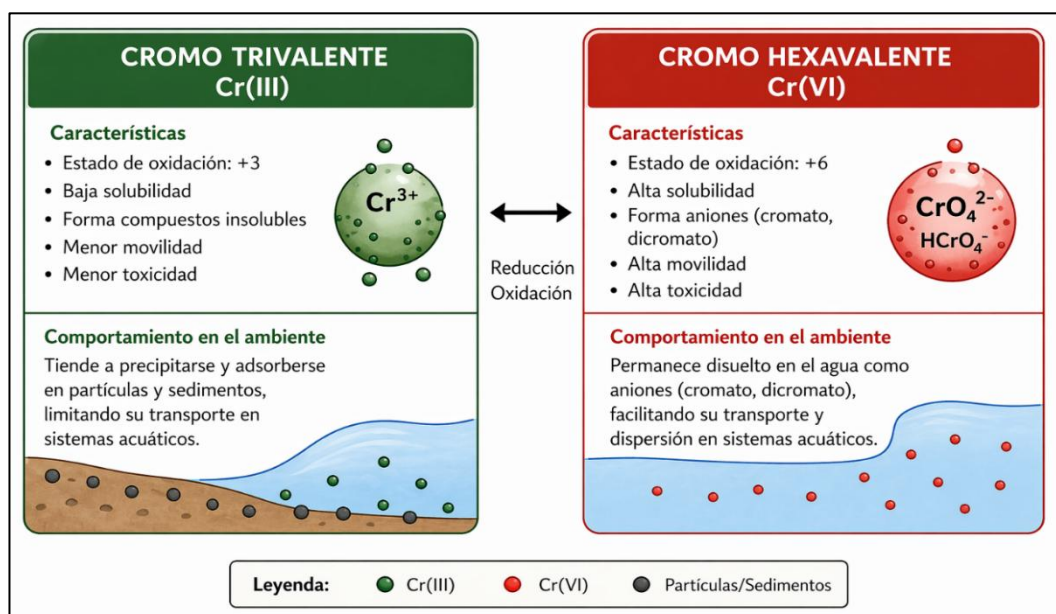


Figura 1. Comparación entre las formas de cromo trivalente Cr(III) y hexavalente Cr(VI) y su comportamiento en sistemas acuáticos.

Fuente: Adaptado de Alloway (2013) y Saha & Orvig (2010).

2.1.2 Cromo hexavalente en sistemas acuáticos

El cromo hexavalente Cr(VI) constituye una de las especies químicas de mayor interés ambiental debido a su elevada movilidad, solubilidad y toxicidad en sistemas acuáticos. A diferencia del cromo trivalente Cr(III), que presenta una marcada tendencia a formar compuestos poco solubles y a asociarse con sedimentos y materia orgánica, el Cr(VI) permanece predominantemente en solución, favoreciendo su transporte dentro de los cuerpos de agua (Richard y Bourg, 1991).

Mientras el Cr(III) presenta baja movilidad y elevada afinidad por la fase sólida, el Cr(VI) se caracteriza por su mayor estabilidad en solución, condición que facilita su dispersión y aumenta su relevancia ambiental. La presencia de Cr(VI) en aguas superficiales puede estar asociada tanto a procesos naturales como a actividades antrópicas. Las fuentes naturales están relacionadas con la alteración de minerales que contienen cromo; sin embargo, diversos estudios indican que las concentraciones elevadas observadas en sistemas acuáticos se encuentran principalmente vinculadas a descargas provenientes de actividades industriales, tales como curtiembres, procesos metalúrgicos, galvanoplastia, fabricación de pigmentos y preservación de madera (Alloway, 2013).

Diversas investigaciones desarrolladas en sistemas fluviales han demostrado que la presencia de Cr(VI) suele incrementarse en áreas sometidas a presión antrópica, particularmente en cuencas donde existen actividades industriales. En estos ambientes, la incorporación continua de efluentes puede favorecer la acumulación de este contaminante y afectar la calidad del agua y de los ecosistemas asociados (Ceballos *et al.*, 2021).

Desde el punto de vista químico, el comportamiento del Cr(VI) depende de las condiciones del medio acuático, especialmente del pH y del potencial de oxidación-reducción. Estas variables controlan la especie química predominante y, en consecuencia, influyen en su movilidad, estabilidad y disponibilidad en el ambiente (Richard y Bourg, 1991).

Los mismos autores mencionan que la influencia del pH sobre la especiación del Cr(VI), como se observa en la Figura 2. En condiciones ácidas predomina principalmente el ion hidrogenocromato (HCrO_4^-), mientras que en medios neutros y ligeramente alcalinos la especie predominante corresponde al ion cromato (CrO_4^{2-}), caracterizado por una mayor estabilidad y movilidad en solución acuosa.

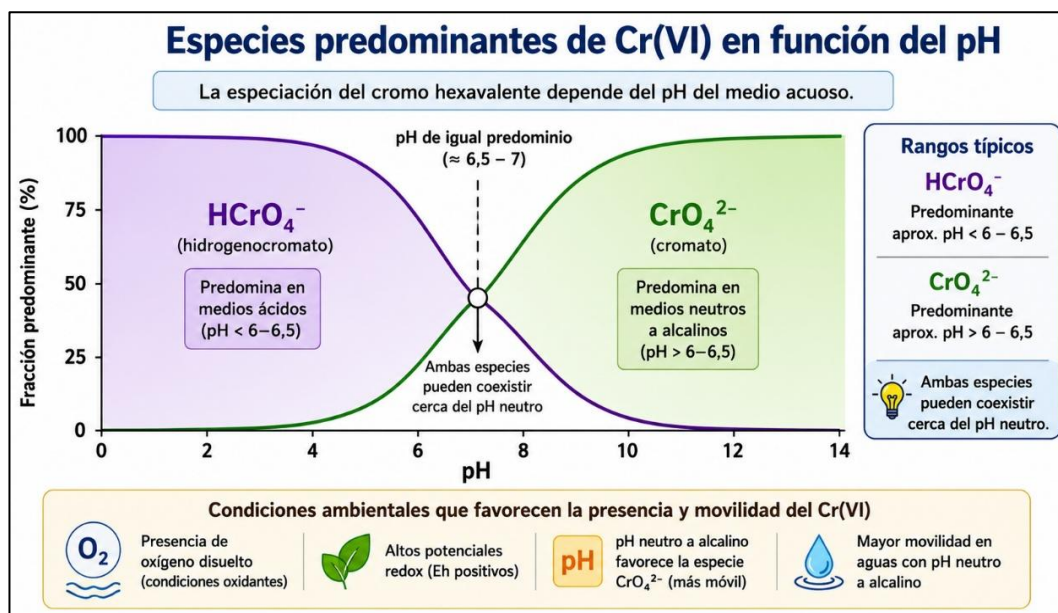


Figura 2. Especies predominantes de Cr(VI) en función del pH.

Fuente: Modificado de Richard y Bourg (1991), McNeill *et al.*, (2012) y USGS Water-Quality Assessments.

Debido a estas características, la determinación de Cr(VI) constituye una herramienta importante para la evaluación de la calidad del agua superficial, permitiendo identificar la presencia de uno de los contaminantes metálicos de mayor relevancia ambiental y establecer información de base para futuros programas de monitoreo y gestión de los recursos hídricos.

2.1.3 Parámetros fisicoquímicos del agua

Los parámetros fisicoquímicos constituyen herramientas fundamentales para la evaluación de la calidad del agua, ya que permiten caracterizar las condiciones del medio acuático e identificar posibles alteraciones asociadas a procesos naturales o a actividades antrópicas. Su determinación proporciona información sobre las características químicas y físicas del agua, contribuyendo a la interpretación de su estado ambiental y de los procesos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica (Hem, 1985; Chapman, 1996).

En estudios de calidad del agua, el análisis conjunto de diferentes parámetros permite obtener una visión integral del sistema, debido a que cada uno aporta información sobre aspectos específicos relacionados con la composición química, el

contenido de sólidos disueltos y suspendidos, así como con las condiciones ambientales presentes durante el periodo de evaluación (Appelo y Postma, 2005).

2.1.3.1 Potencial de hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno (pH) expresa la actividad de los iones hidrógeno (H^+) presentes en una solución y constituye uno de los principales indicadores del equilibrio químico de las aguas naturales (Hem, 1985). Su determinación permite establecer si el agua presenta condiciones ácidas, neutras o alcalinas, información fundamental para la evaluación de la calidad del recurso hídrico.

De acuerdo con Appelo y Postma (2005), el pH influye en numerosos procesos químicos que ocurren en el medio acuático, entre ellos la disolución y precipitación de minerales, la disponibilidad de nutrientes y el comportamiento de diversos elementos traza. En el caso del cromo, este parámetro participa en la distribución de sus especies químicas, favoreciendo el predominio de diferentes formas de Cr(VI) según las condiciones del medio (Richard y Bourg, 1991).

2.1.3.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica representa la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica como consecuencia de la presencia de especies iónicas disueltas. Este parámetro constituye un indicador indirecto del contenido total de sales disueltas y del grado de mineralización del agua (Hem, 1985).

Según Appelo y Postma (2005), la conductividad eléctrica puede variar como resultado de la interacción entre el agua y los materiales geológicos de la cuenca, así como por la incorporación de sustancias provenientes de procesos naturales o de actividades antrópicas. Por ello, es ampliamente utilizada para detectar cambios en la composición química del agua y evaluar posibles alteraciones de su calidad.

Aunque este parámetro no permite identificar los compuestos responsables del incremento de la mineralización, su análisis conjunto con otros indicadores

fisicoquímicos proporciona información relevante para la caracterización de las aguas superficiales (Chapman, 1996).

2.1.3.3 Turbidez

La turbidez corresponde a la propiedad óptica del agua originada por la presencia de partículas suspendidas que dispersan la luz incidente. Entre estas partículas se incluyen minerales finos, materia orgánica, microorganismos y otros materiales transportados por el flujo de agua según la *American Public Health Association (APHA)*, la *American Water Works Association (AWWA)* y la *Water Environment Federation (WEF)* (2017)

Los valores de turbidez reflejan las condiciones físicas del agua y permiten evaluar la presencia de sólidos en suspensión, los cuales pueden aumentar como consecuencia de procesos de erosión, escorrentía superficial, resuspensión de sedimentos o descargas de origen antrópico (Chapman, 1996).

2.1.4 Calidad del agua superficial

La calidad del agua superficial se define como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan su estado ambiental y su aptitud para satisfacer diferentes usos, tales como el abastecimiento, la recreación, la preservación de los ecosistemas y otras actividades humanas (Chapman, 1996). Estas características son el resultado de la interacción entre procesos naturales y las actividades desarrolladas dentro de la cuenca hidrográfica.

La composición de las aguas superficiales está influenciada por factores geológicos, climáticos e hidrológicos, así como por el uso del suelo y las actividades antrópicas presentes en el área de drenaje. De acuerdo con Hem (1985), la interacción entre el agua, las rocas, los suelos y la atmósfera determina la composición química natural de los cuerpos de agua; sin embargo, esta puede modificarse por la incorporación de contaminantes provenientes de fuentes puntuales o difusas. La evaluación de la calidad del agua se basa en la determinación de parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos que permiten caracterizar el estado del

sistema acuático e identificar posibles alteraciones ambientales. Entre los indicadores fisicoquímicos más utilizados se encuentran el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, debido a que proporcionan información sobre las condiciones del medio y constituyen herramientas ampliamente empleadas en programas de monitoreo ambiental (Chapman, 1996).

Además de estos parámetros, la determinación de elementos traza constituye un componente importante en la evaluación de la calidad del agua, especialmente en cuencas donde existen actividades potencialmente generadoras de contaminación. En este sentido, la determinación de cromo hexavalente Cr(VI) complementa la caracterización fisicoquímica del sistema, permitiendo evaluar la presencia de uno de los metales de mayor interés ambiental debido a su elevada movilidad y toxicidad (Richard y Bourg, 1991).

2.1.5 Fuentes de cromo en el ambiente

El cromo presente en los sistemas acuáticos puede tener origen natural o antrópico. Las fuentes naturales están asociadas principalmente a la meteorización de minerales portadores de cromo presentes en determinadas unidades geológicas, mientras que las fuentes antrópicas corresponden a actividades industriales, mineras, agrícolas y urbanas capaces de incorporar este elemento al ambiente (Alloway, 2013).

Como se observa en la Figura 3, el cromo puede ingresar a los sistemas fluviales mediante diferentes mecanismos, entre ellos la escorrentía superficial, la lixiviación, el transporte de sedimentos y las descargas directas o indirectas de efluentes. Una vez incorporado al sistema, su comportamiento dependerá de las

condiciones fisicoquímicas del medio y de la interacción con los materiales presentes.



Figura 3. Principales fuentes de contaminación por cromo y su comportamiento en sistemas fluviales.

Fuente: Adaptado de Förstner y Wittmann (1981) y Sreeram y Ramasami (2003).

Entre las fuentes antrópicas, las curtiembres constituyen una de las principales actividades potencialmente generadoras de contaminación por cromo, debido al empleo de sales de este elemento durante el proceso de curtido de pieles. Cuando los efluentes industriales no reciben un tratamiento adecuado, el cromo puede incorporarse a los cuerpos de agua superficiales, afectando su calidad y representando un riesgo para los ecosistemas acuáticos (Sreeram y Ramasami, 2003).

Otras actividades industriales, como la galvanoplastia, la fabricación de pigmentos, la industria metalúrgica y algunos procesos químicos, también pueden contribuir a la incorporación de compuestos de cromo al ambiente. No obstante, la magnitud de su impacto depende de factores como el tipo de actividad, el manejo de los efluentes y las condiciones ambientales de la cuenca receptora (Alloway, 2013).

2.1.5.1 Contaminación del cromo asociada a las curtiembres

La industria del curtido de cuero constituye una de las actividades industriales históricamente más asociadas a la contaminación por cromo en el ambiente. El proceso de curtido tiene como finalidad transformar las pieles animales en un material

resistente a la degradación biológica y apto para diversos usos industriales. El método más utilizado a nivel mundial corresponde al curtido al cromo, debido a su eficiencia, rapidez y capacidad para producir cueros con características físicas favorables (Sreeram y Ramasami, 2003).

El curtido al cromo emplea principalmente sales de cromo trivalente Cr(III), especialmente sulfato básico de cromo, que interactúa con las fibras de colágeno presentes en las pieles. Sin embargo, una fracción importante del cromo utilizado no es retenida durante el proceso y permanece en las soluciones residuales generadas en las distintas etapas de producción. Sreeram y Ramasami (2003) indican que entre el 30 % y el 40 % del cromo empleado puede perderse en los efluentes industriales, constituyendo una fuente potencial de contaminación cuando estos no reciben un tratamiento adecuado.

Los efluentes provenientes de curtiembres presentan una composición compleja, caracterizada por la presencia simultánea de materia orgánica, sólidos suspendidos, grasas, sulfuros, sales, compuestos nitrogenados y metales. Entre estos contaminantes, el cromo adquiere especial relevancia debido a su persistencia y a la posibilidad de experimentar transformaciones químicas que modifican su comportamiento ambiental. Aunque inicialmente predomina el Cr(III), determinados procesos fisicoquímicos pueden favorecer su oxidación hacia Cr(VI), especie considerablemente más móvil y tóxica (Richard y Bourg, 1991).

2.2 Marco referencial

El marco referencial reúne los antecedentes científicos y la información específica relacionada con el área de estudio, permitiendo contextualizar la presente investigación dentro del conocimiento existente sobre la contaminación por cromo en sistemas fluviales. Asimismo, incorpora la descripción de las principales características físicas, geológicas, hidrogeológicas y ambientales de la cuenca del arroyo Caañabé, proporcionando el contexto necesario para la interpretación de los resultados obtenidos.

En este sentido, se presentan investigaciones desarrolladas a nivel internacional, regional y nacional sobre la presencia de cromo en cuerpos de agua superficiales, con énfasis en sistemas sometidos a influencia antrópica. Posteriormente, se describen las características geográficas, climáticas, geológicas, hidrogeológicas y de uso del suelo del área de estudio, aspectos fundamentales para comprender los procesos que influyen sobre la calidad del agua del arroyo Caañabé.

2.2.1 Antecedentes internacionales sobre contaminación por cromo en sistemas fluviales

El estudio de la contaminación por cromo en sistemas fluviales ha adquirido creciente relevancia debido al incremento de las actividades industriales y a la necesidad de evaluar su impacto sobre la calidad del agua. Diversas investigaciones desarrolladas en diferentes regiones del mundo han demostrado que la presencia de cromo en cuerpos de agua está asociada tanto a las características fisicoquímicas del medio como a las actividades antrópicas presentes en las cuencas hidrográficas (Richard y Bourg, 1991).

Los primeros estudios realizados en Europa y Estados Unidos destacaron la importancia de evaluar la presencia de metales pesados en sistemas acuáticos y aportaron las bases para comprender su comportamiento en el ambiente (Förstner y Wittmann, 1981; Drever, 1997; Appelo y Postma, 2005). Estos antecedentes contribuyeron al desarrollo de metodologías de monitoreo y al fortalecimiento de la evaluación de la calidad del agua en cuencas sometidas a presión antrópica.

Desde el punto de vista de la salud ambiental, la World Health Organization (WHO, 2022) reconoce que el cromo hexavalente Cr(VI) constituye una de las formas más tóxicas de este elemento debido a su elevada movilidad y biodisponibilidad. Asimismo, señala que la exposición prolongada a concentraciones elevadas puede ocasionar efectos adversos sobre los organismos acuáticos y la salud humana, recomendando mantener programas permanentes de monitoreo y control de este contaminante en cuerpos de agua superficiales.

Los antecedentes internacionales evidencian la importancia de incorporar la determinación de cromo hexavalente Cr(VI) en los programas de evaluación de la calidad del agua, especialmente en cuencas donde existen actividades potencialmente generadoras de este contaminante.

2.2.2 Antecedentes en América Latina

En América Latina, la contaminación de cuerpos de agua por metales pesados ha sido ampliamente investigada debido al crecimiento de las actividades industriales, urbanas y mineras. Entre los elementos de mayor interés ambiental se encuentra el cromo, particularmente en su forma hexavalente Cr(VI), debido a su elevada movilidad y toxicidad. Diversas investigaciones desarrolladas en la región han evidenciado que los sistemas fluviales receptores de descargas industriales presentan concentraciones variables de este contaminante, asociadas principalmente a actividades de curtido de cuero, galvanoplastia, metalurgia y manufactura química.

En Perú, Otiniano *et al.*, (2019) evaluaron la presencia de cromo hexavalente Cr(VI) en aguas residuales provenientes de curtiembres, identificando concentraciones superiores a los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental. Los autores concluyeron que el monitoreo permanente y la implementación de tecnologías de tratamiento más eficientes son fundamentales para reducir el impacto ambiental generado por esta actividad.

De manera similar, Silva y Salinas (2022) reportaron en Ecuador concentraciones elevadas de Cr(VI) en efluentes de curtiembres, destacando que las descargas industriales representan una fuente importante de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y resaltando la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo ambiental.

En Argentina, Ceballos *et al.*, (2021) evaluaron la presencia de cromo y otros contaminantes en la cuenca Matanza–Riachuelo, identificando concentraciones elevadas asociadas a actividades industriales históricas. Los autores concluyeron que

el monitoreo continuo constituye una herramienta fundamental para la gestión ambiental y la protección de los recursos hídricos.

2.2.3 Antecedentes nacionales y problemática ambiental del arroyo Caañabé

En Paraguay, las investigaciones relacionadas con la calidad del agua superficial han experimentado un crecimiento progresivo durante las últimas décadas, especialmente en cuencas sometidas a procesos de urbanización, expansión agrícola e industrialización. Sin embargo, los estudios específicos sobre la presencia y el comportamiento del cromo hexavalente Cr(VI) en sistemas fluviales continúan siendo escasos, constituyendo un importante vacío dentro del conocimiento científico nacional.

