



**PAISAJES
RESILIENTES**
Juntos cuidemos nuestra cuenca

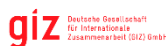


Calidad y Cantidad de Agua (superficiales y subterráneas) de las Cuencas San Martín, Paraguá y Subcuenca Zapocó

Septiembre 2023



Implementada por:



La presente publicación: "Calidad y cantidad de agua (superficiales y subterráneas) de las cuencas Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó" ha sido elaborada con el apoyo financiero de la Unión Europea y la Cooperación Alemana a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y su proyecto "Paisajes Resilientes en la Chiquitania, Santa Cruz".

El contenido es responsabilidad exclusiva de GIZ - AKUT y no refleja necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Todos los derechos reservados. El presente documento es únicamente de uso educativo e informativo. Se autoriza la reproducción parcial o total sin fines comerciales citando adecuadamente la fuente.

Autores: R. Karina Gonzales, Daniel Castro, Sandy Rojas, Oscar Ayala, Andrea Rios, Lia Escobar, Boris Hinojosa

Revisores: Nicole Stuber, Jörg Fisher, Boris Hinojosa, Lia Escobar, Miriam Seemann

Diseño y diagramación: Hanan Callejas, Carol Soto

Paisajes Resilientes – GIZ Bolivia

Fotografías: © Archivo GIZ Bolivia

Santa Cruz, Bolivia

Septiembre, 2023

Impreso en Bolivia

CONTENIDO

1.	RESUMEN.....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1	Antecedente	2
2.2	Justificación	3
3.	OBJETIVOS.....	4
3.1	Objetivo General.....	4
3.2	Objetivos Específicos	4
4.	MÉTODOS.....	5
4.1	Área de estudio.....	5
4.2	Diseño de muestreo	14
4.2.1	Criterios para la elección de puntos de muestreo.....	14
4.2.2	Unidades y puntos de evaluación.....	15
4.2.3	Periodos de muestreo	19
4.3	Variables de monitoreo.....	19
4.3.1	Cantidad de aguas.....	20
4.3.2	Calidad de aguas.....	23
4.4	Análisis de la información	25
4.4.1	Cantidad de aguas.....	25
4.4.2	Calidad de aguas.....	27
5.	RESULTADOS.....	31
5.1	Aguas subterráneas.....	31
5.1.1	Cantidad de agua.....	31
5.1.2	Calidad de agua.....	42
5.2	Aguas superficiales	58
5.2.1	Cantidad de aguas.....	58
5.2.2	Calidad de aguas.....	70
6.	CONCLUSIONES.....	104
6.1	Cantidad de agua.....	104
6.1.1	Aguas subterráneas.....	104

6.1.2	Aguas superficiales	105
6.2	Calidad de aguas	106
6.2.1	Aguas subterráneas.....	106
6.2.2	Aguas superficiales	107
7.	BIBLIOGRAFÍA	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de los problemas por tipo de cuerpo de agua dentro de las cuencas estudiadas.	14
Figura 2. Esquema del diseño de muestreo para la toma de datos.	18
Figura 3. Precipitación Media Mensual [mm], Períodos 2010-2022.....	19
Figura 4. Mediciones de profundidad de pozos, altura del nivel estático (NE) y columna de agua en los pozos de la cuenca Paraguá, a) Parte alta de la cuenca b) Parte baja de la cuenca.....	32
Figura 5. Mediciones de profundidad de pozo, altura al nivel estático y columna de agua en los pozos en la cuenca San Martín, para los periodos de monitoreo PTMH y PTMS.33	
Figura 6. Mediciones de profundidad de pozo, altura al nivel estático y columna de agua en los pozos en la subcuenca Zapocó, para los periodos de monitoreo PTMH y PTMS.	33
Figura 7. Variación de niveles estáticos entre periodos de medición, a) Paraguá, b) San Martín y c) Zapocó.	35
Figura 8. Variación de los niveles estáticos en los pozos de monitoreo para los (PTMH y PTMS)., los círculos rojos representan descenso en el nivel de agua y los círculos azules representan incremento.....	37
Figura 9. Producción estimada de agua en los pozos de monitoreo.	39
Figura 10. Resumen de la protección de boca de pozo en los pozos monitoreados.	40
Figura 11. Correlaciones entre factores fisicoquímicos a partir del PCA para pozos en: la cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS, cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS, y subcuenca Zapocó e) PTMH y f) PTMS.....	42
Figura 12. Agrupación de pozos en función de su calidad de aguas en: Cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS, Cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS, y subcuenca Zapocó e) PTMH y f) PTMS, las variables fisicoquímicas vector (verde) y pozos puntos (azul).	45
Figura 13. Variables básicas pH, conductividad, TDS, oxígeno disuelto y turbidez en las cuencas estudiadas.	48
Figura 14. Variables no metálicas: nitratos, fosfatos, sulfatos en las cuencas Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó.	52
Figura 15. Variables metálicas: Hierro.....	55
Figura 16. Variables biológicas: Coliformes fecales.	56
Figura 17. Distribución espacial de: a) Fosfatos y b) Nitratos.....	57
Figura 18. Sinuosidad en los ríos evaluados.	59

Figura 19. Nivel de agua en los ríos monitoreados para PMTH y PTMS.....	61
Figura 20. Variación del nivel de agua en los ríos entre los monitoreos.....	62
Figura 21. Variación espacial de los niveles de agua entre el PTMH y el PTMS.....	64
Figura 22. Caudales de los ríos monitoreados en las cuencas de estudio, para el PTMS.	66
Figura 23. Nivel de agua en la presa para los monitoreos a) PMTH y b) PTMS.	67
Figura 24. Variación del nivel de agua en las presas entre monitoreos.	68
Figura 25. Estimación del volumen de agua almacenada en la presa Guapomó para PTMH y PTMS.....	69
Figura 26. Correlaciones entre factores fisicoquímicos a partir del PCA para ríos en: la cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS y cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS	71
Figura 27. Agrupación de ríos en función de su calidad de aguas en: cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS y cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS, las variables fisicoquímicas vector (verde) y pozos puntos (azul).....	72
Figura 28. Variables básicas para ríos, en las cuencas de estudio.	74
Figura 29. Descripción de las variables no metálicas en ríos de la cuenca Paraguá y San Martín.....	76
Figura 30. Descripción de las variables metálicas en ríos de la cuenca Paraguá y San Martín.....	77
Figura 31. Descripción de las variables microbiológicas en ríos de las cuencas Paraguá y San Martín.	77
Figura 32. Comportamiento de las variables a) saturación de oxígeno, b) fosfatos y c) turbidez.	78
Figura 33. Familias y subfamilias de MIA con mayor abundancia en: a) PTMH y b) PTMS de la cuenca Paraguá; c) PTMH y d) PTMS de la cuenca San Martín.....	80
Figura 34. Riqueza de familias y subfamilias de MIA en el a) PTMH y b) PTMS en ríos de las cuencas evaluadas.	81
Figura 35. Riqueza de familias y subfamilias de MIA en: a) PTMH y b) PTMS en los ríos de las cuencas evaluadas.	82
Figura 36. Variación y comparación significativa de la diversidad evaluada a través de los números de Hills, en a) PTMH y b) PTMS.....	83
Figura 37. Variaciones de la calidad del agua en los diferentes ríos evaluados a través del índice biótico BMWP-Bol, en a) PTMH y b) PTMS.	85

Figura 38. Matriz de correlaciones de Sperman. a) PTMH y b) PTMS. Las elipses de color azules muestran una correlación positiva y significativa; en cambio, las elipses de color rojo muestran una correlación negativa y significativa.....	86
Figura 39. Clasificación de la calidad del agua de ríos en función a al índice exponencial de Shannon e inverso de Simpson.	88
Figura 40. Contribución de las variables de calidad de aguas en presas en las cuencas Paraguá y Subcuenca Zapocó en: a) PTMH y b) PTMS.	89
Figura 41. Variables fisicoquímicas para presas en: cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS y subcuenca Zapocó c) PTMH y d) PTMS.	90
Figura 42. Variables básicas en represas de la cuenca Paraguá y subcuenca Zapocó.....	91
Figura 43. Variables no metálicas en represas de la cuenca Paraguá y subcuenca Zapocó.	93
Figura 44. Variables metálicas en represas del Paraguá y Zapocó.	94
Figura 45. Descripción de las variables microbiológicas en represas en Paraguá y Zapocó.	95
Figura 46. Familias y subfamilias de MIA con mayor abundancia en represas del Paraguá a) PTMH y b) PTMS y subcuenca Zapocó c) PTMH y d) PTMS.....	96
Figura 47. Abundancia de familias y subfamilias de MIA en a) PTMH y b) PTMS en las represas Guapomo, San Juancito y Zapocó.	97
Figura 48. Riqueza de familias y subfamilias de MIA en a) PTMH y b) PTMS las represa Guapomó, San Juancito y Zapocó.....	98
Figura 49. Variación y comparación significativa de la diversidad evaluada a través de los números de Hills, en a) PTMH y b) PTMS.....	99
Figura 50. Variaciones de la calidad del agua en los diferentes ríos evaluados a través del índice biótico BMWP-Bol, en a) PTMH y b) PTMS.	100
Figura 51. Matriz de correlaciones de Sperman. Las elipses de color azules muestran una correlación positiva y significativa; en cambio, las elipses de color rojo muestran una correlación negativa y significativa.....	102
Figura 52. Clasificación de la calidad del agua de represas en función a al índice exponencial de Shannon e inverso de Simpson.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los criterios empleados para la selección de puntos de muestreo, en función del tipo de cuerpo de agua.....	14
Tabla 2. Número de puntos de evaluación por comunidad y tipo de cuerpo de agua, en las cuencas evaluadas.	15
Tabla 3. Resumen de las variables de evaluación de pozos.....	20
Tabla 4. Resumen de las variables de evaluación de ríos y represas.	22
<i>Tabla 5. Descripción de las principales variables de monitoreo de calidad de aguas fisicoquímicas para aguas subterráneas y superficiales.</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 6. Descripción de las principales variables de monitoreo para macroinvertebrados acuáticos.....</i>	<i>25</i>
Tabla 7. Categorización de clases de agua, usos y protección según el Anexo 1 del RMCH de la Ley 1333.	27
Tabla 8. Categorías empleadas en la sistematización de la información de variables fisicoquímicas.....	28
Tabla 9. Categorías empleadas en la sistematización de la información de variables biológicas, desarrolladas para las cuencas de estudio.....	29
Tabla 10. Clasificación de forma de los ríos monitoreados.....	60
Tabla 11. Abundancia porcentual de los phylum de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos (MIA), en las cuencas Paraguá y San Martín.	79
Tabla 12. Distribución porcentual de la abundancia los Phylum de macroinvertebrados acuáticos (MIA), registrados en a) PTMH y b) PTMS en las cuencas Paraguá, San Martín y Subcuenca Zapocó.....	95