La mayoría de las investigaciones desarrolladas en el país se han orientado a la evaluación de parámetros fisicoquímicos convencionales, contaminación microbiológica y presencia de metales pesados en cuerpos de agua, principalmente en el Departamento Central y áreas metropolitanas. López Arias *et al.*, (2021) evaluaron la calidad del agua del arroyo Guazú mediante indicadores biológicos, parámetros fisicoquímicos y ensayos ecotoxicológicos, concluyendo que diversos cursos de agua paraguayos presentan evidencias de deterioro ambiental asociadas al crecimiento urbano, las descargas de efluentes y la insuficiencia de infraestructura de saneamiento. Los autores destacaron la importancia de integrar diferentes indicadores para comprender el estado ambiental de los sistemas acuáticos.

De manera complementaria, Salinas *et al.*, (2021) investigaron la presencia de metales pesados en sedimentos de fondo y en la columna de agua del arroyo San Lorenzo, identificando que las actividades industriales, la escorrentía urbana y la disposición inadecuada de residuos constituyen importantes fuentes de contaminación. El estudio puso de manifiesto la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo ambiental e incorporar investigaciones orientadas a comprender la dinámica de los contaminantes en cuencas hidrográficas paraguayas.

En el caso específico del arroyo Caañabé, diversos antecedentes evidencian que este sistema fluvial ha experimentado un deterioro progresivo de su calidad

ambiental como consecuencia de las actividades desarrolladas dentro de su cuenca. López Arias *et al.*, (2016) documentaron episodios de mortandad de peces y alteraciones en la calidad del agua asociados a posibles descargas contaminantes provenientes de actividades industriales y agropecuarias, resaltando la necesidad de implementar programas permanentes de monitoreo y control ambiental.

Asimismo, el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES, 2020) informó que, durante procedimientos de fiscalización realizados en establecimientos industriales localizados en la cuenca del arroyo Caañabé, se detectaron irregularidades relacionadas con el manejo de efluentes y residuos líquidos. Estos antecedentes evidencian que el sistema se encuentra sometido a una presión ambiental constante y ponen de manifiesto la necesidad de fortalecer las acciones de vigilancia y gestión de los recursos hídricos.

Entre las actividades industriales presentes en la cuenca destacan las curtiembres, ampliamente reconocidas como potenciales fuentes de contaminación por compuestos de cromo. De acuerdo con Sreeram y Ramasami (2003), el proceso de curtido emplea sales de cromo que, cuando los efluentes no reciben un tratamiento adecuado, pueden incorporarse a los cuerpos de agua superficiales y generar procesos de contaminación de larga duración.

A pesar de estos antecedentes, hasta la fecha no se dispone de investigaciones publicadas que evalúen específicamente la presencia de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del arroyo Caañabé. Esta situación limita el conocimiento sobre el estado actual del sistema y dificulta la generación de información científica que sirva de base para futuros programas de monitoreo y gestión ambiental.

2.2.4 Características físicas y ambientales del área de estudio

2.2.4.1 Localización geográfica

El arroyo Caañabé se localiza en la Región Oriental del Paraguay y constituye el curso principal de la Unidad Hidrográfica Caañabé, perteneciente a la vertiente del río Paraguay. La cuenca posee una superficie aproximada de 1.978 km² y se desarrolla principalmente en los departamentos de Paraguari y Central, donde confluyen áreas

con diferentes características geomorfológicas, hidrológicas y de uso del suelo que influyen directamente en la dinámica ambiental del sistema fluvial (MADES, 2021).

La Figura 4 muestra la cuenca hidrográfica del arroyo Caañabé y su red de drenaje, caracterizada por un patrón predominantemente dendrítico, con numerosos tributarios de primer y segundo orden que convergen progresivamente hacia el cauce principal. Este tipo de organización del drenaje es característico de cuencas desarrolladas sobre materiales relativamente homogéneos y con escaso control estructural, favoreciendo la concentración gradual del escurrimiento superficial y el transporte de agua, sedimentos y sustancias disueltas a lo largo del sistema fluvial (Strahler, 1957; Chorley *et al.*, 1984).

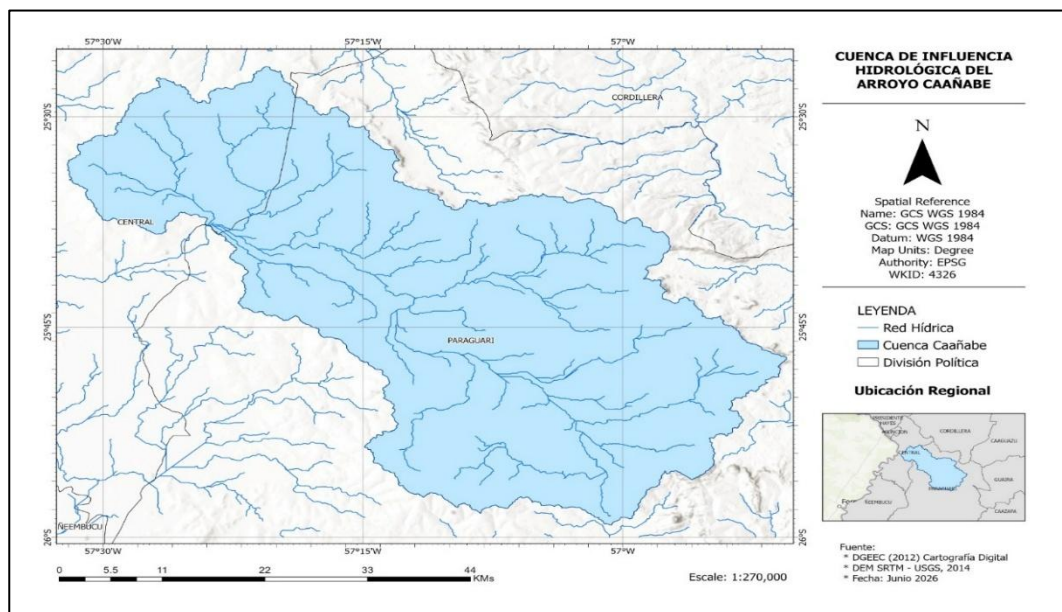


Figura 4. Cuenca hidrográfica del arroyo Caañabé y red de drenaje.

Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación (SRTM-USGS, 2014) y cartografía base de la Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos (DGEEC, 2012).

El curso principal del arroyo presenta una dirección general de escurrimiento de sureste a noroeste, iniciando su recorrido en las zonas altas asociadas a la cordillera de Ybycuí y desembocando en el sistema de humedales del lago Ypoá. Durante su recorrido recibe aportes de numerosos tributarios que incrementan progresivamente el caudal y favorecen la conectividad hidrológica entre los diferentes sectores de la cuenca (MADES, 2021).

Desde el punto de vista geomorfológico, la cuenca presenta un gradiente topográfico bien definido, donde las áreas de cabecera corresponden a sectores de mayor pendiente y energía del relieve, mientras que la cuenca media y baja se desarrolla sobre extensas planicies de escasa pendiente. Estas diferencias topográficas condicionan la velocidad del flujo, la capacidad de transporte de sedimentos y la distribución espacial de los procesos de erosión, sedimentación e inundación, aspectos que influyen directamente sobre el funcionamiento hidrológico e hidrogeoquímico del sistema (Knighton, 1998).

Las características naturales de la cuenca, conjuntamente con las actividades desarrolladas en su interior, influyen sobre la dinámica hidrológica, la calidad del agua superficial y los procesos hidrogeoquímicos que controlan el transporte y comportamiento de los elementos presentes en el sistema fluvial (Dingman, 2015; MADES, 2021).

2.2.4.2 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica del arroyo Caañabé constituye una de las principales unidades de drenaje de la Región Oriental del Paraguay y forma parte de la vertiente del río Paraguay. De acuerdo con la Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES), la Unidad Hidrográfica Caañabé posee una superficie aproximada de 1.978 km², desarrollándose principalmente en los departamentos de Paraguari y Central. Asimismo, comprende diecisiete municipios y constituye una unidad hidrográfica de gran importancia para la conservación de los recursos hídricos de la región.

La Figura 5 presenta la delimitación de la Unidad Hidrográfica Caañabé y su red de drenaje jerarquizada, integrada por numerosos tributarios que convergen hacia el cauce principal del arroyo Caañabé antes de su desembocadura en el complejo de humedales del lago Ypoá. Esta configuración favorece la conectividad hidrológica entre los diferentes sectores de la cuenca y condiciona los procesos de transporte de agua, sedimentos y sustancias disueltas a lo largo del sistema fluvial (MADES, 2021).

La Figura 6 muestra los principales sectores inundables y humedales asociados al sistema Caañabé–Lago Ypoá. Estos ambientes corresponden a áreas de baja pendiente y escasa energía hidráulica, favorables para la acumulación de sedimentos finos, el almacenamiento temporal de agua y el desarrollo de procesos físicos, químicos y biológicos que influyen sobre la dinámica natural de la cuenca.



Figura 6. Áreas inundables y humedales asociados a la cuenca del arroyo Caañabé en el entorno del lago Ypoá.

Fuente: Juan Ramírez (s.f.), recuperado de Facebook.

2.2.4.3 Clima

La cuenca del arroyo Caañabé se localiza dentro de la región climática subtropical húmeda del Paraguay Oriental, caracterizada por precipitaciones distribuidas a lo largo del año y temperaturas que favorecen el desarrollo de una intensa actividad hidrológica y de procesos de meteorización química. Según González y Bartel (1998), las condiciones climáticas de la región presentan variaciones locales asociadas principalmente al relieve, diferenciándose las áreas de mayor altitud localizadas en las cabeceras de la cuenca respecto de las planicies desarrolladas en los sectores medio y bajo.

De acuerdo con Ayala (2019), la región registra temperaturas medias anuales cercanas a 23 °C y precipitaciones superiores a 2.000 mm anuales, condiciones que

favorecen una elevada disponibilidad hídrica y un régimen de escorrentía superficial activo durante gran parte del año. Estas características climáticas influyen directamente sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca, regulando procesos como la infiltración, el transporte de sedimentos y la recarga de los cursos de agua superficiales.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, el régimen climático desempeña un papel fundamental en la evolución química de las aguas superficiales. Según Drever (1997), la precipitación controla la interacción entre el agua y los materiales geológicos mediante procesos de meteorización, disolución mineral y lixiviación, favoreciendo la incorporación de especies químicas hacia el sistema fluvial. Asimismo, las variaciones en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones modifican la escorrentía superficial y el transporte de sedimentos, condicionando la dinámica de los elementos disueltos y particulados dentro de la cuenca (Dingman, 2015).

2.2.4.4 Evolución de la cobertura y uso del suelo en la cuneca del arroyo Caañabé

La cobertura y el uso del suelo constituyen factores fundamentales para comprender el funcionamiento hidrológico y ambiental de una cuenca hidrográfica, debido a su influencia sobre procesos como la infiltración, la escorrentía superficial, la erosión y el transporte de sedimentos. Lillesand *et al.*, (2015) señalan que el análisis multitemporal mediante imágenes satelitales permite evaluar la dinámica espacial del paisaje y reconocer las transformaciones asociadas a procesos naturales y actividades antrópicas.

Con el propósito de caracterizar la evolución de la cobertura terrestre en la cuenca del arroyo Caañabé, se realizó una clasificación supervisada utilizando imágenes satelitales correspondientes a los años 2000, 2010, 2020 y 2025. Este procedimiento permitió identificar las principales categorías de uso del suelo y disponer de una base cartográfica para el análisis de la evolución espacial de la cuenca.

La Figura 7 presenta la clasificación supervisada de la cobertura y uso del suelo correspondiente al año 2000. En esta representación cartográfica se observa un

predominio de las categorías de pastizales y vegetación densa, distribuidas ampliamente en la cuenca, mientras que las áreas agrícolas, los sectores urbanizados y el suelo descubierto ocupan superficies relativamente reducidas. Asimismo, la red hidrográfica y los humedales presentan una distribución continua, reflejando las condiciones de cobertura y uso del suelo registradas al inicio del período analizado.

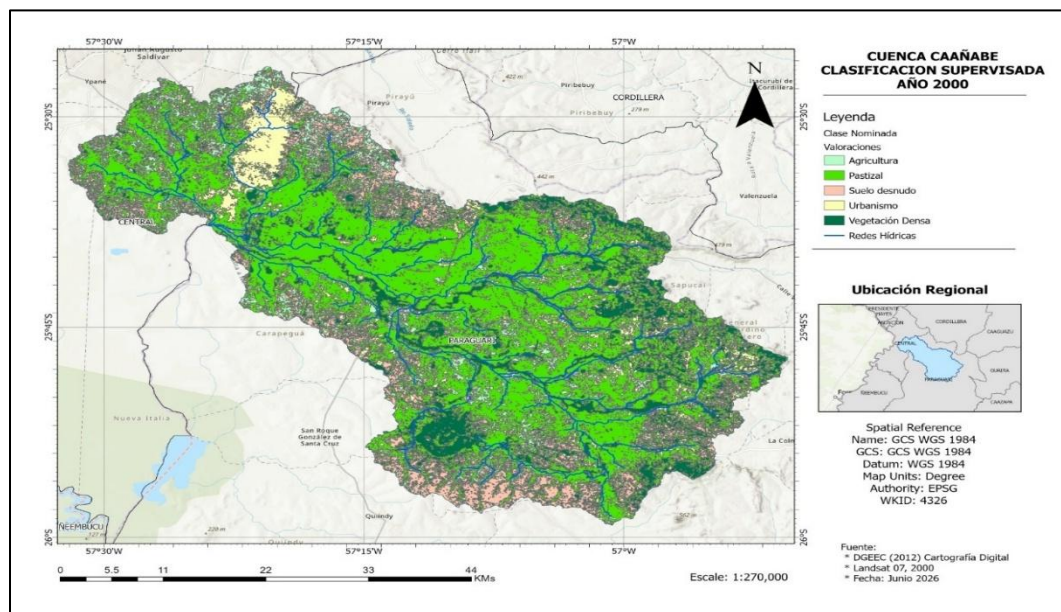


Figura 7. Clasificación supervisada de la cobertura y uso del suelo en la cuenca del arroyo Caañabé para el año 2000.

Fuente: Elaboración propia mediante clasificación supervisada de imágenes Landsat 5 TM, obtenidas del *United States Geological Survey (USGS Earth Explorer)* y procesadas en *ArcGIS Pro (Classification Wizard)*.

La Figura 8 muestra la clasificación supervisada correspondiente al año 2025. En comparación con el año 2000, se observa una mayor presencia de áreas agrícolas y sectores urbanizados, acompañada por una reducción y fragmentación de la vegetación densa en distintos sectores de la cuenca. Los pastizales continúan constituyendo una de las coberturas predominantes, mientras que la distribución de los humedales y de la red hidrográfica se mantiene en las zonas de menor pendiente. En conjunto, ambos mapas permiten identificar los cambios ocurridos en la cobertura y uso del suelo durante el período 2000–2025 y constituyen una herramienta de apoyo para la caracterización ambiental de la cuenca del arroyo Caañabé.

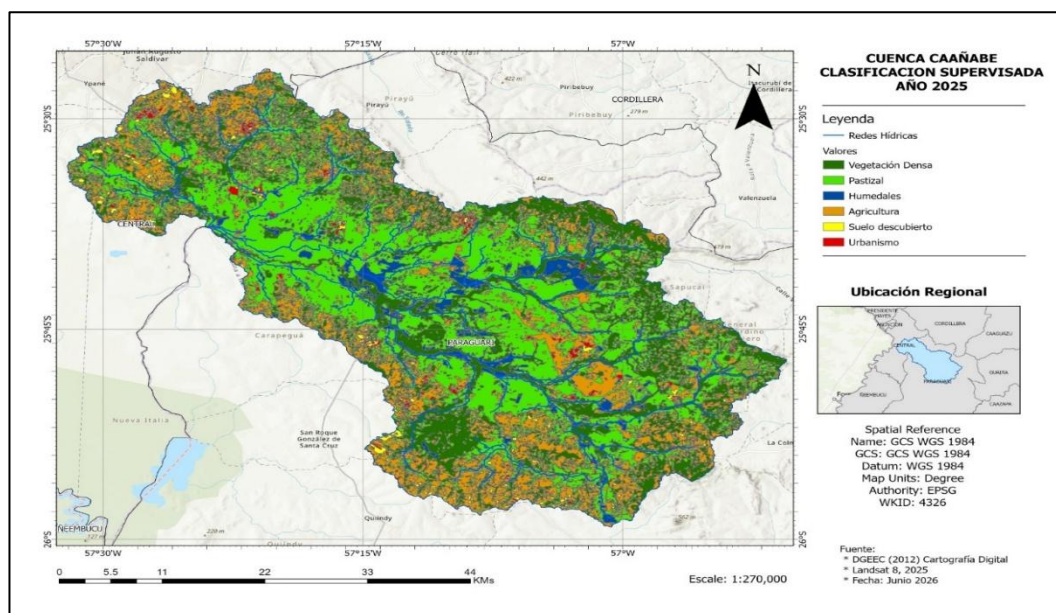


Figura 8. Clasificación supervisada de la cobertura y uso del suelo en la cuenca del arroyo Caañabé para el año 2025.

Fuente: Elaboración propia mediante clasificación supervisada de imágenes Landsat 8 OLI/TIRS, obtenidas del *United States Geological Survey (USGS Earth Explorer)* y procesadas en *ArcGIS Pro (Classification Wizard)*.

Desde una perspectiva hidrológica, las modificaciones en la cobertura del suelo pueden alterar procesos como la infiltración, la escorrentía superficial y el transporte de sedimentos hacia la red de drenaje. Dingman (2015) señala que la sustitución de coberturas naturales por áreas agrícolas o urbanizadas modifica el balance hidrológico y la respuesta de la cuenca frente a los eventos de precipitación. Asimismo, Lillesand *et al.*, (2015) destacan que el análisis multitemporal constituye una herramienta fundamental para evaluar la evolución del paisaje y comprender los efectos del cambio de uso del suelo sobre los sistemas ambientales.

2.2.4.5 Geología del área de estudio

Desde el punto de vista geológico, la cuenca hidrográfica del arroyo Caañabé se localiza sobre el margen occidental de la Cuenca del Paraná, una de las principales cuencas sedimentarias intracratónicas de América del Sur. Su evolución geológica comprende una extensa historia sedimentaria y tectónica desarrollada desde el Paleozoico hasta el Mesozoico, caracterizada por la acumulación de secuencias sedimentarias continentales y marinas, seguida por importantes episodios de

magmatismo alcalino relacionados con procesos extensivos que afectaron el margen occidental de la cuenca durante el Cretácico (Milani *et al.*, 2007).

La configuración geológica regional se encuentra estrechamente vinculada al Rift de Asunción, estructura tectónica de orientación predominante noroeste-sudeste que controló el emplazamiento del magmatismo alcalino mesozoico y ejerció una influencia significativa sobre la evolución estructural y geomorfológica de la región central del Paraguay. La reactivación de estructuras profundas favoreció la intrusión y extrusión de rocas alcalinas, así como el desarrollo de altos estructurales y depresiones tectónicas que condicionan el relieve actual del departamento de Paraguarí (Velázquez *et al.*, 1996; González y Bartel, 1998).