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Caracterización de las unidades de vegetación en Paraguá y San Martín.	6
Mapa 2. Humedales y ríos presentes en las cuencas de interés.....	7
Mapa 3. Unidades fisiográficas y de relieve en las cuencas de interés.....	9
Mapa 4. Mapa geológico en las cuencas de interés.	10
Mapa 5. Describe el grado de amenaza a nivel de las cuencas estudiadas.	12
Mapa 6. Concesiones mineras en las cuencas de estudio.	13
Mapa 7. Zonas de evaluación dentro de la Red de Monitoreo (RDM).	17

LISTA DE ACRÓNIMOS

AAPS	Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico
AKUT	Umweltschutz Ingenieure Burkard und Partner mbB.
BMZ	Ministerio Federal de la Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania
CICC	Central Indígena Chiquitana de Concepción
COOSIV	Cooperativa San Ignacio de Velasco
COSEPCO	Cooperativa de Servicios Públicos Concepción
EPSA	Empresa Pública Municipal de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario
FCBC	Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano
GAD	Gobierno Autónomo Departamental
GAM	Gobierno Autónomo Municipal
GIZ	Cooperación Alemana
MDRyT	Ministerio de Desarrollo Rural y Tierra
MIA	Macroinvertebrados acuáticos
NB 512	Norma Boliviana NB 512 Agua Potable
PROASU	Proyecto de Agua Subterránea
PCA	Principal Component Analysis
PTMH	Periodo de transición más húmedo
PTMS	Periodo de transición más seco
RMCH	Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
PROCUECA	Proyecto de Cuencas de la Cooperación Alemana
UE	Unión Europea

1. RESUMEN

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Paisajes Resilientes en la Chiquitania, Santa Cruz”, cofinanciado por la Unión Europea (UE) y el Ministerio Federal de la Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ), ejecutado por la Cooperación Alemana (GIZ) a través del Programa Gestión Integral con Enfoque de Cuenca (PROCUENCA), que promueve la seguridad hídrica a través de un enfoque de gestión integrada y sostenible del paisaje en cuencas de interés departamental. Para esto, se realizó el levantamiento de datos de calidad y cantidad de aguas en dos periodos de monitoreo, el Periodo de Transición Más Húmedo (PTMH) y el Periodo de Transición Más Seco (PTMS), desde abril de 2022 hasta julio de 2023.

El estudio de “Calidad y Cantidad de Agua (superficiales y subterráneas) de las Cuencas San Martín, Paraguá y Subcuenca Zapocó se ha desarrollado en las cuencas del río Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó.

En total se han elaborado tres diferentes métodos de medición: (1) En pozos se evaluaron los niveles estáticos, las variaciones están relacionados con la ubicación de los pozos y con las épocas de monitoreo. También, se analizó el régimen de bombeo para estimar los caudales de extracción de agua subterránea y los indicadores de protección de boca de pozo, de estos análisis se encontró la necesidad de restringir el acceso y la actividad humana a 50 m alrededor del pozo; (2) En los ríos se midieron los niveles de agua y caudales y mostraron ser consistentes con los periodos de monitoreo; (3) En las represas se midieron los niveles de agua, sólo para Guapomó fue posible estimar el volumen de agua en la represa para ambos periodos de monitoreo debido a que tiene información batimétrica.

Respecto a la calidad fisicoquímica del agua en pozos se evidenciaron fuentes de contaminación ligada a la presencia de fosfatos en el agua, que pudo ser relacionada a la actividad agrícola de la zona este elemento pudo influir en la proliferación de coliformes fecales en la red de distribución en algunas comunidades. La calidad del agua de los ríos y represas, desde el punto de vista fisicoquímico evidencia cambios en variables como fosfatos, nitratos y hierro, mismos que están asociados a las actividades agropecuarias locales.

La calidad biológica del agua en ríos y represas en base a las comunidades de macroinvertebrados acuáticos (MIA), evidenció que existen ecosistemas con altos niveles de perturbación, tales como los ríos Negro, San Simón, San Antonio y la represa Guapomó, con mala calidad del agua. En cambio, los ríos con mejor calidad del agua fueron Piso Firme y la represa Zapocó. Asimismo, los análisis de diversidad Shannon y Simpson evidenciaron correlaciones significativas con las variables ambientales asociadas a perturbaciones antrópicas, lo que corrobora lo encontrado en la parte fisicoquímica.