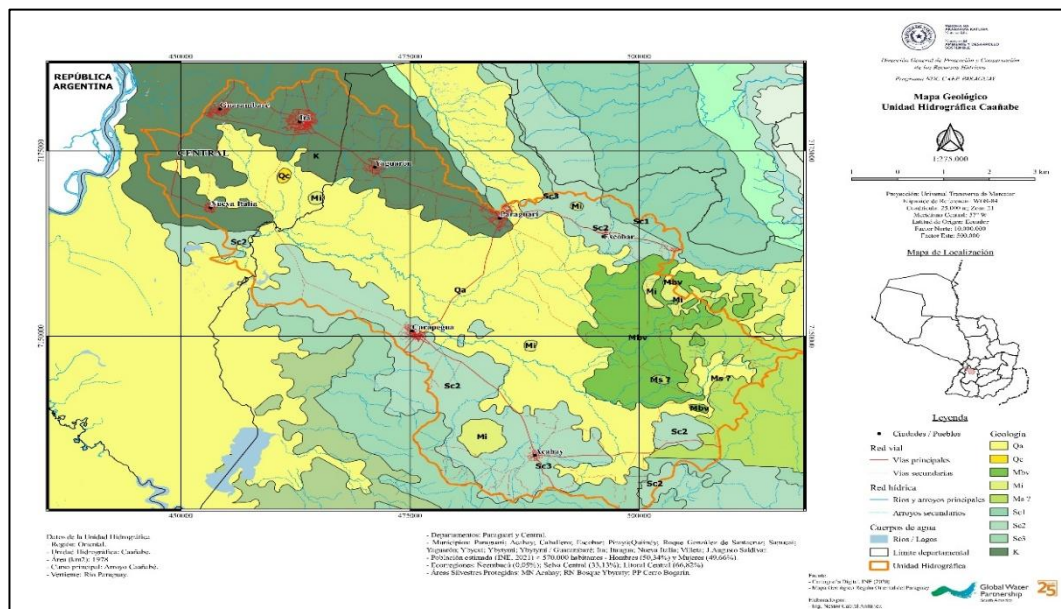


Figura 9. Mapa geológico de la Unidad Hidrográfica Caañabé.

Fuente: Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos (MADES), elaborado a partir del Mapa Geológico de la Región Oriental del Paraguay.

Como se observa en la Figura 9, la Unidad Hidrográfica Caañabé presenta una importante diversidad litológica, integrada por unidades sedimentarias paleozoicas, sedimentitas pérmicas, rocas ígneas alcalinas y depósitos cuaternarios. Predominan los depósitos aluviales (Qa) y coluviales (Qc), acompañados por afloramientos correspondientes al Grupo Caacupé (Sc1, Sc2 y Sc3), la Formación San Miguel (Ms), la Formación Misiones (Mi) y manifestaciones ígneas del Complejo Alcalino Sapucái (Mbv). La distribución espacial de estas unidades geológicas controla las

características litológicas, estructurales y geomorfológicas de la cuenca, así como la configuración de la red de drenaje y del relieve regional (González & Bartel, 1998).

Las unidades paleozoicas corresponden principalmente al Grupo Caacupé, cuya sedimentación se inició durante el Ordovícico Superior y continuó hasta el Silúrico Inferior. Este grupo comprende las formaciones Paraguarí, Cerro Jhú y Tobatí, que registran la evolución de un sistema inicialmente dominado por depósitos fluviales y conglomeráticos hacia ambientes litorales y marinos someros asociados a la transgresión ordovícico-silúrica. Litológicamente predominan conglomerados polimícticos, areniscas conglomerádicas y areniscas cuarzosas bien seleccionadas con abundante estratificación cruzada, ampliamente distribuidas en el departamento de Paraguarí (Wiens, 1986; González y Bartel, 1998).

En diversos sectores de la cuenca también afloran sedimentitas pertenecientes al Grupo Independencia, representadas principalmente por la Formación San Miguel, integrada por areniscas, limolitas y lutitas depositadas en ambientes fluviales, deltaicos y marinos someros durante el Pérmico. Asimismo, se reconocen afloramientos de la Formación Misiones, constituida por areniscas cuarzosas continentales desarrolladas durante el Mesozoico y ampliamente distribuidas en la Región Oriental del Paraguay (González y Bartel, 1998)

El magmatismo regional está representado por el Complejo Alcalino Sapucái, integrado por cuerpos intrusivos y extrusivos emplazados durante el Cretácico Inferior en relación con la evolución tectónica del Rift de Asunción. Este complejo comprende sienitas, essexitas, traquitas, fonolitas, basaltos alcalinos y otras litologías diferenciadas que afloran en distintos sectores del departamento de Paraguarí, originando cerros aislados y relieves estructurales característicos de la región (Velázquez *et al.*, 1996).

Los sectores de menor altitud de la cuenca están ocupados por depósitos cuaternarios de origen aluvial, coluvial y palustre, constituidos principalmente por arenas, limos y arcillas no consolidadas acumuladas en planicies de inundación y humedales asociados al arroyo Caañabé y al sistema del lago Ypoá. Estas unidades representan los materiales más recientes de la cuenca y reflejan la dinámica fluvial

los procesos de infiltración, recarga y circulación subterránea, influyendo directamente sobre la dinámica hidrológica de la cuenca.

La presencia de depósitos aluviales a lo largo del valle del arroyo Caañabé favorece condiciones propicias para la infiltración y la interacción entre las aguas superficiales y los materiales sedimentarios, particularmente durante los eventos de crecida y en las planicies de inundación. Estas condiciones pueden favorecer procesos de disolución mineral, adsorción, intercambio iónico y transporte de especies químicas dentro del sistema fluvial (Appelo y Postma, 2005).

Desde una perspectiva hidrogeoquímica, el tiempo de residencia del agua y la interacción agua-roca constituyen factores fundamentales en la evolución natural de la composición química de las aguas. Drever (1997) señala que la circulación del agua a través de diferentes materiales geológicos favorece la incorporación progresiva de especies iónicas mediante procesos de meteorización y disolución mineral. Asimismo, los sedimentos finos presentes en los depósitos aluviales pueden actuar como superficies reactivas capaces de adsorber o liberar elementos traza, dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del medio.

2.3 Marco Constitucional y Legal de los Recursos Hídricos

2.3.1 Régimen legal de los recursos hídricos

La gestión y protección de los recursos hídricos en Paraguay se encuentra sustentada en un conjunto de instrumentos jurídicos que establecen los principios para el uso sostenible, conservación y control de la calidad del agua. La base normativa se encuentra en la Constitución Nacional de la República del Paraguay, la cual reconoce el derecho de toda persona a habitar en un ambiente saludable y ecológicamente equilibrado.

El artículo 7 de la Constitución Nacional establece que toda persona tiene derecho a vivir en un ambiente saludable, mientras que el artículo 8 dispone que las actividades susceptibles de producir alteraciones ambientales deberán ser reguladas por la ley. Asimismo, el artículo 38 reconoce el derecho de los ciudadanos a participar

en la defensa del ambiente y de los intereses colectivos relacionados con los recursos naturales (Constitución Nacional de la República del Paraguay, 1992).

En materia específica de recursos hídricos, la Ley N.º 3239/2007 "De los Recursos Hídricos del Paraguay" constituye el principal instrumento legal para la gestión del agua en el país. Esta normativa establece que los recursos hídricos forman parte del dominio público del Estado y dispone que su utilización debe realizarse bajo criterios de sostenibilidad, equidad y preservación ambiental.

Según la citada ley, la gestión integrada de los recursos hídricos debe considerar las cuencas hidrográficas como unidades básicas de planificación, promoviendo el aprovechamiento racional del agua y la protección de los ecosistemas asociados. Asimismo, la normativa contempla mecanismos para la prevención y control de la contaminación hídrica, estableciendo responsabilidades para los usuarios y generadores de efluentes.

La aplicación de estas disposiciones resulta particularmente relevante en cuencas sometidas a presión antrópica, como el arroyo Caañabé, donde las actividades urbanas, agropecuarias e industriales pueden influir sobre la calidad de las aguas superficiales y afectar los ecosistemas acuáticos.

2.3.2 Gestión por cuencas hidrográficas

La gestión por cuencas hidrográficas constituye uno de los principios fundamentales de la administración moderna de los recursos hídricos. De acuerdo con la Ley N.º 3239/2007, la cuenca hidrográfica es considerada la unidad territorial más adecuada para la planificación, gestión y protección del agua, debido a que integra los procesos hidrológicos, ambientales y socioeconómicos que ocurren dentro de un mismo sistema de drenaje.

Este enfoque reconoce que las actividades desarrolladas en diferentes sectores de una cuenca pueden influir directa o indirectamente sobre la calidad y disponibilidad del recurso hídrico. En consecuencia, la evaluación ambiental de un curso de agua requiere considerar tanto las características físicas del sistema como los usos del suelo y las actividades desarrolladas dentro de su área de drenaje.

En el caso del arroyo Caañabé, la aplicación del enfoque de gestión por cuencas adquiere especial relevancia debido a la coexistencia de áreas urbanas, agrícolas e industriales dentro de su territorio. La presencia de múltiples fuentes potenciales de contaminación hace necesario adoptar estrategias de monitoreo y control que permitan evaluar integralmente el estado ambiental de la cuenca.

La gestión integrada por cuencas promueve además la generación de información científica orientada a comprender los procesos que condicionan la calidad del agua. En este contexto, los estudios hidrogeoquímicos constituyen herramientas fundamentales para identificar fuentes de contaminación, evaluar riesgos ambientales y apoyar la toma de decisiones relacionadas con la protección de los recursos hídricos.

2.3.3 Marco ambiental

La protección ambiental en Paraguay se encuentra regulada por diversas disposiciones legales orientadas a preservar los recursos naturales y prevenir los impactos derivados de las actividades humanas. Entre las principales normas se encuentra la Ley N.º 1561/2000, que crea el Sistema Nacional del Ambiente (SISNAM), el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) y la Secretaría del Ambiente, actualmente Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES).

Esta legislación establece los mecanismos institucionales para la formulación, coordinación y ejecución de políticas ambientales a nivel nacional. Asimismo, asigna al MADES la responsabilidad de fiscalizar actividades potencialmente contaminantes y velar por el cumplimiento de las normas ambientales vigentes.

Complementariamente, la Ley N.º 294/1993 de Evaluación de Impacto Ambiental establece la obligatoriedad de evaluar previamente los efectos ambientales de proyectos, obras o actividades susceptibles de producir modificaciones significativas en el ambiente. Entre las actividades comprendidas por esta normativa se incluyen diversos procesos industriales que pueden generar efluentes líquidos o residuos potencialmente contaminantes.

2.3.4 Regulación sanitaria y calidad del agua

La calidad de las aguas superficiales en Paraguay se encuentra regulada por diversas disposiciones técnicas y ambientales destinadas a proteger la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Entre ellas destaca la Resolución SEAM N.º 222/2002, que establece criterios para la clasificación de cuerpos de agua superficiales y parámetros de calidad ambiental aplicables a diferentes usos.

Esta normativa contempla la evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos destinados a determinar el estado de conservación de los recursos hídricos. Si bien la regulación se centra principalmente en la protección de los usos potenciales del agua, también constituye una referencia para la evaluación de procesos de contaminación y alteración ambiental.

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2022) reconoce la importancia del monitoreo de metales pesados en sistemas acuáticos debido a los riesgos que pueden representar para la salud humana y los ecosistemas. En el caso particular del cromo, la presencia de especies químicas altamente móviles como el Cr(VI) ha motivado el establecimiento de límites y recomendaciones orientadas a reducir los riesgos asociados a su exposición.

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde al arroyo Caañabé, localizado en la Región Oriental del Paraguay. La investigación se desarrolló en un tramo del cauce principal ubicado en el departamento de Paraguarí, seleccionado por la presencia de actividades potencialmente generadoras de contaminación, la accesibilidad para el desarrollo de los trabajos de campo y la representatividad ambiental del sector dentro de la cuenca hidrográfica.

La selección del tramo respondió a criterios de representatividad espacial, accesibilidad y proximidad a actividades potencialmente generadoras de contaminación. Asimismo, la distribución de cuatro puntos de monitoreo permitió evaluar la variación espacial de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) y de los parámetros fisicoquímicos determinados en el agua superficial a lo largo del tramo estudiado.

La Figura 11 muestra un sector representativo del cauce principal del arroyo Caañabé durante la campaña de muestreo. En ella se observan las características generales del cauce, la vegetación ribereña y el entorno inmediato del sistema fluvial, proporcionando una referencia visual de las condiciones ambientales presentes durante el trabajo de campo. La Figura 12 presenta la ubicación general del tramo del arroyo Caañabé seleccionado para la presente investigación dentro de la cuenca hidrográfica. Esta representación cartográfica permitió delimitar espacialmente el área de estudio, identificar el sector evaluado y planificar la distribución de los puntos de monitoreo considerados durante la campaña de muestreo.



Figura 11. Vista del cauce principal del arroyo Caañabé en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia (2026).

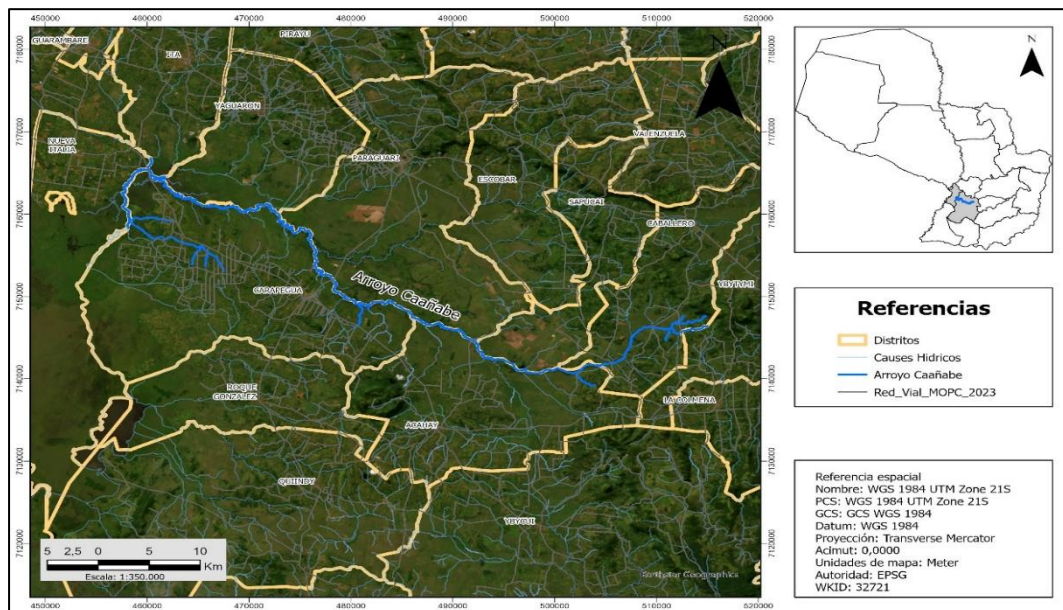


Figura 12. Ubicación general del área de estudio correspondiente al arroyo Caañabé.
Fuente: Elaboración propia mediante QGIS e imágenes satelitales.

3.1.1 Caracterización del tramo de estudio

El tramo seleccionado para la presente investigación corresponde al cauce principal del arroyo Caañabé y presenta una longitud aproximada de 31 km, determinada mediante análisis espacial en un Sistema de Información Geográfica

(SIG). El cauce posee una orientación general sureste–noroeste, siguiendo la dirección predominante del escurrimiento superficial descrita para la cuenca hidrográfica.

El sector evaluado corresponde a un tramo del arroyo donde convergen diferentes usos del suelo y potenciales fuentes de contaminación, constituyendo un área representativa para la caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial desarrollada en la presente investigación. El tramo se desarrolla entre cotas comprendidas aproximadamente entre 68 y 135 m s.n.m., presentando una pendiente longitudinal suave, característica de los sectores medios y bajos de la cuenca. Estas condiciones favorecen una baja energía del flujo y la deposición de sedimentos finos, dando lugar al desarrollo de planicies aluviales asociadas al cauce principal.

Los cuatro puntos de monitoreo fueron distribuidos longitudinalmente a lo largo del tramo evaluado, abarcando aproximadamente 31 km del cauce principal. La mayor distancia se registró entre los puntos AC1 y AC2 (23,2 km), mientras que los puntos AC2, AC3 y AC4 se localizaron en un sector más próximo entre sí, con distancias de 4,1 km y 4,4 km, respectivamente. Esta distribución permitió representar espacialmente diferentes sectores del tramo de estudio y evaluar las condiciones fisicoquímicas del agua superficial a lo largo del cauce principal.

La litología predominante está representada por sedimentos cuaternarios constituidos principalmente por arenas, limos y arcillas, materiales que favorecen los procesos de infiltración y la interacción entre el agua superficial y los sedimentos. Como se observa en la Figura 13, el tramo del arroyo Caañabé presenta un trazado sinuoso característico de un cauce meandriforme, desarrollado sobre una amplia planicie aluvial de baja pendiente. Asimismo, se aprecia una franja continua de vegetación ribereña correspondiente al bosque de galería, la cual bordea el cauce y contrasta con las áreas destinadas principalmente a actividades agropecuarias presentes en el entorno. Estas características reflejan las condiciones geomorfológicas

y ambientales predominantes del sector evaluado y constituyen el contexto físico en el cual se desarrolló la campaña de muestreo.



Figura 13. Vista aérea del tramo del arroyo Caañabé donde se observan el cauce meandriforme, la vegetación ribereña y los principales usos del suelo del entorno.

Fuente: Juan Ramírez (s.f.), recuperado de Facebook.

Durante el reconocimiento de campo se observó que la vegetación ribereña está constituida principalmente por bosque de galería, acompañado por sectores con cobertura herbácea y arbustiva. No obstante, en determinados puntos se evidencian modificaciones asociadas al desarrollo de actividades agropecuarias y urbanas, las cuales alteran parcialmente la continuidad de la vegetación natural.

3.1.2 Selección de los puntos de muestreo

La campaña de muestreo se realizó el 24 de mayo de 2026 en el arroyo Caañabé, con el objetivo de recolectar muestras de agua superficial destinadas a la determinación de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) y de los parámetros fisicoquímicos considerados en la presente investigación.

Para la planificación del trabajo de campo se revisaron previamente las condiciones hidrometeorológicas de la zona de estudio, procurando evitar la realización de la campaña inmediatamente después de eventos de precipitación

intensa, con el propósito de minimizar la influencia de la escorrentía superficial y de los procesos de dilución sobre las características fisicoquímicas del agua (Chapman, 1996).

De acuerdo con el Resumen Climatológico Mensual correspondiente a mayo de 2026, publicado por la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH), el período de estudio correspondió a la estación otoñal y se caracterizó por temperaturas moderadas y precipitaciones distribuidas durante el mes. Asimismo, se registraron déficits pluviométricos en gran parte del territorio nacional respecto de los valores climatológicos normales, mientras que en la Región Oriental las precipitaciones acumuladas oscilaron entre 41,2 y 182,8 mm, registrándose temperaturas medias comprendidas entre 16 y 18 °C. Estas condiciones favorecieron una mayor estabilidad hidrológica del sistema durante el período de estudio, reduciendo la influencia de eventos meteorológicos extremos sobre la calidad del agua evaluada.

Se establecieron cuatro puntos de monitoreo, identificados como AC1, AC2, AC3 y AC4, distribuidos longitudinalmente a lo largo de un tramo aproximado de 31 km del cauce principal del arroyo Caañabé. La selección de estos sitios respondió a criterios de representatividad espacial, considerando la cobertura de los sectores alto, medio y bajo del tramo evaluado, la accesibilidad para el muestreo, la continuidad del cauce y la proximidad relativa a actividades potencialmente generadoras de contaminación, particularmente curtiembres. Esta distribución permitió incluir puntos ubicados aguas arriba y aguas abajo de dichas actividades, favoreciendo la comparación espacial de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) y de los parámetros fisicoquímicos determinados durante la campaña de muestreo.

Los puntos de muestreo fueron georreferenciados mediante coordenadas *UTM (Universal Transverse Mercator)*, Datum WGS 84, Zona 21 Sur, permitiendo registrar con precisión la ubicación de cada sitio de monitoreo y facilitar su representación cartográfica mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), como se observa en la Tabla 1. La distribución longitudinal de los puntos permitió evaluar espacialmente la variación de los parámetros fisicoquímicos y de la

concentración de cromo hexavalente Cr(VI) a lo largo del tramo estudiado del arroyo Caañabé.

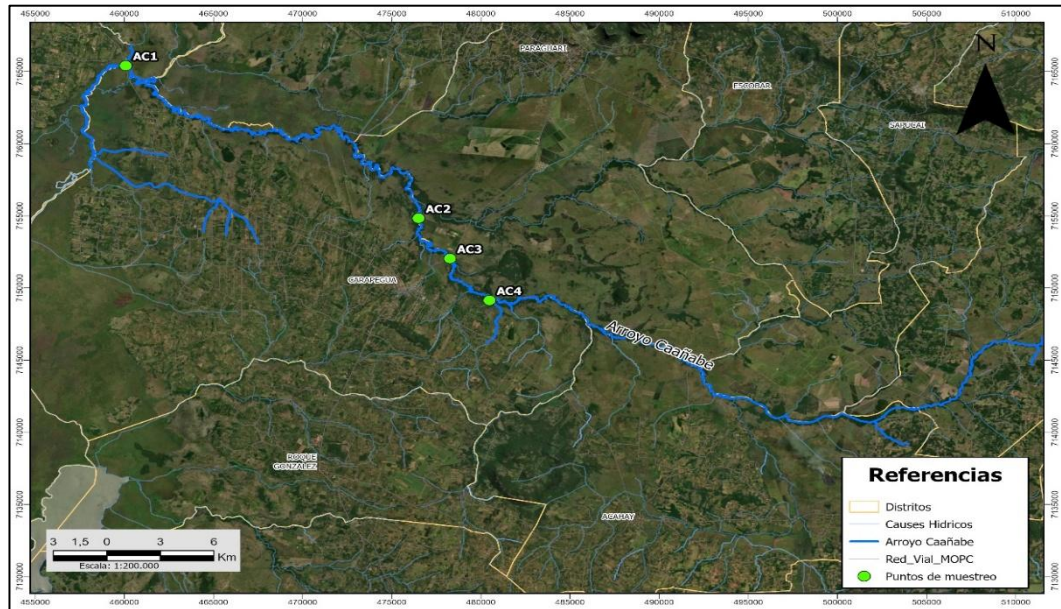


Figura 14. Distribución espacial de los puntos de muestreo AC1, AC2, AC3 y AC4 en el arroyo Caañabé.

Fuente: Elaboración propia mediante QGIS e imágenes satelitales.

La separación entre los puntos de monitoreo osciló aproximadamente entre 4,1 y 23,2 km, permitiendo cubrir diferentes sectores del tramo evaluado y evitando concentrar el muestreo en una única zona del arroyo. Esta distribución espacial favoreció la comparación de las condiciones fisicoquímicas registradas entre los distintos sitios de monitoreo y proporcionó una cobertura adecuada del tramo considerado en la investigación.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.

Punto de muestreo	Este (m)	Norte (m)
AC1	460086	7165396
AC2	476513	7154826
AC3	478273	7152036
AC4	480492	7149142

Fuente: Elaboración propia (2026).

Además de los criterios hidrológicos y de accesibilidad, la selección de los puntos de monitoreo consideró la ubicación de actividades potencialmente generadoras de contaminación, particularmente establecimientos dedicados al curtido de cueros, debido al empleo de compuestos de cromo durante sus procesos productivos.

Con el propósito de complementar el análisis espacial, se calcularon las distancias aproximadas entre los establecimientos de curtiembre identificados y el tramo del arroyo Caañabé considerado en la investigación. Los resultados se presentan en la Tabla 2, donde se observa que Durli Leathers Industria e Comércio de Couros se localiza aproximadamente a 1.400 m del arroyo, mientras que LyN Curtiduría, Curticar Cueros y Curtiembre San Andrés se ubican a 1.970 m, 2.660 m y 2.750 m, respectivamente. Estas distancias constituyeron un criterio adicional para la selección de los puntos de monitoreo, al permitir considerar la proximidad relativa de actividades potencialmente generadoras de contaminación, sin asumir previamente que estas representarían una fuente efectiva de aporte de cromo al sistema fluvial.

La Figura 15 presenta la localización espacial de las curtiembres y de otras actividades potencialmente generadoras de contaminación en relación con el tramo del arroyo Caañabé considerado en la presente investigación.

La distribución de los cuatro puntos de monitoreo permitió cubrir un tramo representativo del cauce principal del arroyo Caañabé, incluyendo sectores ubicados aguas arriba y aguas abajo de las principales actividades potencialmente generadoras de contaminación identificadas durante el análisis espacial. Esta disposición proporcionó una cobertura adecuada para realizar la caracterización fisicoquímica puntual del tramo evaluado y comparar los resultados obtenidos entre los diferentes sitios de monitoreo.

Una vez definidos los puntos de monitoreo, se procedió a la recolección de muestras directamente del cauce principal del arroyo. Las muestras fueron obtenidas en sectores con flujo representativo del curso de agua, evitando remansos, zonas de

estancamiento, áreas con acumulación excesiva de sedimentos superficiales y sectores con alteraciones locales que pudieran afectar la representatividad de las muestras.

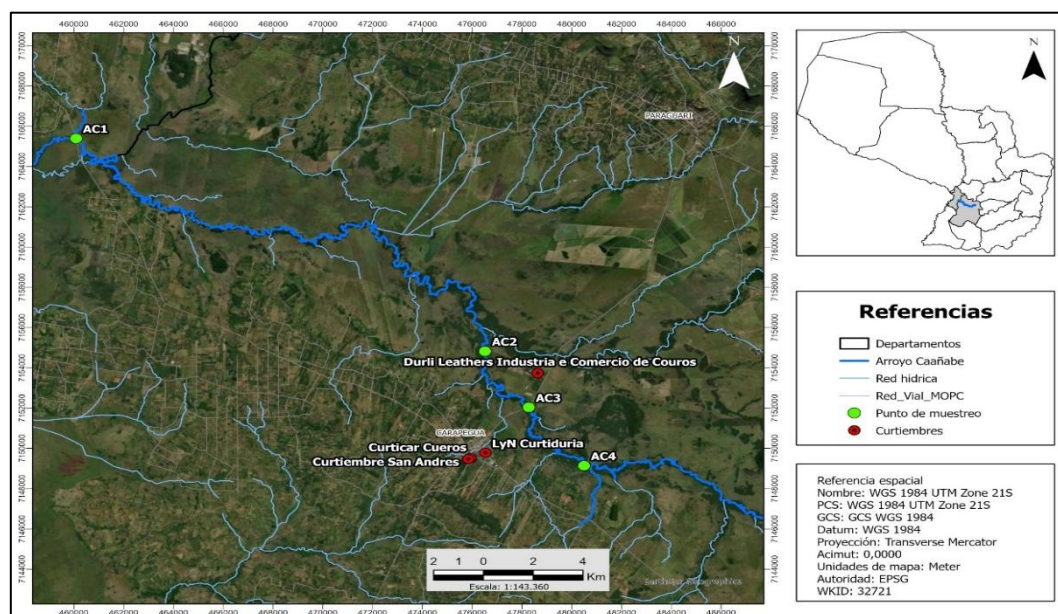


Figura 15. Localización de curtiembres y otras actividades potencialmente contaminantes en relación con el arroyo Caañabé.

Fuente: Elaboración propia mediante QGIS.

Tabla 2. Distancia aproximada entre los establecimientos de curtiembre identificados y el tramo del arroyo Caañabé considerado en el presente estudio.

Establecimiento	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)	Distancia aproximada al arroyo (m)
Durli Leathers Industria e Comércio de Couros	478632	7153734	1400
LyN Curtiduría	476530	7149783	1970
Curticar Cueros	475939	7149522	2660
Curtiembre San Andrés	475849	7149467	2750

Fuente: Elaboración propia mediante análisis espacial realizado en QGIS (2026).

Durante la campaña también se registraron observaciones relacionadas con las condiciones ambientales de cada sitio, incluyendo las características del cauce, la coloración del agua, la presencia de material en suspensión, el estado de la vegetación ribereña, olores, evidencias de descargas y otros aspectos considerados relevantes para

la contextualización e interpretación de los resultados obtenidos. El procedimiento de recolección realizado durante el trabajo de campo se presenta en la Figura 16.



Figura 16. Recolección de muestras de agua superficial en el arroyo Caañabé durante la campaña de muestreo realizada en mayo de 2026.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Durante el reconocimiento de campo también se registraron evidencias de posibles fuentes de aporte de contaminantes al sistema fluvial. Entre ellas se observaron descargas puntuales de efluentes hacia el cauce del arroyo, registradas fotográficamente durante la campaña de muestreo. Estas observaciones fueron utilizadas como información complementaria para contextualizar los resultados obtenidos, sin constituir por sí mismas evidencia concluyente sobre el origen de los contaminantes presentes en el agua. La Figura 17 muestra una de las descargas observadas durante el trabajo de campo.



Figura 17. Descarga puntual de efluente observada durante la campaña de muestreo en un sector próximo al área de estudio del arroyo Caañabé.

Fuente: Elaboración propia (2026).

3.1.3 Recolección, conservación y transporte de muestras

Para la recolección de las muestras se utilizaron botellas plásticas de polietileno con capacidad de un litro (1 L), previamente acondicionadas para estudios de calidad de agua. Antes de la toma definitiva, cada recipiente fue enjuagado con agua del mismo punto de muestreo, con el propósito de acondicionar el envase a las características fisicoquímicas del agua y minimizar posibles interferencias derivadas del almacenamiento previo. Este procedimiento se realizó de acuerdo con las recomendaciones establecidas en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA y WEF, 2017).

La toma de agua se efectuó manteniendo la boca del recipiente orientada en sentido contrario al operador y en dirección del flujo del agua, evitando el contacto con sedimentos del fondo, vegetación marginal u otras superficies que pudieran alterar la calidad de la muestra. Una vez recolectadas, las botellas fueron cerradas inmediatamente para evitar contaminación externa y preservar las condiciones originales de las muestras.

Posteriormente, cada recipiente fue identificado mediante un código correspondiente al punto de monitoreo (AC1, AC2, AC3 y AC4), registrándose además la fecha de muestreo y la información necesaria para garantizar su correcta trazabilidad durante el análisis de laboratorio. Las muestras recolectadas y etiquetadas se presentan en la Figura 18.

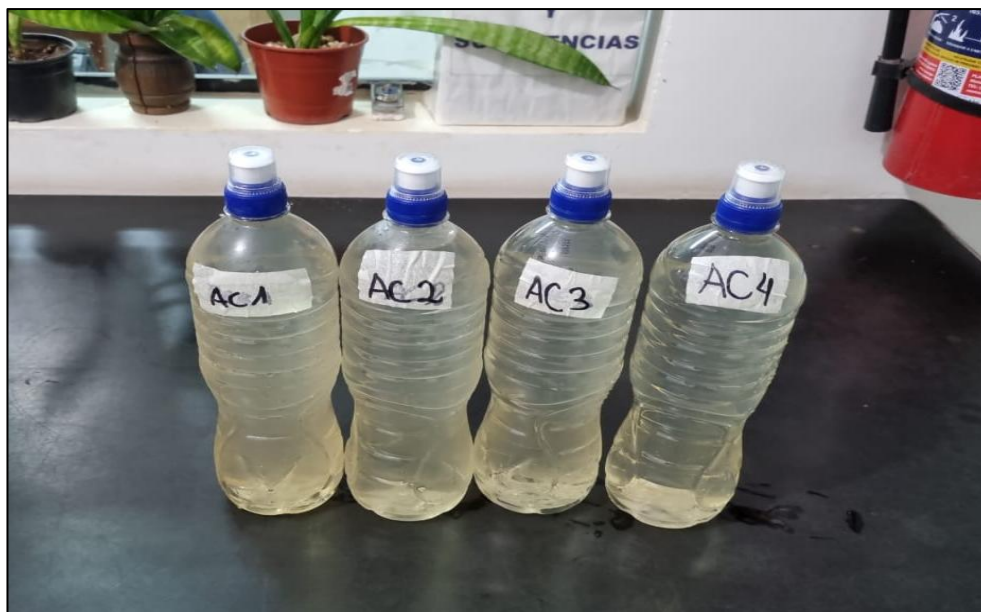


Figura 18. Muestras de agua superficial recolectadas y etiquetadas correspondientes a los puntos AC1, AC2, AC3 y AC4.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Finalizada la campaña de campo, las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción (FACEN–UNA). Durante el transporte se evitó la exposición prolongada a la radiación solar y se procuró conservar las condiciones originales de las muestras hasta su procesamiento, con el fin de minimizar posibles alteraciones fisicoquímicas previas a los análisis correspondientes.

Los procedimientos de selección de los puntos de monitoreo, toma de muestras, acondicionamiento de recipientes, identificación, conservación y transporte se desarrollaron siguiendo los lineamientos establecidos en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA y WEF, 2017), garantizando la aplicación de procedimientos estandarizados durante la campaña de muestreo.

La presente investigación se desarrolló mediante una única campaña de muestreo y la evaluación de cuatro puntos de monitoreo distribuidos a lo largo del tramo seleccionado del arroyo Caañabé. En consecuencia, las muestras obtenidas representan exclusivamente las condiciones fisicoquímicas observadas durante la campaña realizada el 24 de mayo de 2026 y en los sectores efectivamente evaluados. Asimismo, durante el trabajo de campo no se realizaron réplicas de muestreo ni procedimientos específicos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), tales como muestras duplicadas, blancos de campo o muestras de control, por lo que las interpretaciones derivadas de esta investigación se limitan al alcance de las determinaciones efectuadas y constituyen una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé, sin representar el comportamiento integral del sistema fluvial.

3.2 Enfoque y diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, orientado a la obtención, medición y análisis de datos relacionados con la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) y los parámetros fisicoquímicos del agua superficial del arroyo Caañabé. De acuerdo con Hernández Sampieri y Mendoza (2018), el enfoque cuantitativo permite medir variables mediante procedimientos sistemáticos y objetivos, facilitando la descripción y el análisis de los resultados obtenidos.

El estudio presenta un alcance descriptivo, ya que estuvo orientado a caracterizar las condiciones fisicoquímicas del agua superficial y determinar la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en los diferentes puntos de monitoreo. La unidad de análisis estuvo constituida por las muestras de agua superficial recolectadas en cada uno de los cuatro puntos establecidos durante la campaña de muestreo. En consecuencia, la investigación se limitó a describir las características observadas durante el período de estudio, sin establecer relaciones causales entre las variables evaluadas.

La investigación corresponde a un diseño no experimental, debido a que las variables fueron observadas en su ambiente natural, sin manipulación por parte de los investigadores (Hernández Sampieri y Mendoza, 2018). Asimismo, presenta un corte transversal, ya que la obtención de las muestras y la medición de las variables se realizaron durante una única campaña de muestreo desarrollada el 24 de mayo de 2026.

Las variables consideradas en la investigación correspondieron a la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, seleccionadas por su utilidad para la caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé. El diseño metodológico implementado permitió describir las condiciones observadas en los puntos de monitoreo y compararlas entre sí, así como contrastar los resultados obtenidos con los valores de referencia establecidos en la normativa ambiental vigente.

Finalmente, el análisis integró la información obtenida durante el trabajo de campo, los resultados de laboratorio y la cartografía temática elaborada mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el propósito de contextualizar los resultados dentro de las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales de la cuenca del arroyo Caañabé. En consecuencia, las interpretaciones realizadas se limitaron al alcance de las variables efectivamente determinadas durante la investigación y a las condiciones registradas durante la campaña de muestreo.

3.3 Diseño metodológico

La metodología fue diseñada para dar cumplimiento a los objetivos planteados en la investigación mediante la integración de actividades de gabinete, trabajo de campo, análisis de laboratorio y procesamiento de información espacial. En este contexto, las variables evaluadas correspondieron a la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, seleccionadas por su utilidad para la caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé.

El diseño metodológico se estructuró de manera secuencial e integrada, estableciendo una relación directa entre los objetivos específicos, las variables

evaluadas y los procedimientos aplicados durante la investigación. La recopilación y análisis de antecedentes científicos, cartográficos y ambientales permitieron caracterizar el área de estudio y planificar la campaña de muestreo. Posteriormente, el trabajo de campo hizo posible la obtención de muestras representativas del agua superficial y el registro de las condiciones ambientales observadas en cada punto de monitoreo. Los análisis de laboratorio proporcionaron la información correspondiente a la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, mientras que el procesamiento e integración de los datos permitieron organizar, comparar e interpretar los resultados obtenidos en función de las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales de la cuenca. De esta manera, cada una de las etapas desarrolladas contribuyó de forma articulada al cumplimiento de los objetivos específicos planteados en la investigación.

La metodología se estructuró en cinco etapas consecutivas y complementarias, desarrolladas de manera sistemática, las cuales se describen a continuación.

La primera etapa consistió en la recopilación y análisis de antecedentes científicos, cartográficos y ambientales relacionados con la cuenca hidrográfica del arroyo Caañabé. Se revisó bibliografía especializada sobre calidad de aguas superficiales, comportamiento del cromo hexavalente, características geológicas e hidrogeológicas de la región y normativa ambiental vigente en Paraguay. Paralelamente, se recopilaron capas cartográficas oficiales correspondientes a hidrografía, geología, hidrogeología, red vial, límites administrativos y uso del suelo, utilizadas posteriormente para la elaboración de la cartografía temática mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La segunda etapa comprendió el reconocimiento preliminar del área de estudio y la planificación de la campaña de muestreo. Durante esta fase se inspeccionó el tramo seleccionado del arroyo con el propósito de identificar las condiciones de acceso, las características del cauce, las posibles fuentes potenciales de contaminación y los sectores más adecuados para el establecimiento de los puntos de monitoreo.

Asimismo, se revisaron las condiciones hidrometeorológicas previas al muestreo, procurando evitar la realización de la campaña inmediatamente después de eventos de precipitación intensa, con el fin de reducir la influencia de la escorrentía superficial y de los procesos de dilución sobre las características fisicoquímicas del agua (Chapman, 1996).

La tercera etapa correspondió al trabajo de campo y a la recolección de muestras de agua superficial. Para ello se establecieron cuatro puntos de monitoreo distribuidos longitudinalmente a lo largo del cauce principal del arroyo Caañabé, considerando criterios de representatividad espacial, accesibilidad y proximidad a actividades potencialmente generadoras de contaminación. En cada sitio se registraron las coordenadas geográficas mediante un sistema de posicionamiento global (GPS) y se documentaron las condiciones ambientales observadas, incluyendo las características del cauce, el estado de la vegetación ribereña, la coloración del agua, la presencia de material en suspensión, olores y otras evidencias de posible influencia antrópica.

La cuarta etapa comprendió el análisis de laboratorio. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción (FACEN-UNA), donde se determinaron la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez mediante metodologías estandarizadas descritas en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA y WEF, 2017). Durante esta etapa se aplicaron los procedimientos analíticos establecidos por el laboratorio, garantizando la correcta ejecución de las determinaciones realizadas.

La quinta etapa consistió en el procesamiento, integración e interpretación de la información obtenida. Los resultados fueron organizados en bases de datos electrónicas y posteriormente analizados mediante tablas, gráficos y cartografía temática elaborada en ambiente SIG. Finalmente, la información obtenida durante el trabajo de campo y en laboratorio fue integrada con las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales de la cuenca, permitiendo describir las condiciones

fisicoquímicas observadas durante la campaña de muestreo y contextualizar los resultados obtenidos dentro del área de estudio.