Con toda la información obtenida se diseñó un método adaptado y validado para trabajar en las cuencas de estudio para las zonas de San Ignacio y Concepción.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Antecedentes

En las cuencas Paraguá, San Martín y la subcuenca Zapocó, las instituciones que tienen información respecto a aguas subterráneas son: PROASU (GAD Santa Cruz) y el Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural (MDRyT). Solamente disponen de la información en el momento de las perforaciones de los pozos, donde se midieron variables de calidad de agua y los niveles estáticos y dinámicos del agua. Estos datos en muchos casos tienen más de 10 años de antigüedad y lamentablemente solo se midieron una sola vez ya que no se tenía la meta de consolidar un sistema de monitoreo en la región.

En otros trabajos como los realizados por la Fundación para la Conservaciones del Bosque Seco Chiquitano (FCBC; 2014) y el Plan Municipal de Ordenamiento Territorial de San Ignacio de Velasco (PMOT-SIV; 2011), muestran algunas características de calidad de agua y a pesar de la extensión de las cuencas sólo lograron evaluar 10 zonas, lo que no refleja la heterogeneidad en las cuencas de estudio. Hasta la fecha los Gobiernos Autónomos Municipales de Concepción y San Ignacio no establecieron una estrategia de monitoreo conforme se planteaba en los instrumentos técnicos antes mencionados.

Por el momento, sólo las EPSAS de San Ignacio (COOSIV Ltda.) y Concepción (COSEPCO Ltda.) cuentan con sistemas de monitoreo, pero sólo evalúan la calidad del agua en la red de distribución. Sin embargo, la información sólo se deriva a la AAPS¹ (AAPS, 2021) y no está disponible para su difusión. En cambio, otras comunidades dentro de las cuencas de Paraguá y San Martín no cuentan con la evaluación de calidad y cantidad de agua.

Dentro de las cuencas de estudio, uno de los mayores problemas es la modificación, canalización y desviación de los cauces y/o vertientes llamadas paúros o puquios², todo con la finalidad de abastecer de agua para atajados destinados a la actividad ganadera. Según (Mautner & Escobar, 2022) la zona de San Ignacio de Velasco tiene un volumen de alrededor de 584.000m³ de atajados que representan alrededor de 234 piscinas olímpicas de almacenamiento de agua. Los autores defienden la hipótesis de que estas intervenciones son la causa directa del desabastecimiento de agua en la represa Guapomó, así como la disminución del caudal en el río Paraguá. En la cuenca San Martín, se detectó un patrón similar respecto a la apertura de atajados, aunque no se cuenta con datos al respecto (FCBC, 2014).

¹ AAPS Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico, es la autoridad encargada de la fiscalización de los servicios de las EPSAS, los indicadores que toma están relacionados con la cobertura (cantidad de agua) y calidad de agua.

² Se refieren a afloramientos de aguas en medio de la selva, a diferencia de un pantano el agua de estas zonas es de alta calidad por la presencia de vegetación en los alrededores.

Por otro lado, también se tienen problemas asociados a enfermedades diarreicas, en especial en época seca (GAM San Ignacio, 2011), periodo en el que el acceso al agua es escaso³. A esto se suma, la ausencia de tratamientos preventivos en el mantenimiento de las infraestructuras de almacenamiento de agua (limpieza y reparación de tanques), que está asociada con enfermedades diarreicas, especialmente en menores de cinco años (Ángeles Torres, 2021).

2.2 Justificación

Ante los problemas mencionados, es necesario la implementación y seguimiento de un programa de monitoreo participativo, el cual permitirá evaluar la calidad y cantidad de aguas por las poblaciones locales. De esta forma el programa de monitoreo apoya en la toma de decisiones acertadas e informadas, en el contexto de la gestión del agua. En este sentido, las preguntas base del trabajo fueron las siguientes:

- ¿Cuáles son las variables de monitoreo (respeto a la calidad y cantidad) que deberían ser analizadas a futuro en las cuencas de estudio?
- ¿Cómo se comportan las variables de calidad y cantidad de las aguas en dos periodos de muestreo?
- ¿Qué zonas dentro de las cuencas tienen algún tipo de afectación? Y ¿cuáles son las posibles causas de la alteración?

³ Se buscaron informes y reportes del SEDES y otros entendidos en el tema, sin embargo, no se tienen reportes sobre incidencia y otro relacionado. La afirmación corresponde a la preocupación de las poblaciones donde se realizaron los muestreos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Analizar la calidad y cantidad de agua, susceptible a la heterogeneidad espacial y temporal, en conjunto con los actores locales de las cuencas Paraguá, San Martín y la subcuenca Zapocó.

3.2 Objetivos Específicos

- Describir las dinámicas hidrológicas de aguas superficiales y subterráneas en las cuencas de Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó, en dos periodos de evaluación el Periodo de transición más húmedo (PTMH) y el Periodo de transición más seco (PTMS)
- Caracterizar las variaciones de calidad de aguas en pozos, represas y ríos, para su clasificación en base a la Ley de Medio Ambiente 1333, en dos periodos de evaluación el Periodo de transición más húmedo (PTMH) y el Periodo de transición más seco (PTMS).