3.4 Parámetros analizados

La selección de los parámetros analizados en la presente investigación se realizó considerando el objetivo de efectuar una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé y determinar la concentración de cromo hexavalente Cr(VI). En este contexto, se seleccionaron parámetros ampliamente utilizados en estudios de calidad de agua, debido a que proporcionan información sobre las condiciones fisicoquímicas del sistema y permiten contextualizar los resultados obtenidos para el cromo hexavalente (APHA, AWWA y WEF, 2017; Richard y Bourg, 1991).

Para cada punto de monitoreo se determinaron la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), considerada la variable principal de estudio debido a su importancia ambiental y sanitaria como una de las formas más tóxicas del cromo presentes en sistemas acuáticos. Asimismo, se determinó el pH, parámetro utilizado para evaluar las condiciones ácido-base del agua superficial, constituyendo uno de los indicadores básicos de calidad del agua y un factor que puede influir en la estabilidad química de diversas especies presentes en solución (Richard y Bourg, 1991).

También se determinó la conductividad eléctrica, empleada como indicador indirecto de la concentración total de especies iónicas disueltas presentes en el agua. Este parámetro permite identificar variaciones en la mineralización natural del sistema y posibles aportes de sustancias disueltas provenientes de procesos naturales o actividades antrópicas (Appelo y Postma, 2005). Finalmente, se determinó la turbidez, utilizada como indicador de la presencia de partículas suspendidas, incluyendo sedimentos finos, arcillas y materia orgánica, constituyendo un parámetro ampliamente empleado para evaluar las condiciones físicas del agua superficial (APHA, AWWA y WEF, 2017).

Los parámetros seleccionados permitieron realizar una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé y contextualizar los

resultados obtenidos para la concentración de cromo hexavalente Cr(VI). En consecuencia, las interpretaciones realizadas en la presente investigación se limitaron al análisis de las variables efectivamente determinadas durante la campaña de muestreo y a la comparación de los resultados obtenidos con los criterios de calidad establecidos en la normativa ambiental vigente. En este sentido, el estudio no pretende describir procesos hidrogeoquímicos complejos, tales como la especiación química, la transformación o la movilidad del cromo en el sistema acuático, debido a que dichas interpretaciones requieren la determinación de parámetros complementarios, como el potencial de oxidación-reducción (Eh), oxígeno disuelto, alcalinidad, carbono orgánico disuelto y sedimentos, los cuales no fueron considerados dentro del alcance de la presente investigación.

3.5 Análisis de laboratorio

Las determinaciones analíticas fueron realizadas en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción (FACEN–UNA), utilizando metodologías estandarizadas descritas en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA y WEF, 2017). Los procedimientos analíticos fueron seleccionados en función de los objetivos de la investigación y de los parámetros establecidos para la caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé.

Las muestras fueron recibidas, procesadas y analizadas conforme a los procedimientos operativos del laboratorio. Para cada punto de monitoreo se emitió un informe de ensayo individual, consignando el código de identificación de la muestra, las fechas de recepción y ejecución del análisis, el método empleado para cada determinación, las unidades de medida correspondientes y los valores de referencia establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2. Los informes fueron emitidos oficialmente por el Laboratorio de Calidad de Agua de la FACEN–UNA y constituyeron la base para el procesamiento e interpretación de los resultados.

Tabla 3. Parámetros analizados durante la investigación

Parámetro	Descripción e importancia
Cromo hexavalente Cr(VI)	Variable principal de estudio, determinada debido a su importancia ambiental y sanitaria en cuerpos de agua superficiales potencialmente influenciados por actividades antrópicas.
Ph	Parámetro utilizado para evaluar las condiciones ácido-base del agua superficial, ampliamente empleado en estudios de calidad de agua.
Conductividad eléctrica	Indicador indirecto del contenido de especies iónicas disueltas presentes en el agua, utilizado para evaluar la mineralización del sistema y posibles aportes de sustancias disueltas.
Turbidez	Indicador de la presencia de partículas suspendidas en el agua, utilizado para caracterizar las condiciones físicas del sistema acuático.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La determinación del pH se realizó mediante el método potenciométrico SM 4500-H⁺ B, basado en la medición de la actividad de los iones hidrógeno (H⁺) presentes en la muestra mediante un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia. Este método constituye uno de los procedimientos estandarizados más utilizados para evaluar las condiciones ácido-base del agua (APHA, AWWA y WEF, 2017).

La conductividad eléctrica fue determinada mediante el método SM 2510 B, basado en la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica debido a la presencia de especies iónicas disueltas. Este parámetro proporciona una estimación indirecta del contenido total de sales disueltas y constituye un indicador ampliamente utilizado para la caracterización fisicoquímica de aguas superficiales (APHA, AWWA y WEF, 2017).

La turbidez fue determinada mediante el método nefelométrico SM 2130 B, el cual cuantifica la dispersión de un haz de luz producida por partículas suspendidas

presentes en el agua. Los resultados se expresaron en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) y permitieron caracterizar la presencia de material particulado en suspensión (APHA, AWWA y WEF, 2017).

La concentración de cromo hexavalente Cr(VI) fue determinada mediante el método colorimétrico SM 3500-Cr D, basado en la reacción del Cr(VI) con difenilcarbazida en medio ácido, formando un complejo de color rojo-violeta cuya intensidad es proporcional a la concentración presente en la muestra y es medida espectrofotométricamente. Este método presenta alta sensibilidad para la determinación de bajas concentraciones de Cr(VI) y es ampliamente utilizado en el monitoreo ambiental de aguas superficiales y residuales (APHA, AWWA y WEF, 2017).

De acuerdo con los informes de ensayo emitidos por el laboratorio, las determinaciones fueron realizadas utilizando metodologías estandarizadas y los resultados fueron expresados en las unidades correspondientes a cada parámetro. En el caso del cromo hexavalente, el método empleado presentó un límite de reporte inferior a 0,001 mg/L, valor utilizado para informar las muestras en las cuales la concentración del analito fue inferior a dicho límite de cuantificación.

Una vez concluidas las determinaciones analíticas, los resultados fueron registrados en los informes de ensayo y posteriormente sistematizados en bases de datos digitales para su procesamiento y análisis. Los valores obtenidos fueron comparados con los criterios de calidad establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2, con el propósito de evaluar las condiciones fisicoquímicas observadas durante la campaña de muestreo.

Considerando el alcance metodológico de la investigación, las determinaciones analíticas permitieron caracterizar las condiciones fisicoquímicas del agua superficial y determinar la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en los puntos de monitoreo evaluados.

3.6 Procesamiento y análisis de datos

Una vez concluidos los análisis de laboratorio, los resultados correspondientes a la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez fueron registrados y organizados en hojas de cálculo electrónicas para su sistematización, control y procesamiento. Posteriormente, se verificó la consistencia de la información mediante la revisión de los informes de ensayo emitidos por el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción (FACEN-UNA), comprobando la correspondencia entre los códigos de identificación de las muestras y los resultados analíticos obtenidos.

Con el propósito de facilitar el análisis de la información, se elaboraron tablas comparativas y gráficos descriptivos que permitieron visualizar la distribución espacial de los parámetros evaluados en los diferentes puntos de monitoreo del arroyo Caañabé. Estas representaciones facilitaron la descripción de las características fisicoquímicas observadas y la identificación de diferencias entre los puntos evaluados durante la campaña de muestreo.

Los resultados obtenidos fueron comparados entre los cuatro puntos de monitoreo con el objetivo de identificar variaciones espaciales en la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez. Asimismo, los valores determinados fueron contrastados con los criterios de calidad establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2, permitiendo verificar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente y contextualizar los resultados obtenidos.

La interpretación de los resultados se complementó con la información recopilada durante el trabajo de campo, la cartografía temática elaborada mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), la información bibliográfica consultada y las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales del área de estudio. La integración de estas fuentes permitió contextualizar espacialmente los resultados

analíticos y describir las condiciones fisicoquímicas observadas en el tramo evaluado del arroyo Caañabé.

Considerando que la investigación se desarrolló a partir de una única campaña de muestreo y de cuatro puntos de monitoreo, el procesamiento de los datos tuvo un carácter exclusivamente descriptivo. En consecuencia, no se realizaron análisis estadísticos inferenciales ni se establecieron relaciones causales entre las variables evaluadas. Las diferencias observadas entre los puntos de monitoreo corresponden únicamente a las condiciones registradas durante la campaña realizada el 24 de mayo de 2026, por lo que los resultados no deben extrapolarse a otras condiciones hidrológicas o estacionales.

Finalmente, las interpretaciones realizadas se limitaron al alcance de las variables efectivamente determinadas durante la investigación, correspondiendo a una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé. En este sentido, el estudio no pretende describir procesos hidrogeoquímicos complejos ni establecer mecanismos de especiación, transformación o movilidad del cromo, ya que dichas interpretaciones requieren la determinación de parámetros complementarios que no fueron considerados dentro del alcance de la presente investigación.

3.7 Elaboración cartográfica y análisis espacial

La elaboración cartográfica y el análisis espacial se realizaron mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizando el *software QGIS*, con el propósito de representar el área de estudio, los puntos de monitoreo y las principales características físicas y ambientales de la cuenca del arroyo Caañabé. Estas herramientas permitieron integrar la información obtenida durante el trabajo de campo con la cartografía oficial disponible.

Como insumo cartográfico se emplearon capas de información correspondientes a hidrografía, geología, hidrogeología, límites administrativos, red vial, uso y cobertura del suelo e imágenes satelitales, obtenidas a partir de fuentes oficiales y de información geoespacial previamente procesada. Asimismo, se incorporaron las coordenadas de los puntos de monitoreo registradas mediante un

sistema de posicionamiento global (*GPS*) en coordenadas UTM. Las principales fuentes cartográficas utilizadas durante la investigación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Fuentes cartográficas utilizadas durante la investigación

Información cartográfica	Fuente	Sistema de coordenadas	Escala / Resolución	Fecha de actualización
Hidrografía	MADES	UTM WGS 84 Zona 21 Sur	Según cartografía oficial	2024
Geología	MADES	UTM WGS 84 Zona 21 Sur	1:250.000	2024
Hidrogeología	MADES	UTM WGS 84 Zona 21 Sur	1:250.000	2024
Red vial	MOPC	UTM WGS 84 Zona 21 Sur	Según cartografía oficial	2023
Límites administrativos	INE	UTM WGS 84 Zona 21 Sur	Según cartografía oficial	2024
Imágenes satelitales	Landsat (USGS)	UTM WGS 84 Zona 21 Sur	30 m	2000–2025

Fuente: Elaboración propia (2026).

Mediante las herramientas disponibles en *QGIS* se elaboraron los mapas temáticos correspondientes a la ubicación del área de estudio, la distribución de los puntos de monitoreo, la geología, la hidrogeología, la red hidrográfica y la localización de actividades potencialmente generadoras de contaminación, particularmente establecimientos dedicados al curtido de cueros.

Asimismo, se calcularon las distancias aproximadas entre los establecimientos de curtiembre identificados y el tramo del arroyo Caañabé considerado en la investigación mediante las herramientas de medición espacial disponibles en *QGIS*, determinándose la distancia lineal entre cada establecimiento y el cauce principal. Estos valores fueron utilizados como criterio de apoyo para la selección de los puntos de monitoreo y para contextualizar espacialmente los resultados obtenidos durante la investigación.

El procesamiento de imágenes satelitales permitió elaborar los mapas de clasificación supervisada del uso y cobertura del suelo empleados para la caracterización ambiental de la cuenca. Para ello se utilizaron imágenes Landsat previamente procesadas y clasificadas mediante técnicas de clasificación supervisada, utilizando muestras de entrenamiento representativas para cada categoría temática. Los productos cartográficos obtenidos permitieron identificar la distribución espacial de las principales coberturas presentes dentro del área de estudio y apoyar la caracterización ambiental de la cuenca.

La cartografía temática elaborada permitió integrar la información obtenida durante el trabajo de campo con las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales de la cuenca, facilitando la contextualización espacial de los resultados analíticos y la descripción de las condiciones fisicoquímicas observadas durante la campaña de muestreo.

Los análisis espaciales desarrollados presentan las limitaciones propias de la resolución espacial de las imágenes satelitales utilizadas y de la precisión cartográfica de las capas oficiales empleadas. Asimismo, la precisión posicional de los puntos de monitoreo estuvo condicionada por la exactitud del sistema de posicionamiento global (*GPS*) utilizado durante el trabajo de campo. En consecuencia, las distancias calculadas, la delimitación espacial del tramo de estudio y los mapas temáticos elaborados constituyen herramientas de apoyo para la representación e interpretación espacial de los resultados, sin reemplazar las observaciones directas realizadas durante la campaña de muestreo.

3.8 Criterios para la interpretación de resultados

La interpretación de los resultados se realizó considerando el alcance metodológico de la investigación y las variables efectivamente determinadas durante la campaña de muestreo. Para ello se integraron la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez con la información geológica, hidrogeológica, ambiental y cartográfica disponible para la cuenca del arroyo Caañabé. Este procedimiento permitió contextualizar los resultados obtenidos dentro

de las condiciones físicas y ambientales del área de estudio, sin exceder el alcance de las determinaciones efectuadas.

Cada uno de los parámetros analizados fue interpretado de acuerdo con su utilidad para la caracterización fisicoquímica del agua superficial. La concentración de cromo hexavalente Cr(VI) constituyó la variable principal de estudio y permitió verificar la presencia o ausencia de este contaminante en los puntos de monitoreo evaluados. El pH fue utilizado para describir las condiciones ácido-base del agua superficial; la conductividad eléctrica permitió evaluar de manera indirecta el contenido de especies iónicas disueltas; mientras que la turbidez fue empleada como indicador de la presencia de partículas suspendidas en el agua. La interpretación conjunta de estos parámetros permitió caracterizar las condiciones fisicoquímicas observadas durante la campaña de muestreo.

En primera instancia, los resultados correspondientes a cada parámetro fueron analizados de forma individual para cada punto de monitoreo, con el propósito de identificar diferencias espaciales entre los sitios evaluados. Posteriormente, los valores fueron comparados entre sí para describir la variación observada a lo largo del tramo estudiado del arroyo Caañabé.

Los resultados obtenidos fueron comparados con los criterios de calidad establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2, permitiendo verificar el cumplimiento de los valores de referencia vigentes en Paraguay. Esta comparación constituyó el criterio principal para evaluar la calidad del agua superficial dentro del alcance de la investigación.

De manera complementaria, los resultados fueron contrastados con antecedentes científicos nacionales e internacionales relacionados con la calidad de aguas superficiales y la presencia de cromo hexavalente en sistemas acuáticos, con el propósito de contextualizar los valores observados dentro del conocimiento científico disponible.

La interpretación incorporó además las observaciones registradas durante el trabajo de campo, la cartografía temática elaborada mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la información geológica, hidrogeológica y ambiental disponible para la cuenca. La información geológica permitió contextualizar las características litológicas y geomorfológicas del área de estudio; la información hidrogeológica aportó elementos para comprender el contexto físico del sistema; la cartografía facilitó la representación espacial de los puntos de monitoreo y de las actividades potencialmente generadoras de contaminación; mientras que las observaciones de campo permitieron complementar la descripción de las condiciones ambientales registradas durante la campaña de muestreo.

Considerando que la investigación se desarrolló mediante una única campaña de muestreo y un número reducido de puntos de monitoreo, las interpretaciones realizadas se limitaron exclusivamente a las condiciones observadas durante el período de estudio. En consecuencia, no se realizaron análisis estadísticos inferenciales, no se establecieron relaciones causales entre las variables evaluadas y no se infirieron procesos hidrogeoquímicos que requieran la determinación de parámetros complementarios no considerados en la presente investigación.

Finalmente, la interpretación de los resultados se restringió al alcance de las variables efectivamente determinadas en laboratorio, constituyendo una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé. En este sentido, los resultados obtenidos representan una línea base para futuras investigaciones y programas de monitoreo ambiental orientados a ampliar el conocimiento sobre la calidad del agua en este sistema fluvial.

3.9 Limitaciones del estudio

Los resultados obtenidos en la presente investigación deben interpretarse considerando el alcance metodológico del estudio. La evaluación se desarrolló a partir de una única campaña de muestreo; por lo tanto, los resultados representan exclusivamente las condiciones fisicoquímicas observadas durante el período

evaluado y no deben extrapolarse a otras épocas del año ni utilizarse para describir la variabilidad temporal del sistema fluvial.

Asimismo, la investigación se centró exclusivamente en la caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del arroyo Caañabé mediante la determinación de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez. En consecuencia, las interpretaciones realizadas se limitaron a las variables efectivamente determinadas y no permiten establecer relaciones causales entre las actividades potencialmente generadoras de contaminación y la presencia o ausencia de cromo hexavalente en el sistema.

La caracterización espacial se realizó mediante cuatro puntos de monitoreo distribuidos a lo largo del cauce principal del arroyo Caañabé. Si bien esta distribución permitió cumplir los objetivos planteados en la investigación, los resultados representan únicamente las condiciones observadas en los sectores efectivamente evaluados y no deben considerarse representativos de toda la cuenca hidrográfica.

El estudio tampoco incluyó la determinación de parámetros complementarios, tales como el potencial de oxidación-reducción (Eh), el oxígeno disuelto, el carbono orgánico disuelto, la alcalinidad, el análisis de sedimentos, el cromo total u otras especies químicas del cromo. La ausencia de estas determinaciones limita la posibilidad de interpretar procesos relacionados con la transformación, distribución y comportamiento del cromo en el sistema acuático, por lo que las posibles explicaciones planteadas durante la discusión corresponden a interpretaciones sustentadas en la literatura científica y no a procesos demostrados experimentalmente en el presente estudio.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación no contempló réplicas temporales de muestreo ni procedimientos específicos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) durante el trabajo de campo, tales como muestras duplicadas, blancos de campo o muestras de control. En consecuencia, los resultados obtenidos constituyen una descripción puntual de las condiciones fisicoquímicas del agua

superficial durante la campaña de muestreo y no permiten evaluar la variabilidad temporal del sistema.

Las limitaciones descritas no invalidan los resultados obtenidos, sino que delimitan el alcance de las interpretaciones realizadas. En este sentido, la presente investigación constituye una primera línea base sobre las condiciones fisicoquímicas del agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé y aporta información de referencia para el desarrollo de futuras investigaciones y programas de monitoreo ambiental. No obstante, debido al alcance metodológico del estudio, los resultados obtenidos no permiten descartar la existencia de procesos de contaminación por cromo en otros sectores de la cuenca o en diferentes épocas del año, sino únicamente describir las condiciones observadas durante el período evaluado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Caracterización hidrogeoquímica del agua superficial del arroyo caañabé

Los análisis fisicoquímicos realizados en las muestras de agua superficial recolectadas en los puntos AC1, AC2, AC3 y AC4 permitieron caracterizar las condiciones hidrogeoquímicas del arroyo Caañabé durante la campaña de muestreo desarrollada en mayo de 2026. Los valores obtenidos para el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez y la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos y concentración de cromo hexavalente Cr(VI).

Punto	Ph	Conductividad (μ S/cm)	Turbidez (UTN)	Cr(VI) (mg/L)
AC1	7,44	117,2	19,90	<0,001
AC2	7,80	114,2	16,90	<0,001
AC3	7,85	91,0	16,10	<0,001
AC4	7,80	92,7	15,70	<0,001

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del Laboratorio de Calidad de Agua de FACEN-UNA (2026).

En términos generales, los parámetros fisicoquímicos presentaron baja variabilidad entre los cuatro puntos de monitoreo evaluados. Asimismo, las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) determinadas en todas las muestras fueron inferiores al límite de reporte del método analítico empleado (<0,001 mg/L), por lo que se destacaron concentraciones cuantificables de este contaminante durante la campaña de muestreo.

Con el propósito de resumir el comportamiento general de los parámetros analizados, en la Tabla 6 se presentan los estadísticos descriptivos correspondientes a los valores mínimo, máximo y promedio obtenidos durante la campaña.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio
Ph	7,44	7,85	7,72
Conductividad (µS/cm)	91,0	117,2	103,8
Turbidez (UTN)	15,70	19,90	17,15

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los estadísticos descriptivos evidencian una reducida variación entre los valores registrados en los diferentes puntos de monitoreo, lo que indica que, durante la campaña realizada, las condiciones fisicoquímicas del agua superficial fueron relativamente homogéneas en el tramo evaluado del arroyo Caañabé.

4.1.2 Potencial de hidrógeno (pH)

4.1.2.1 Resultados

Los valores de pH determinados en las muestras de agua superficial del arroyo Caañabé oscilaron entre 7,44 y 7,85, con un valor promedio de 7,72 (Tabla 6). El valor mínimo fue registrado en el punto AC1, localizado aguas abajo, mientras que

el valor máximo correspondió al punto AC3, ubicado en el sector medio superior del arroyo.

Como se observa en el gráfico 1, los valores de pH presentaron baja variabilidad espacial, manteniéndose dentro de un intervalo relativamente estrecho. Los puntos AC2, AC3 y AC4 registraron valores muy similares, mientras que el punto AC1 presentó un valor ligeramente inferior al de los demás sitios evaluados.

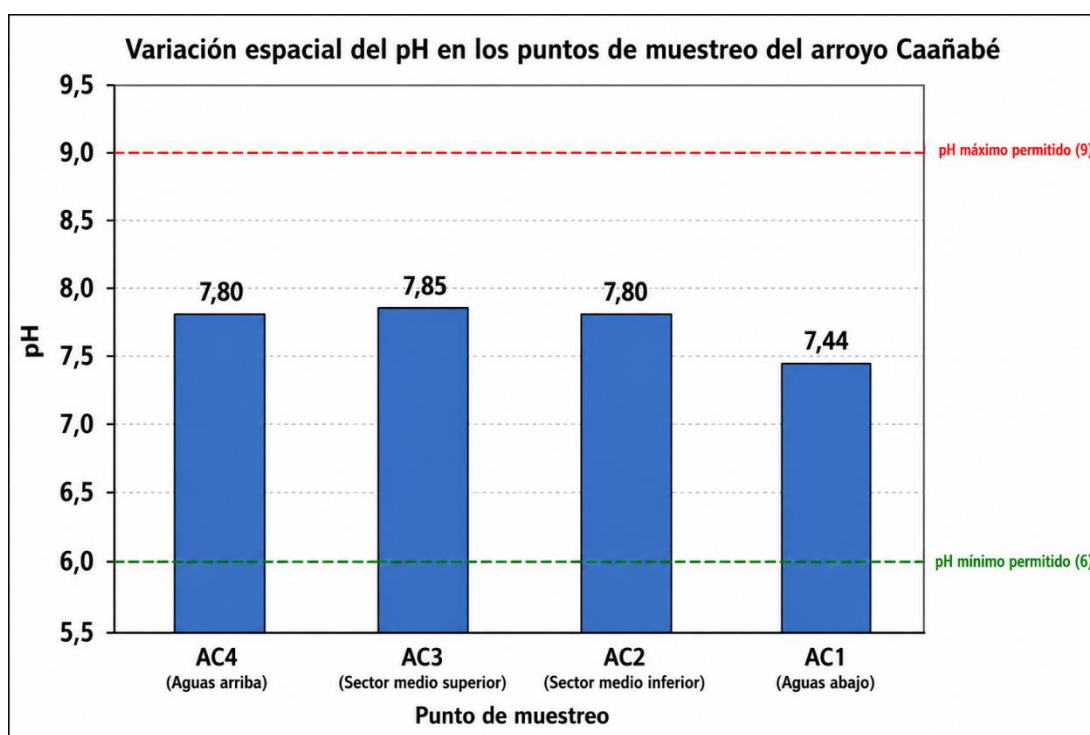


Figura 19. Variación espacial de los valores de pH en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los valores obtenidos se mantuvieron dentro del intervalo establecido por la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2 (pH entre 6 y 9), indicando que durante el período de estudio las condiciones ácido-base del agua cumplieron con los criterios de calidad ambiental establecidos por la normativa vigente.

4.1.2.2 Discusión

Los valores de pH registrados durante la campaña de monitoreo oscilaron entre 7,44 y 7,85, indicando que el agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé presentó condiciones neutras a ligeramente alcalinas. Estos valores muestran que el sistema no presentó condiciones ácidas ni alcalinas extremas durante el período de estudio, manteniéndose dentro del intervalo establecido por la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2.

La diferencia entre el valor mínimo registrado en el punto AC1 y el valor máximo observado en AC3 fue reducida, evidenciando una baja variación espacial del pH a lo largo del tramo evaluado. Esta homogeneidad sugiere que las condiciones ácido-base del agua permanecieron relativamente estables durante la campaña de muestreo y que no se registraron cambios importantes entre los distintos puntos de monitoreo.

Las condiciones neutras a ligeramente alcalinas registradas también pueden estar relacionadas con las características naturales de la cuenca. El arroyo Caañabé drena un área dominada por depósitos aluviales cuaternarios y materiales sedimentarios, cuya interacción con el agua puede contribuir al mantenimiento de valores de pH próximos a la neutralidad (Hem, 1985; Appelo y Postma, 2005). Asimismo, la ausencia de variaciones marcadas entre los puntos de monitoreo sugiere que, durante la campaña de estudio, no existieron procesos capaces de modificar significativamente las condiciones ácido-base del agua a lo largo del tramo evaluado.

El comportamiento del pH fue consistente con los resultados obtenidos para la conductividad eléctrica y la turbidez. La conductividad eléctrica presentó valores bajos a moderados y sin incrementos abruptos entre los puntos de monitoreo, mientras que la turbidez mostró una baja variabilidad espacial. En conjunto, estos parámetros describen condiciones fisicoquímicas relativamente homogéneas en el agua superficial del arroyo Caañabé durante la campaña de muestreo.

De acuerdo con Richard y Bourg (1991) y Appelo y Postma (2005), el pH constituye uno de los principales parámetros utilizados para caracterizar las condiciones químicas del agua y puede influir en el comportamiento de diferentes especies químicas presentes en sistemas acuáticos. En la presente investigación, este parámetro permitió contextualizar los resultados obtenidos para el cromo hexavalente Cr(VI), al describir las condiciones ácido-base bajo las cuales se realizó la evaluación.

Durante la campaña de monitoreo, las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) fueron inferiores al límite de reporte del método analítico ($<0,001$ mg/L) en todos los puntos de monitoreo. En consecuencia, no se detectaron concentraciones cuantificables de este contaminante en el agua superficial del tramo evaluado, por lo que no fue posible establecer una relación directa entre los valores de pH registrados y la presencia o ausencia de Cr(VI).

En este contexto, el pH constituyó un parámetro útil para caracterizar las condiciones fisicoquímicas del agua superficial y complementar la interpretación conjunta con la conductividad eléctrica, la turbidez y la concentración de cromo hexavalente Cr(VI). Los resultados obtenidos indican que las condiciones ácido-base del agua permanecieron relativamente uniformes durante la campaña de estudio y constituyen un parámetro de referencia para la caracterización fisicoquímica puntual del tramo evaluado del arroyo Caañabé.

4.1.3 Conductividad eléctrica

4.1.3.1 Resultados

Los valores de conductividad eléctrica registrados en el agua superficial del arroyo Caañabé oscilaron entre 91,0 y 117,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor promedio de 103,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 6). El valor mínimo fue registrado en el punto de monitoreo AC3, mientras que el valor máximo correspondió al punto AC1.

Como se observa en el gráfico 2, la conductividad eléctrica presentó una variación espacial reducida entre los cuatro puntos de monitoreo. Los valores más

elevados fueron registrados en los puntos AC1 y AC2, mientras que los menores valores correspondieron a AC3 y AC4.

En términos generales, la conductividad eléctrica presentó una distribución relativamente homogénea a lo largo del tramo evaluado, sin incrementos abruptos entre los puntos de monitoreo durante la campaña realizada.

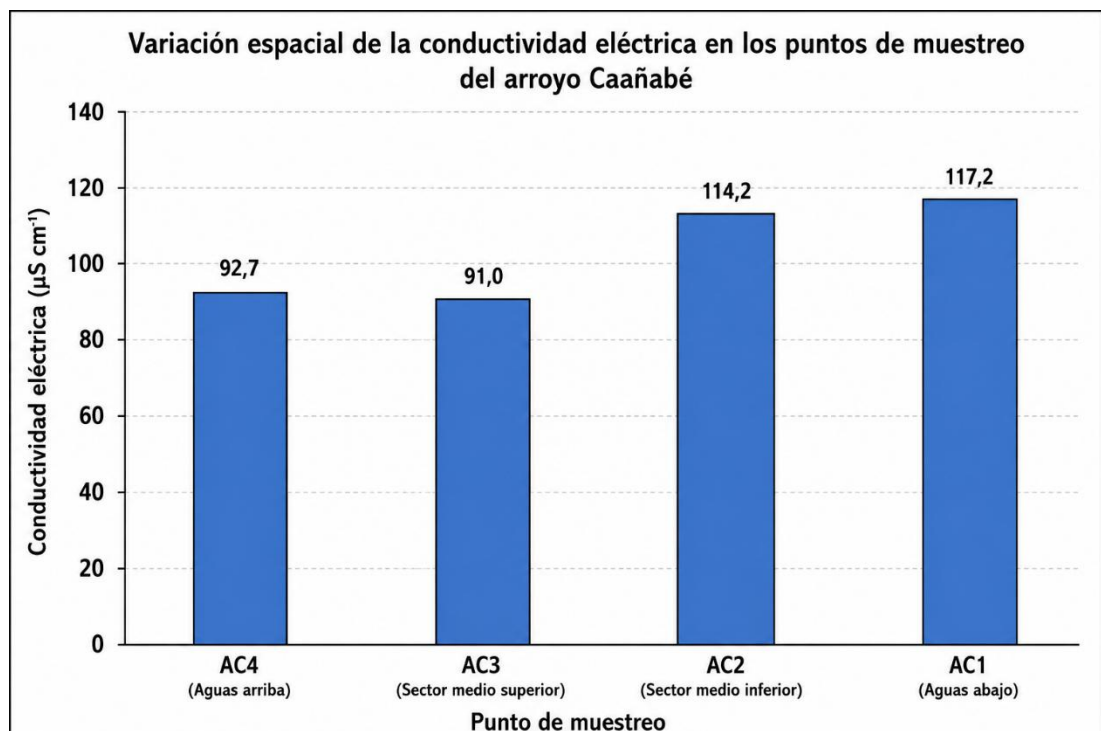


Figura 20. Variación espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La diferencia entre el valor máximo (117,2 µS/cm) y el mínimo (91,0 µS/cm) fue de 26,2 µS/cm, manteniéndose todos los valores dentro de un intervalo reducido. Estos resultados evidencian una baja variabilidad espacial de la conductividad eléctrica durante el período de estudio.

4.1.3.2 Discusión

Los valores de conductividad eléctrica registrados en el arroyo Caañabé oscilaron entre 91,0 y 117,2 µS/cm, evidenciando una baja variabilidad entre los cuatro puntos de monitoreo evaluados. Estos resultados indican que, durante la campaña de

muestreo, el agua superficial presentó una reducida concentración de especies iónicas disueltas y un comportamiento relativamente homogéneo a lo largo del tramo estudiado.

De acuerdo con Appelo y Postma (2005), la conductividad eléctrica constituye un indicador indirecto del contenido de iones disueltos en el agua y es ampliamente utilizada para describir el grado de mineralización de los sistemas acuáticos. Los valores obtenidos en esta investigación corresponden a un agua con baja mineralización, condición que puede estar relacionada con las características geológicas de la cuenca, dominada por depósitos aluviales cuaternarios y materiales sedimentarios, así como con el aporte de aguas meteóricas y el limitado tiempo de interacción entre el agua superficial y los materiales geológicos. Estas condiciones favorecen concentraciones relativamente bajas de sales disueltas y, en consecuencia, valores moderados de conductividad eléctrica.

La reducida variación observada entre los cuatro puntos de monitoreo sugiere que no existieron aportes importantes de sustancias iónicas disueltas capaces de modificar significativamente la composición química del agua a lo largo del tramo evaluado durante la campaña de muestreo. Asimismo, la ausencia de incrementos bruscos de la conductividad eléctrica indica que, bajo las condiciones registradas, no se evidenciaron cambios importantes en el contenido de sales disueltas entre los diferentes sitios evaluados.

El comportamiento de la conductividad eléctrica fue consistente con los resultados obtenidos para el pH y la turbidez, parámetros que también presentaron escasa variabilidad espacial. En conjunto, estos resultados describen un sistema con condiciones fisicoquímicas relativamente homogéneas durante el período de estudio y reflejan un comportamiento similar de los principales indicadores determinados en el agua superficial.

Durante la campaña de monitoreo, las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) fueron inferiores al límite de reporte del método analítico ($<0,001$ mg/L) en

todos los puntos de monitoreo. En consecuencia, la conductividad eléctrica únicamente permitió contextualizar las condiciones de mineralización del agua durante el período de estudio, sin que fuera posible establecer una relación directa entre este parámetro y la presencia o ausencia de cromo hexavalente Cr(VI).

Considerando que la investigación se desarrolló mediante una única campaña de muestreo y un número reducido de puntos de monitoreo, los resultados representan exclusivamente las condiciones registradas durante el período evaluado. En este sentido, futuras investigaciones que incluyan diferentes épocas del año permitirán evaluar la variabilidad temporal de la conductividad eléctrica y su comportamiento bajo distintas condiciones hidrológicas.

4.1.4 Turbidez

4.1.4.1 Resultados

Los valores de turbidez registrados en el arroyo Caañabé oscilaron entre 15,70 y 19,90 UTN, con un valor promedio de 17,15 UTN (Tabla 6). El valor mínimo fue registrado en el punto AC4, mientras que el valor máximo correspondió al punto AC1.

Como se observa en el gráfico 3, la turbidez presentó una variación moderada entre los puntos de monitoreo, registrándose los valores más elevados en los sectores ubicados aguas abajo y los menores valores en los puntos localizados aguas arriba.

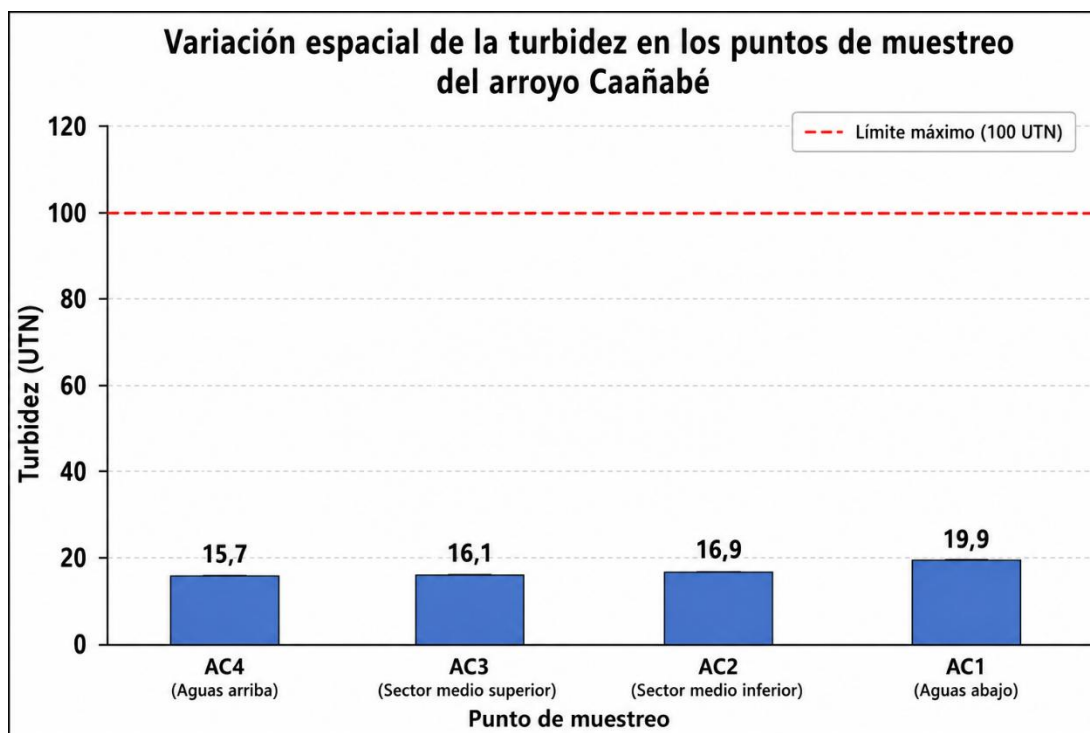


Figura 21. Variación espacial de la turbidez en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.
Fuente: Elaboración propia (2026).

4.1.4.2 Discusión

Los valores de turbidez registrados en el arroyo Caañabé oscilaron entre 15,70 y 19,90 UNT, presentando una baja variabilidad entre los cuatro puntos de monitoreo evaluados. Estos resultados indican que, durante la campaña de muestreo, el agua superficial presentó una reducida variación en la cantidad de partículas suspendidas a lo largo del tramo estudiado.

La turbidez constituye un parámetro ampliamente utilizado para describir la presencia de partículas suspendidas en el agua, tales como sedimentos finos, arcillas, materia orgánica y otros materiales transportados por el flujo del agua (APHA, AWWA y WEF, 2017). Los valores registrados en esta investigación indican que el agua presentó una carga moderada de material suspendido y sin cambios importantes entre los puntos de monitoreo, reflejando condiciones relativamente uniformes durante el período evaluado.

Los valores obtenidos también pueden estar relacionados con las características naturales del sistema fluvial. El tramo evaluado del arroyo Caañabé se desarrolla sobre una planicie aluvial de baja pendiente, donde predominan procesos de transporte y deposición de sedimentos finos. Bajo estas condiciones, y en ausencia de eventos hidrológicos extremos durante la campaña de muestreo, es esperable que la cantidad de material suspendido permanezca relativamente estable a lo largo del cauce.

Se observó un ligero incremento de la turbidez en los puntos ubicados aguas abajo, comportamiento que podría estar asociado al aporte progresivo de sedimentos transportados por el flujo del agua, a la incorporación de escorrentía superficial o al ingreso de pequeños tributarios a lo largo del recorrido del arroyo. No obstante, la diferencia observada fue reducida y no permite atribuir esta variación a una fuente específica de contaminación ni a un proceso determinado dentro de la cuenca.

La distribución espacial de la turbidez fue consistente con el comportamiento observado para el pH y la conductividad eléctrica, parámetros que también presentaron escasa variabilidad entre los sitios de monitoreo. En conjunto, estos resultados describen un sistema con condiciones fisicoquímicas relativamente homogéneas durante la campaña de estudio.

Durante la campaña de monitoreo, las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) fueron inferiores al límite de reporte del método analítico ($<0,001$ mg/L) en todos los puntos de monitoreo. En consecuencia, la turbidez permitió únicamente contextualizar las condiciones físicas del agua durante el período evaluado, sin que fuera posible establecer una relación directa entre este parámetro y la presencia o ausencia de cromo hexavalente Cr(VI).