4. MÉTODOS

4.1 Área de estudio

Las cuencas Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó fueron delimitadas por el Viceministerio de Recursos Hídricos (VRHR) y validado por la Secretaría de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente (SDSyMA, 2011). Las cuencas Paraguá y San Martín son las unidades territoriales más importantes de los municipios de San Ignacio y Concepción. En este sentido, las subcuencas más importantes para ambas cuencas son: Guapomó en el Paraguá y Zapocó en San Martín. Ambas subcuencas proveen agua a las zonas urbanas de ambos municipios. En el presente trabajo, respecto a las subcuencas el enfoque estuvo en la subcuenca Zapocó y Guapomó. En el caso del Guapomó el trabajo sólo se evaluó la represa, ya que la mayor parte de los cuerpos de agua cuenca arriba corresponden a predios ganaderos privados, por lo cual incrementar puntos arriba de la represa no fue posible. Sin embargo, se pudo analizar a más la represa de Zapocó.

El área de estudio, por su extensión, comprende varias “*Unidades de Vegetación*” (Mapa 1). En la zona domina en la mitad norte las formaciones de Bosque Amazónico de tierra firme (39% de la superficie), en cambio en las zonas australes está el bosque seco Chiquitano, en tan sólo 9,9% de la superficie (Beck et al., 2022; Ibisch & Mérida, 2003). Se considera que las cuencas Paraguá y San Martín son predominantemente xéricas (debido a las bajas precipitaciones de la zona). Sin embargo, el mapa muestra que una de las formaciones de vegetación más importantes es el bosque de Igapo (> 10% de la superficie) (Beck et al., 2022).

Respecto a la hidrología, la región (Mapa 2) presenta un complejo sistema de drenaje natural conformado por ríos, lagunas, pantanos y otros cuerpos de agua. Los cursos de agua de ambas cuencas discurren hacia la gran cuenca Amazónica, concretamente al Río Iténez. En época húmeda las áreas se recargan por las precipitaciones, mientras que en época seca los caudales provienen de los manantiales y/o de descargas de las aguas subterráneas. Los cuerpos de agua tienden a secarse y dejan en su recorrido pozas de agua de diferente tamaño que sirven de suministro para las poblaciones locales y para la biodiversidad asociada.

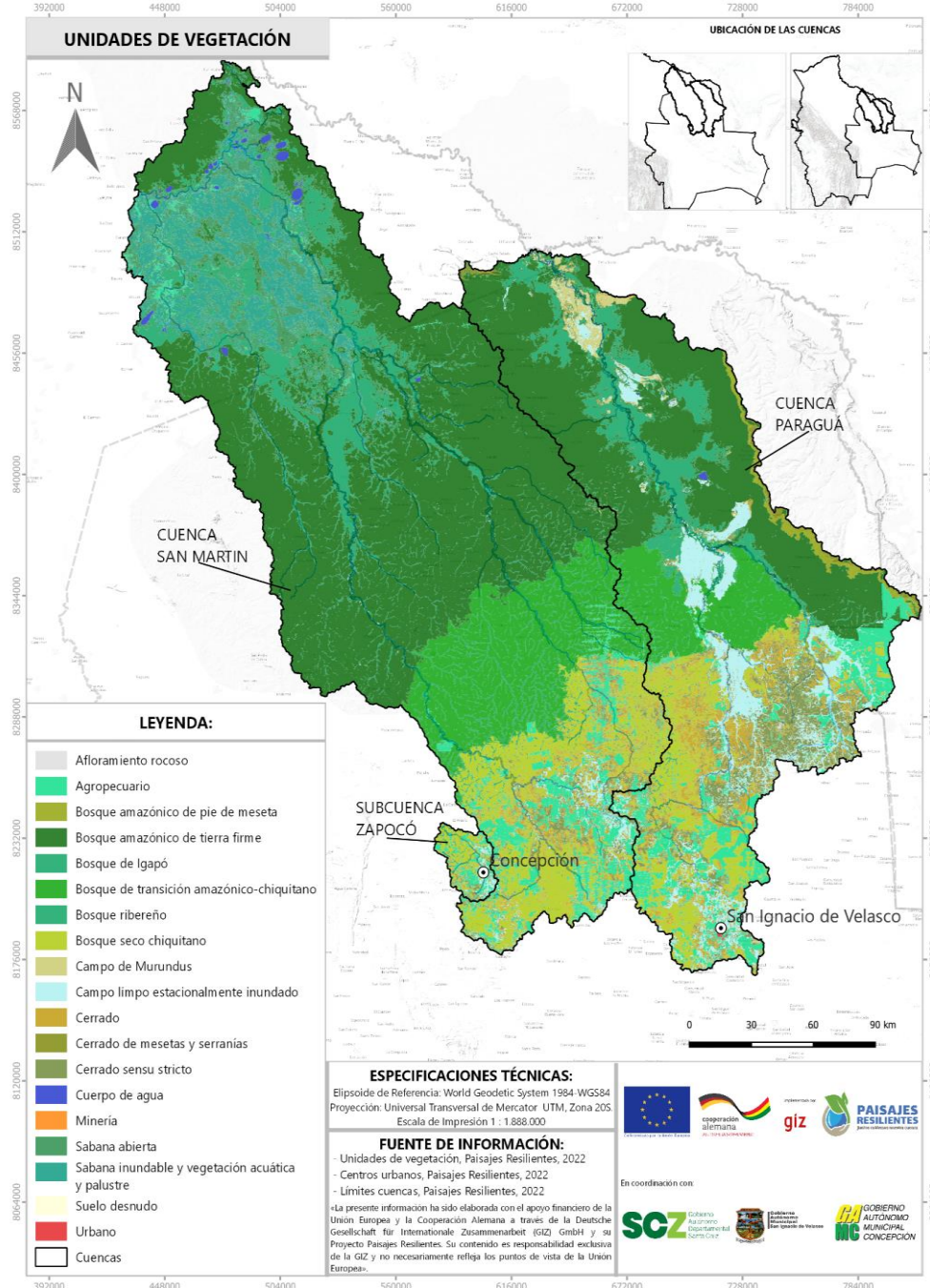
El Río Paraguá recorre una distancia aproximada de 450 km hasta su confluencia con el Río Iténez (GAMSIV 2016). En el caso del Paraguá, los principales aportantes son el río Tarvo y los cauces del Alto Paraguá. La parte alta de la cuenca tiene innumerables cauces que provienen de planicies de inundación que forman ecosistemas palustres conocidos como curichales⁴, además se encuentran vertientes de agua que emergen en zonas discontinuas, estas son conocidas como paúros⁵ (GAM, 2011).