4.1.5 Cromo hexavalente Cr(VI)

4.1.5.1 Resultados

Las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) determinadas en los cuatro puntos de monitoreo del arroyo Caañabé fueron inferiores al límite de detección del método analítico empleado ($<0,001$ mg/L), tal como se observa en el gráfico 4.

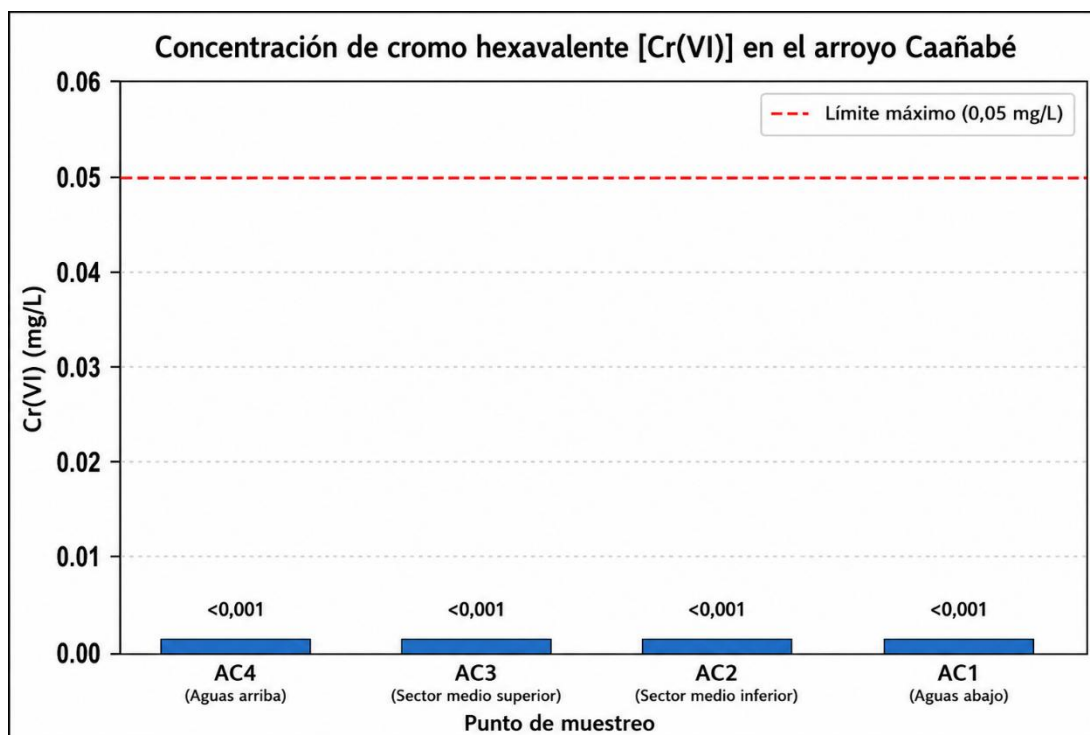


Figura 22. Concentración de cromo hexavalente Cr(VI) en los puntos de muestreo del arroyo Caañabé.

Fuente: Elaboración propia (2026).

En todos los puntos evaluados (AC1, AC2, AC3 y AC4), las concentraciones determinadas fueron considerablemente inferiores al límite máximo permisible de 0,05 mg/L establecido por la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2. Asimismo, no se observaron diferencias espaciales entre los puntos de monitoreo, debido a que todas las muestras presentaron concentraciones inferiores al límite de detección del método analítico empleado.

4.1.5.2 Discusión

El principal hallazgo de la presente investigación fue que las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) determinadas en los cuatro puntos de monitoreo fueron inferiores al límite de reporte del método analítico (<0,001 mg/L). Este resultado indica que, durante la campaña de muestreo, no se detectaron concentraciones cuantificables de Cr(VI) en el agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé.

Es importante señalar que un resultado inferior al límite de reporte del método analítico indica únicamente que la concentración de Cr(VI) fue menor que la capacidad

de cuantificación del procedimiento utilizado. En consecuencia, este resultado no debe interpretarse como la ausencia absoluta de cromo hexavalente en el sistema, sino como la ausencia de concentraciones cuantificables bajo las condiciones de muestreo y con la sensibilidad analítica del método empleado.

La comparación con la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2 evidenció que las concentraciones determinadas fueron considerablemente inferiores al valor máximo permitido de 0,05 mg/L. Asimismo, la ausencia de diferencias entre los cuatro puntos de monitoreo indica que, durante la campaña de estudio, no se registraron variaciones espaciales cuantificables en la concentración de Cr(VI) dentro del tramo evaluado.

La ausencia de concentraciones detectables de Cr(VI) pudo estar asociada a diferentes factores que, de manera individual o combinada, influyeron sobre las condiciones observadas durante la campaña de muestreo. En primer lugar, durante el trabajo de campo no se observaron evidencias de descargas activas de efluentes con características compatibles con aportes recientes de compuestos de cromo hacia el cauce principal. Aunque en el área de estudio se identificaron establecimientos potencialmente generadores de este contaminante, la ausencia de aportes directos durante el período de evaluación pudo contribuir a que las concentraciones permanecieran por debajo del límite de reporte del método analítico.

Asimismo, las condiciones hidrológicas registradas durante el período de estudio pudieron favorecer procesos naturales de dilución. La ocurrencia de precipitaciones previas a la campaña y el consecuente incremento del caudal pueden reducir temporalmente la concentración de sustancias disueltas cuando no existen aportes continuos de contaminantes (Chapman, 1996). En este sentido, la dilución constituye una explicación plausible para los resultados obtenidos, aunque esta posibilidad no fue evaluada directamente en la presente investigación.

Otra posible explicación corresponde a la retención del cromo en los sedimentos del cauce. Diversos autores señalan que una fracción importante del cromo

presente en ambientes acuáticos puede permanecer asociada a partículas minerales, materia orgánica y sedimentos de fondo, reduciendo su concentración en la fase acuosa (Förstner y Wittmann, 1981; Alloway, 2013). Debido a que en este estudio no se realizaron análisis de sedimentos, no fue posible verificar si parte del cromo presente en el sistema se encontraba retenido en esta matriz ambiental.

De igual manera, la literatura indica que el cromo puede presentarse en diferentes estados de oxidación. Bajo determinadas condiciones ambientales, el cromo hexavalente Cr(VI) puede transformarse en cromo trivalente Cr(III), especie caracterizada por una menor solubilidad y movilidad en el agua (Richard y Bourg, 1991). Sin embargo, dado que en esta investigación no se determinaron parámetros como el potencial de oxidación-reducción (Eh), el oxígeno disuelto, el carbono orgánico disuelto ni el cromo total, esta posibilidad debe considerarse únicamente como una explicación sustentada en antecedentes científicos y no como un proceso demostrado para el arroyo Caañabé.

También debe considerarse que la presente investigación se desarrolló mediante una única campaña de muestreo, por lo que los resultados representan exclusivamente las condiciones registradas durante ese período. La concentración de contaminantes en sistemas fluviales puede variar en función del régimen hidrológico, de las condiciones climáticas y de la ocurrencia de descargas eventuales, por lo que estudios desarrollados en diferentes épocas del año podrían registrar comportamientos distintos a los observados en esta investigación.

Finalmente, la interpretación conjunta de los resultados obtenidos para el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez permitió contextualizar las condiciones fisicoquímicas observadas durante la campaña de muestreo. Estos parámetros presentaron una baja variabilidad espacial y describieron un sistema relativamente homogéneo durante el período evaluado. No obstante, considerando que las concentraciones de Cr(VI) fueron inferiores al límite de reporte del método analítico, no fue posible establecer relaciones cuantitativas entre este contaminante y los parámetros fisicoquímicos determinados.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que, durante la campaña de muestreo, no se detectaron concentraciones cuantificables de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé. Las posibles explicaciones planteadas corresponden a hipótesis sustentadas en la literatura científica y deberán ser evaluadas mediante futuras investigaciones que incorporen campañas de muestreo en diferentes épocas del año, el análisis de sedimentos y la determinación de parámetros hidrogeoquímicos complementarios.

4.2 Posibles factores asociados a la no detección de cromo hexavalente Cr(VI)

Los resultados obtenidos durante la presente investigación evidenciaron que las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) determinadas en los cuatro puntos de monitoreo fueron inferiores al límite de reporte del método analítico ($<0,001$ mg/L). Este resultado constituye el principal hallazgo del estudio y permite afirmar que, bajo las condiciones registradas durante la campaña de muestreo, no se detectaron concentraciones cuantificables de Cr(VI) en el agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé.

Desde el punto de vista analítico, un resultado inferior al límite de reporte indica únicamente que la concentración del analito fue menor que la capacidad de cuantificación del método empleado. En consecuencia, este resultado no debe interpretarse como la ausencia absoluta de cromo hexavalente en el sistema, sino como la ausencia de concentraciones cuantificables bajo las condiciones de muestreo y con la sensibilidad analítica alcanzada durante la investigación.

La no detección de Cr(VI) puede estar asociada a diferentes factores que actuaron de manera individual o combinada durante el período de estudio. Debido a que la presente investigación se limitó a la determinación de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez, las explicaciones desarrolladas a continuación corresponden a posibles factores sustentados en antecedentes científicos, sin que ello implique que hayan sido demostrados experimentalmente para el arroyo Caañabé.

En primer lugar, una posible explicación corresponde a la ausencia de descargas activas de compuestos de cromo durante la campaña de muestreo. Si bien el análisis espacial permitió identificar establecimientos dedicados al curtido de cueros dentro del área de influencia del arroyo Caañabé, la existencia de estas actividades no implica necesariamente la descarga continua de efluentes hacia el cauce principal. La incorporación de compuestos de cromo a los cuerpos de agua depende de factores como la operación de los establecimientos, el tratamiento previo de los efluentes, la frecuencia de descarga y la conectividad entre las fuentes potenciales de contaminación y el sistema fluvial. Durante el reconocimiento de campo se registraron algunas evidencias de descargas hacia el arroyo; sin embargo, estas observaciones constituyeron únicamente información de apoyo y no fueron objeto de análisis fisicoquímico, por lo que no es posible establecer si dichas descargas contenían cromo ni determinar su influencia sobre la calidad del agua.

Asimismo, las condiciones hidrológicas registradas durante el período de estudio pudieron favorecer procesos naturales de dilución. De acuerdo con Chapman (1996), el incremento del caudal como consecuencia de eventos de precipitación puede reducir temporalmente la concentración de sustancias disueltas cuando no existen aportes continuos de contaminantes. En el caso del arroyo Caañabé, esta condición pudo contribuir a disminuir la concentración de Cr(VI) en la fase acuosa hasta niveles inferiores al límite de reporte del método analítico. No obstante, debido a que la presente investigación no incluyó mediciones de caudal ni campañas repetidas bajo diferentes condiciones hidrológicas, esta explicación debe considerarse únicamente como una posibilidad sustentada en la literatura científica.

Otra explicación posible corresponde a la retención del cromo en los sedimentos del cauce. Diversos estudios indican que una fracción importante del cromo presente en ambientes acuáticos puede permanecer asociada a partículas minerales, materia orgánica y sedimentos de fondo, reduciendo su concentración en la fase acuosa (Förstner y Wittmann, 1981; Alloway, 2013). Debido a que esta investigación se centró exclusivamente en el análisis del agua superficial, no fue posible determinar si parte del cromo presente en el sistema se encontraba retenido en

los sedimentos, por lo que esta posibilidad no puede ser confirmada ni descartada con los datos obtenidos.

De igual manera, la literatura científica señala que el cromo puede presentarse en diferentes estados de oxidación. Bajo determinadas condiciones ambientales, el cromo hexavalente Cr(VI) puede transformarse en cromo trivalente Cr(III), especie caracterizada por una menor solubilidad y movilidad en el agua (Richard y Bourg, 1991). Sin embargo, la presente investigación no contempló la determinación de parámetros como el potencial de oxidación-reducción (Eh), el oxígeno disuelto, el carbono orgánico disuelto o el cromo total, por lo que no es posible establecer si este proceso ocurrió en el arroyo Caañabé durante la campaña de muestreo. En consecuencia, esta explicación debe interpretarse únicamente como una posibilidad respaldada por antecedentes científicos.

También debe considerarse el alcance temporal de la investigación. La presente caracterización se realizó mediante una única campaña de muestreo, por lo que los resultados representan exclusivamente las condiciones registradas durante ese período. La concentración de contaminantes en sistemas fluviales puede variar en función de las condiciones hidrológicas, del régimen de precipitaciones, de la ocurrencia de descargas eventuales y de la dinámica propia de las actividades desarrolladas dentro de la cuenca. En este sentido, campañas realizadas en otras épocas del año podrían registrar condiciones diferentes a las observadas en la presente investigación.

Finalmente, debe considerarse la propia capacidad del método analítico utilizado. El resultado $<0,001$ mg/L indica que, si el cromo hexavalente estuvo presente en el agua superficial durante la campaña de muestreo, su concentración fue inferior al límite de reporte del procedimiento empleado. Por ello, la ausencia de concentraciones cuantificables no implica necesariamente la inexistencia absoluta del contaminante, sino que este, de haber estado presente, se encontraba en concentraciones inferiores a la sensibilidad analítica alcanzada.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la no detección de concentraciones cuantificables de cromo hexavalente Cr(VI) en el agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé pudo estar asociada a la interacción de diferentes factores naturales y metodológicos. Sin embargo, el diseño de la presente investigación no permite establecer cuál de ellos tuvo mayor influencia sobre los resultados obtenidos. En consecuencia, las explicaciones planteadas constituyen interpretaciones sustentadas en la literatura científica y representan hipótesis que deberán ser evaluadas mediante futuras investigaciones que incorporen campañas de muestreo en diferentes épocas del año, análisis de sedimentos, determinación de cromo total y la evaluación de parámetros hidrogeoquímicos complementarios.

5. CONCLUSIÓN

La presente investigación permitió realizar una caracterización fisicoquímica puntual del agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé, con énfasis en la evaluación de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI), mediante la determinación del pH, la conductividad eléctrica y la turbidez. Asimismo, los resultados obtenidos fueron comparados con los criterios establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2, permitiendo evaluar las condiciones fisicoquímicas del agua registradas durante la campaña de muestreo.

Se determinó que las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) en los cuatro puntos de monitoreo del arroyo Caañabé fueron inferiores al límite de reporte del método analítico ($<0,001$ mg/L). En consecuencia, durante la campaña de muestreo no se detectaron concentraciones cuantificables de este contaminante en el agua superficial del tramo evaluado, dando cumplimiento al primer objetivo específico de la investigación.

La caracterización de los parámetros fisicoquímicos evidenció condiciones relativamente homogéneas a lo largo del tramo evaluado del arroyo. Los valores de pH fueron neutros a ligeramente alcalinos (7,44–7,85), la conductividad eléctrica presentó valores comprendidos entre 91,0 y 117,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la turbidez osciló entre 15,70 y 19,90 UNT, describiendo una baja variabilidad espacial entre los puntos de monitoreo evaluados. Estos resultados permitieron cumplir el segundo objetivo específico de la investigación.

La comparación de los resultados obtenidos con los criterios establecidos en la Resolución SEAM N.º 222/2002 evidenció que todos los parámetros determinados se mantuvieron dentro de los límites correspondientes a aguas superficiales de Clase

2. Asimismo, las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) fueron considerablemente inferiores al valor máximo permitido por la normativa vigente, permitiendo cumplir el tercer objetivo específico de la investigación.

La interpretación de los resultados permitió caracterizar las condiciones fisicoquímicas del tramo evaluado del arroyo Caañabé a partir del análisis conjunto del pH, la conductividad eléctrica, la turbidez y la concentración de cromo hexavalente Cr(VI). Los resultados obtenidos describieron un sistema con condiciones fisicoquímicas relativamente homogéneas durante la campaña de muestreo y permitieron cumplir el cuarto objetivo específico de la investigación. Asimismo, la ausencia de concentraciones cuantificables de Cr(VI) fue consistente con las condiciones observadas durante el período de estudio, aunque las posibles explicaciones planteadas corresponden a factores sustentados en la literatura científica y no a procesos demostrados experimentalmente en la presente investigación.

Los resultados obtenidos fueron consistentes con la hipótesis descriptiva planteada, ya que las concentraciones de cromo hexavalente Cr(VI) determinadas durante la campaña de muestreo se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la Resolución SEAM N.º 222/2002 para aguas superficiales de Clase 2 y fueron coherentes con las condiciones fisicoquímicas registradas en los puntos de monitoreo evaluados. En consecuencia, los resultados respaldan la hipótesis descriptiva propuesta para las condiciones observadas durante la campaña de muestreo.

Finalmente, la presente investigación constituye una primera línea base sobre las condiciones fisicoquímicas del agua superficial del tramo evaluado del arroyo Caañabé y aporta información científica de referencia para futuros programas de monitoreo ambiental. No obstante, debido a que el estudio se desarrolló mediante una única campaña de muestreo y no incluyó el análisis de sedimentos, efluentes, tributarios ni la evaluación de la variabilidad temporal del sistema, los resultados obtenidos no permiten descartar la existencia de procesos de contaminación por cromo en la cuenca del arroyo Caañabé, sino únicamente describir las condiciones observadas durante el período evaluado. En este sentido, se recomienda desarrollar

investigaciones que incorporen campañas de monitoreo en distintas condiciones hidrológicas, un mayor número de puntos de muestreo y la determinación de parámetros complementarios, tales como el potencial de oxidación-reducción (Eh), el oxígeno disuelto, el carbono orgánico disuelto, el análisis de sedimentos, efluentes y la determinación de cromo total, con el propósito de ampliar el conocimiento sobre la calidad del agua superficial y la presencia de cromo en este sistema fluvial.

6. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y considerando el alcance de la presente investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y para el monitoreo ambiental del arroyo Caañabé.

Se recomienda realizar campañas de monitoreo durante diferentes épocas del año, incluyendo períodos de estiaje y de altas precipitaciones, con el fin de evaluar la variabilidad temporal de la concentración de cromo hexavalente Cr(VI) y de los principales parámetros fisicoquímicos del agua superficial, permitiendo establecer comparaciones entre diferentes condiciones hidrológicas.

Asimismo, se sugiere ampliar la red de monitoreo mediante la incorporación de un mayor número de puntos de muestreo, incluyendo tributarios, sectores ubicados aguas arriba y aguas abajo de establecimientos industriales y áreas próximas a posibles fuentes potenciales de contaminación, con el propósito de mejorar la representatividad espacial de futuras evaluaciones de la calidad del agua.

Se recomienda complementar el análisis de agua superficial con la determinación de cromo total y el estudio de los sedimentos de fondo, considerando que estas matrices pueden aportar información adicional sobre la distribución del cromo dentro del sistema fluvial y contribuir a una interpretación más completa de los resultados.

Del mismo modo, se considera conveniente incorporar parámetros fisicoquímicos complementarios, tales como el potencial de oxidación-reducción (Eh), el oxígeno disuelto, la alcalinidad y el carbono orgánico disuelto, con el propósito de

ampliar la caracterización de las condiciones del agua superficial y fortalecer la interpretación de futuros estudios.

Se recomienda mantener programas periódicos de monitoreo ambiental en la cuenca del arroyo Caañabé, considerando la presencia de actividades potencialmente generadoras de contaminación, particularmente establecimientos industriales vinculados al procesamiento de cueros y otras actividades productivas, con el fin de detectar oportunamente posibles variaciones en la calidad del agua superficial.

Asimismo, se recomienda continuar utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e imágenes satelitales para apoyar la caracterización ambiental de la cuenca, el seguimiento de los cambios en el uso y cobertura del suelo y la planificación de futuros programas de monitoreo.

Los resultados obtenidos en la presente investigación podrán utilizarse como una primera línea base de referencia para futuras evaluaciones de la calidad del agua superficial del arroyo Caañabé, favoreciendo la comparación temporal de los datos y fortaleciendo las estrategias de monitoreo y gestión de los recursos hídricos de la cuenca.

Finalmente, se recomienda promover investigaciones interdisciplinarias que integren conocimientos de geología, hidrología, calidad del agua, ecotoxicología y gestión ambiental, con el propósito de ampliar el conocimiento sobre las condiciones ambientales de la cuenca del arroyo Caañabé y contribuir al manejo sostenible de sus recursos hídricos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, M. K., BAKI, M. A., ISLAM, M. S., KUNDU, G. K., HABIBULLAH-AL-MAMUN, M., SARKAR, S. K., & HOSSAIN, M. M. (2015). Human health risk assessment of heavy metals in tropical fish and shellfish collected from the river Buriganga, Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 15880–15890. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4813-z>
- ALLOWAY, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, & WATER ENVIRONMENT FEDERATION. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- APPELO, C. A. J., & POSTMA, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). A. A. Balkema Publishers.
- AYALA LÓPEZ, H. A. (2019). *Estudio del Cerro Acahay como alternativa de turismo rural sostenible del departamento de Paraguarí, Paraguay* [Trabajo de grado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción].
- CEBALLOS, E., DUBNY, S., OTHAX, N., et al. (2021). Assessment of human health risk of chromium and nitrate pollution in groundwater and soil of the Matanza-Riachuelo River Basin, Argentina. *Exposure and Health*, 13, 323–336. <https://doi.org/10.1007/s12403-021-00386-9>
- CHAPMAN, D. (Ed.). (1996). *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (2nd ed.). UNESCO, WHO, & UNEP.
- CHORLEY, R. J., SCHUMM, S. A., & SUGDEN, D. E. (1984). *Geomorphology*. Methuen.
- DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICA, ENCUESTAS Y CENSOS. (2012). *Atlas censal del Paraguay: Departamento de Paraguarí*. DGEEC.
- DINGMAN, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press.

- DREVER, J. I. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments* (3rd ed.). Prentice Hall.
- ECONOMOU-ELIOPOULOS, M., ANTIVACHI, D., VASILATOS, C., & MEGREMI, I. (2012). Evaluation of the Cr(VI) and other toxic element contamination and their potential sources: The case of the Thiva Basin (Greece). *Geoscience Frontiers*, 3(4), 523–539. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.010>
- FÖRSTNER, U., & WITTMANN, G. T. W. (1981). *Metal pollution in the aquatic environment* (2nd ed.). Springer-Verlag.
- GONZÁLEZ NÚÑEZ, M. E., & BARTEL, W. (1998). *Mapa geológico de la República del Paraguay. Hoja Paraguari 5469: Texto explicativo*. Dirección de Recursos Minerales, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC) e Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR).
- GORNY, J., BILLON, G., NOIRIEL, C., DUMOULIN, D., LESVEN, L., & MADÉ, B. (2016). Chromium behavior in aquatic environments: A review. *Environmental Reviews*, 24(4), 503–516. <https://doi.org/10.1139/er-2016-0012>
- HEM, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3rd ed.). U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2254. <https://doi.org/10.3133/wsp2254>
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., & MENDOZA TORRES, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- INSFRÁN ORTIZ, A., APARICIO MEZA, M. J., SPITALE CAMPOS CERVERA, S., & ALFONSO CORREA, O. (2025). Circunstancias históricas de degradación del Caañabé, su cuenca y humedales: Un corredor biocultural en riesgo. *Revista Ecologías Humanas*, 11(14), 1–28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14994033>
- KNIGHTON, D. (1998). *Fluvial forms and processes: A new perspective*. Arnold.
- LEY N.º 294/1993. (1993). De Evaluación de Impacto Ambiental.
- LEY N.º 1561/2000. (2000). Que crea el Sistema Nacional del Ambiente (SISNAM), el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) y la Secretaría del Ambiente.
- LEY N.º 3239/2007. (2007). De los Recursos Hídricos del Paraguay.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., & CHIPMAN, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- LÓPEZ ARIAS, T., FERNÁNDEZ PERALTA, V., FRANCO DE DIANA, D. M., GALEANO DELGADO, E., ALONSO MÁRQUEZ, F. S., BENÍTEZ MARTÍNEZ, M. D., LÓPEZ VERA, M. E., ÍMAS AYALA, H., BOBADILLA GIMÉNEZ, N., BENÍTEZ RESQUÍN, L. M., & MAZÓ BAREIRO, C. G. (2016). Índices de calidad

ambiental de aguas del arroyo Caañabé mediante tests microbiológicos y ecotoxicológicos. *Revista Ambiente & Água*, 11(3), 548–565.
<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1703>

LÓPEZ ARIAS, T. R., VILLALBA DURÉ, G., POLICANI BARRIOS, M. D., BOGARÍN CANTERO, B. C., & MENDOZA, A. E. (2021). Calidad de agua del Arroyo Guazú del Departamento Central evaluada mediante indicadores biológicos, parámetros fisicoquímicos y ecotoxicológicos. *Investigaciones y Estudios – UNA*, 12(1), 4–18.
<https://doi.org/10.47133/IEUNA2111>

LYU, Y., CAI, W., YANG, L., BIAN, C., LI, J., & WANG, M. (2024). Pollution characteristics, migration and transformation of hexavalent chromium in groundwater of a chromium slag. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 51(3), 180–190.
<https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305030>

MCNEILL, L. S., MCLEAN, J. E., EDWARDS, M. A., & PARKS, J. L. (2012). Hexavalent chromium review, part 1: Health effects, regulations, and analysis. *Journal - American Water Works Association*, 104(6), E348–E359.

MCNEILL, L. S., MCLEAN, J. E., EDWARDS, M. A., & PARKS, J. L. (2012). Hexavalent chromium review, part 2: Chemistry, occurrence, and treatment. *Journal - American Water Works Association*, 104(7), E395–E405.

MILANI, E. J., MELO, J. H. G., SOUZA, P. A., FERNANDES, L. A., & FRANÇA, A. B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 265–287.

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2019, 4 de febrero). Extraen muestra de agua del arroyo Caañabé para su análisis.
<https://www.mades.gov.py/2019/02/04/extraen-muestra-de-agua-del-arroyo-caanabe-para-su-analisis/>

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2020, 31 de enero). Realizaron varios procedimientos en la zona del arroyo Caañabé.
<https://www.mades.gov.py/2020/01/31/realizaron-varios-procedimientos-en-la-zona-del-arroyo-caanabe/>

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2021). *Unidad Hidrográfica Caañabé: Cartografía temática e información hidrográfica*. Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos.

MITSCH, W. J., & GOSSELINK, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). John Wiley & Sons.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1974). *Chromium*. National Academy of Sciences.

OTINIANO GARCÍA, M., TUESTA CÁRDENAS, L., ROBLES CÓRDOVA, H., LUJÁN VELÁSQUEZ, M., & CHÁVEZ ALAYO, M. (2019). Biorremediación de cromo VI de aguas residuales de curtiembres por *Pseudomonas* sp. y su efecto sobre el ciclo celular de *Allium cepa*. *Revista Médica Vallejana*, 4(1), 31–40.

- PROGRAMA MARCO PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL PLATA. (2017). *Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata*. Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata (CIC).
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. (s. f.). *QGIS Geographic Information System* [Software]. QGIS Association. <https://qgis.org/>
- RAMÍREZ, J. (2020, 12 de julio). *Áreas inundables del sistema Caañabé–Lago Ypoá* [Fotografía]. Facebook. <https://www.facebook.com/100032516730546/posts/387763282317560/>
- RICHARD, F. C., & BOURG, A. C. M. (1991). Aqueous geochemistry of chromium: A review. *Water Research*, 25(7), 807–816. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90160-R](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90160-R)
- SECRETARÍA DEL AMBIENTE. (2002). *Resolución SEAM N.º 222/2002. Por la cual se establece el padrón de calidad de las aguas en el territorio nacional*.
- SAHA, B., & ORVIG, C. (2010). Biosorbents for hexavalent chromium elimination from industrial and municipal effluents. *Coordination Chemistry Reviews*, 254(23–24), 2959–2972. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.06.005>
- SALINAS FRANCO, N., BENÍTEZ, J., & LÓPEZ, T. (2021). Metales pesados contenidos en los sedimentos de fondo y en la columna de agua del arroyo San Lorenzo, Departamento Central, Paraguay. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 26(1), 100–114. <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.1.100>
- SILVA, L. J. G., CASIMIRO, M. J. G., PENA, A., CAMPOS, M. J., & PEREIRA, A. M. P. T. (2025). Assessment of chromium contamination in aquatic environments near tannery industries: A Portuguese case study. *Toxics*, 13(12), 1068. <https://doi.org/10.3390/toxics13121068>
- SILVA, M. J., & SALINAS MORALES, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, 9(1). <https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>
- SOUZA, V. A., & WASSERMAN, J. C. (2015). Distribution of heavy metals in sediments of a tropical reservoir in Brazil: Sources and fate. *Journal of South American Earth Sciences*, 63, 208–216.
- SREERAM, K. J., & RAMASAMI, T. (2003). Sustaining tanning process through conservation, recovery and better utilization of chromium. *Resources, Conservation and Recycling*, 38(3), 185–212. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00100-X)
- STRAHLER, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

- STUMM, W., & MORGAN, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2014). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model* [Data set]. EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2021, November 16). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-science-products>
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (s. f.). *National Water-Quality Assessment Program*. <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/national-water-quality-assessment-program>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2025, September 17). *National recommended water quality criteria tables*. <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-tables>
- VAROL, M., & ŞEN, B. (2012). Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey. *Catena*, 92, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.011>
- VASILATOS, C., MEGREMI, I., ECONOMOU-ELIOPOULOS, M., & MITSIS, I. (2008). Hexavalent chromium and other toxic elements in natural waters in the Thiva–Tanagra–Malakasa Basin, Greece. *Hellenic Journal of Geosciences*, 43, 57–66.
- WIENS, F. (1986). *Texto explicativo del mapa geológico de la República del Paraguay*. Proyecto PAR 83/005. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Dirección de Recursos Minerales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the first and second addenda). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- YOUNAS, F., BIBI, I., AFZAL, M., AL-MISNED, F., NIAZI, N. K., HUSSAIN, K., SHAHID, M., SHAKIL, Q., ALI, F., & WANG, H. (2023). Unveiling distribution, hydrogeochemical behavior and environmental risk of chromium in tannery wastewater. *Water*, 15(3), 391. <https://doi.org/10.3390/w15030391>

8. ANEXOS

8.1 Anexos A

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Laboratorio de Calidad de Agua INFORME DE ENSAYO				
INF.0479/2026				
Solicitante: FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NUÑEZ			Solicitud de trabajo N°: 272/2026	
Dirección: Campus de la UNA			Código de ítem: 478	
Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente; Agua de Arroyo Caañabé – AC1. Fecha de muestreo: 24/05/2026.				
Fecha de recepción: 25/05/2026 Fecha de ejecución del ensayo: 25/05/2026 Fecha del Informe: 27/05/2026				
Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia – Resol. N° 222/02 SEAM – valores máximos admisibles
pH	PRO.ME 002-Rev.04/SM 4500-H ⁺ B	7,44	UpH	6,0 a 9,0
Conductividad	SM 2510 B	117,2	µS/cm	SR
Turbiedad	SM 2130 B	19,90	UTN	100
Cromo (Cr ⁶⁺) hexavalente	SM 3500-Cr D	<0,001	mg/L	0,05

Abreviaturas: °C = grados Celsius, UpH = unidad de pH, µS/cm = micro siemens por centímetro, UTN = Unidad Nefelométrica de Turbiedad, SR = sin referencia, Resol. = Resolución, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). PRO.ME = procedimiento interno, Rev. = revisión, NP = Norma Paraguaya, NN = no normalizado, SEAM = Secretaría del Ambiente (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADES).

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Las referencias corresponden a agua de la Clase 2.
- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Francisco Arnaldo González Teléfono: 0981 000 042

Fin del informe

Pág. 1/1


Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

REG 063.08

Campus Universitario – San Lorenzo – Tel. 585-600, Int. 247 - Fax (595-21) 585-600
E-mail: labagua@facen.una.py - C.C. 1039-1804, Asunción - Paraguay

Anexo 1-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC1 del arroyo Caañabé.
Fuente: Laboratorio de Calidad de Agua, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN–UNA), Informe INF.0479/2026.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.0480/2026

Solicitante: FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NUÑEZ	Solicitud de trabajo N°: 272/2026
Dirección: Campus de la UNA	Código de ítem: 479

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente; Agua de Arroyo Caañabé – AC2. Fecha de muestreo: 24/05/2026.

Fecha de recepción: 25/05/2026 Fecha de ejecución del ensayo: 25/05/2026 Fecha del informe: 27/05/2026

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia – Resol. N° 222/02 SEAM – valores máximos admisibles
pH	PRO.ME 002-Rev.04/SM 4500-H ⁺ B	7,80	UpH	6,0 a 9,0
Conductividad	SM 2510 B	114,2	µS/cm	SR
Turbiedad	SM 2130 B	16,90	UTN	100
Cromo (Cr ⁶⁺) hexavalente	SM 3500-Cr D	<0,001	mg/L	0,05

Abreviaturas: °C = grados Celsius, UpH = unidad de pH, µS/cm = micro siemens por centímetro, UTN = Unidad Nefelométrica de Turbiedad, SR = sin referencia, Resol. = Resolución, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). PRO.ME = procedimiento interno, Rev. = revisión, NP = Norma Paraguaya, NN = no normalizado, SEAM = Secretaría del Ambiente (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADES).

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Las referencias corresponden a agua de la Clase 2.
- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Francisco Arnaldo González

Teléfono: 0981 000 042



Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.08

Anexo 2-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC2 del arroyo Caañabé.
Fuente: Laboratorio de Calidad de Agua, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN–UNA), Informe INF.0480/2026.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.0481/2026

Solicitante: FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NUÑEZ	Solicitud de trabajo N°: 272/2026
Dirección: Campus de la UNA	Código de ítem: 480

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente; Agua de Arroyo Caañabé – AC3. Fecha de muestreo: 24/05/2026.

Fecha de recepción: 25/05/2026 Fecha de ejecución del ensayo: 25/05/2026 Fecha del informe: 27/05/2026

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia – Resol. N° 222/02 SEAM – valores máximos admisibles
pH	PRO.ME 002-Rev.04/SM 4500-H ⁺ B	7,85	UpH	6,0 a 9,0
Conductividad	SM 2510 B	91,0	µS/cm	SR
Turbiedad	SM 2130 B	16,10	UTN	100
Cromo (Cr ⁶⁺) hexavalente	SM 3500-Cr D	<0,001	mg/L	0,05

Abreviaturas: °C = grados Celsius, UpH = unidad de pH, µS/cm = micro siemens por centímetro, UTN = Unidad Nefelométrica de Turbiedad, SR = sin referencia, Resol. = Resolución, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). PRO.ME = procedimiento interno, Rev. = revisión, NP = Norma Paraguaya, NN = no normalizado, SEAM = Secretaría del Ambiente (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADES).

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Las referencias corresponden a agua de la Clase 2.
- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Francisco Arnaldo González

Teléfono: 0981 000 042



Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe

Pág. 1/1

REG 063.08

Anexo 3-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC3 del arroyo Caañabé.
Fuente: Laboratorio de Calidad de Agua, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN-UNA), Informe INF.0481/2026.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.0482/2026

Solicitante: FRANCISCO ARNALDO GONZÁLEZ NUÑEZ	Solicitud de trabajo N°: 272/2026
Dirección: Campus de la UNA	Código de ítem: 481

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente; Agua de Arroyo Caañabé – AC4. Fecha de muestreo: 24/05/2026.

Fecha de recepción: 25/05/2026 | Fecha de ejecución del ensayo: 25/05/2026 | Fecha del informe: 27/05/2026

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia – Resol. N° 222/02 SEAM – valores máximos admisibles
pH	PRO.ME 002-Rev.04/SM 4500-H ⁺ B	7,80	UpH	6,0 a 9,0
Conductividad	SM 2510 B	92,7	µS/cm	SR
Turbiedad	SM 2130 B	15,70	UTN	100
Cromo (Cr ⁶⁺) hexavalente	SM 3500-Cr D	<0,001	mg/L	0,05

Abreviaturas: °C = grados Celsius, UpH = unidad de pH, µS/cm = micro siemens por centímetro, UTN = Unidad Nefelométrica de Turbiedad, SR = sin referencia, Resol. = Resolución, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). PRO.ME = procedimiento interno, Rev. = revisión, NP = Norma Paraguaya, NN = no normalizado, SEAM = Secretaría del Ambiente (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADES).

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Las referencias corresponden a agua de la Clase 2.
- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Francisco Arnaldo González | Teléfono: 0981 000 042

Fin del informe
Pág. 1/1



Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

REG 063.08

Anexo 4-A. Informe de ensayo correspondiente al punto de muestreo AC4 del arroyo Caañabé.
Fuente: Laboratorio de Calidad de Agua, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN–UNA), Informe INF.0482/2026.

8.2 Anexos B

Registro fotográfico del área de estudio y condiciones observadas durante la campaña de muestreo

El presente anexo contiene fotografías obtenidas durante la campaña de muestreo realizada en el arroyo Caañabé en mayo de 2026. Las imágenes documentan las características del cauce, la vegetación ribereña y evidencias de posibles fuentes de aporte antrópico observadas en el área de estudio.



Anexo 5-B. Vista general del arroyo Caañabé en uno de los sectores de muestreo, donde se observan las características geomorfológicas del cauce y la cobertura vegetal ribereña asociada.

Fuente: Elaboración propia (2026).



Anexo 6-B. Sector de la ribera del arroyo Caañabé utilizado durante el reconocimiento de campo y la selección de los puntos de muestreo. Se observan las condiciones de acceso al cauce, la vegetación ribereña y las características ambientales presentes en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia (2026).

8.3 Anexos C

Extracto de la Resolución SEAM N.º 222/2002 utilizado en la presente investigación

La Resolución SEAM N.º 222/2002 establece los criterios de clasificación de las aguas superficiales y los parámetros de calidad ambiental aplicables en el territorio nacional.

De acuerdo con el Artículo 1, las aguas superficiales son clasificadas en cuatro categorías según sus usos preponderantes. Las aguas de Clase 2 están destinadas

al abastecimiento doméstico previo tratamiento convencional, protección de comunidades acuáticas, recreación de contacto primario, irrigación de cultivos y acuicultura. Estas condiciones fueron utilizadas como referencia para la evaluación de la calidad del agua del arroyo Caañabé.

Según el Artículo 3, las aguas de Clase 2 deben cumplir los mismos límites establecidos para las aguas de Clase 1, con excepción de determinados parámetros específicos. Entre los criterios considerados en la presente investigación se encuentran:

- pH: entre 6,0 y 9,0.
- Turbidez: hasta 100 UNT.
- Oxígeno disuelto (OD): no inferior a 5 mg/L.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): hasta 5 mg/L.
- Fósforo total: hasta 0,05 mg/L.
- Nitrógeno total: hasta 0,6 mg/L.

Asimismo, dentro de las sustancias potencialmente perjudiciales establecidas por la normativa, se fijan los siguientes límites máximos permisibles para el cromo:

- Cromo trivalente Cr(III): 0,5 mg/L.
- Cromo hexavalente Cr(VI): 0,05 mg/L.

Los criterios precedentemente citados constituyeron la base normativa utilizada para la interpretación de los resultados obtenidos en el arroyo Caañabé durante la campaña de monitoreo realizada en mayo de 2026.

Fuente: Secretaría del Ambiente (SEAM). Resolución N.º 222/2002, por la cual se establece el padrón de calidad de las aguas en el territorio nacional.