⁴ Formaciones ecológicas palustres con bioindicadores de humedad, saturadas de agua (en épocas seca y húmeda) que es retenida por la turba que se almacena por la descomposición de materia orgánica.

⁵ Los paúros son ecosistemas donde afloran vertientes de agua y conforman un pequeño pantano, que tienen vegetación particular capaz de retener las aguas y protegerlas de la desecación.

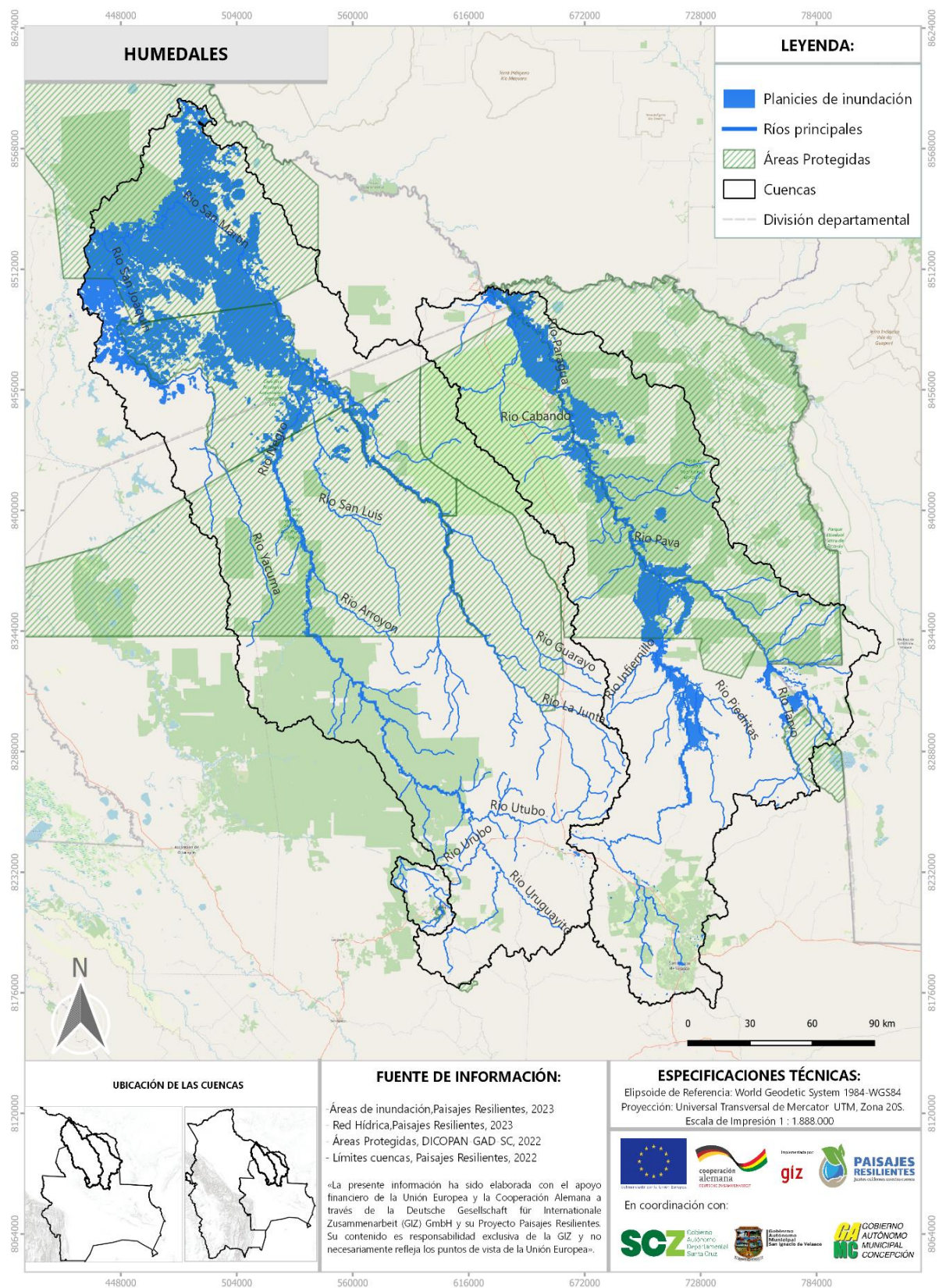
Para la cuenca San Martín el cauce principal es el río Blanco y sus principales tributarios son el río Negro y Uruguayto que recorren las parte altas y media, en principio se forma el cauce del Río Negro que tiene un cauce constante todo el año y forma el Río Blanco. La otra vertiente importante en la cuenca es el cauce del río San Martín que es un aportante continuo y de bajo caudal. A este curso aportan otros arroyos como el San Luis y el Guarayos que se unen hacia la zona de Integración C. En general estos cauces no llegan a confluir en un cauce principal sino todos ingresan hacia las planicies de inundación benianas (FCBC, 2014).

Mapa 1. Caracterización de las unidades de vegetación en Paragvá y San Martín.



Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes en la Chiquitania.

Mapa 2. Humedales y ríos presentes en las cuencas de interés.



Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes en la Chiquitania.

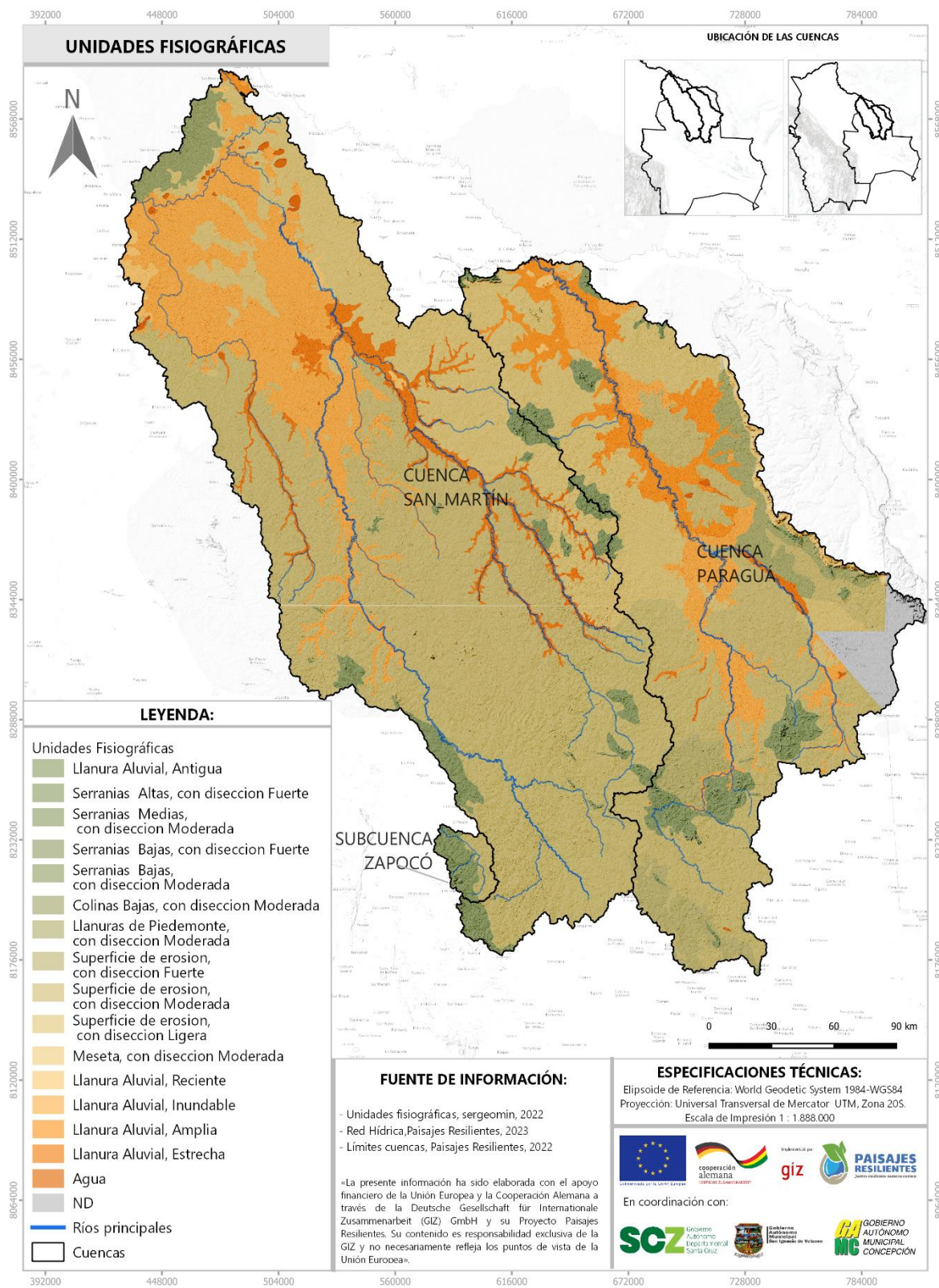
Las características fisiográficas (Mapa 3) permiten identificar los tipos de acuíferos predominantes, también revelan a priori el tipo de percolación en un área de estudio. De esta forma se tiene las siguientes características para las cuencas de interés:

- Los rasgos fisiográficos están formados predominantemente por planicies, bajíos, interfluvios, penillanuras y serranías que pertenecen a las Provincias Fisiográficas del Escudo Chiquitano y la Llanura aluvial correspondiente a la Llanura Chaco Beniana (FCBC, 2014).
- El Escudo Chiquitano predomina en la parte alta de las cuencas y pertenece al sistema precámbrico, constituido por rocas graníticas, basálticas y gnéisicas, sobre las que han actuado los procesos de erosión en las partes altas y sedimentación en las partes bajas, dando como resultado una sucesión de interfluvios entrecortados por valles de erosión (FCBC, 2014).
- En tanto que la Llanura Chaco Beniana, predomina en la parte baja de las cuencas, forma llanuras fluvio lacustres extensas, con relieves planos y uniformes, originadas por sedimentos constituidas por arcillas, limos y arenas (FCBC, 2014).

En las cuencas de interés, las formaciones geológicas (Mapa 4) permiten identificar la homogeneidad o heterogeneidad de bolsones rocosos distribuidos en las cuencas. De este modo se puede inferir la permanencia de las aguas freáticas en las zonas.

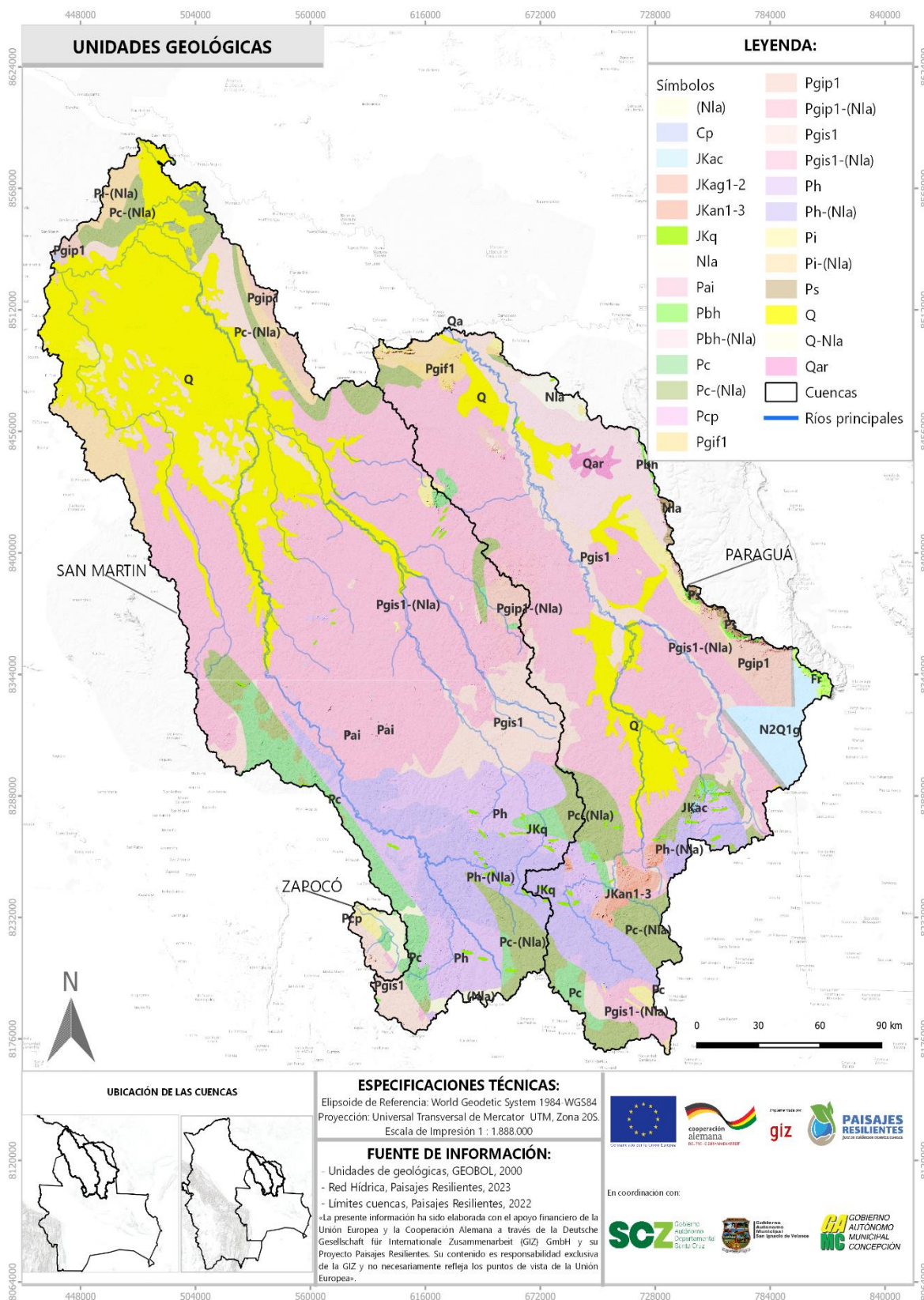
- En ambas cuencas de estudio, la formación dominante es el *escudo brasileiro*, donde se encuentran varias unidades geológicas constituidas por rocas graníticas ácidas (PG is), rocas graníticas post cinemáticas (PGip), gneises micáceos cuarzos feldespáticos (PC), rocas máficas meta-ígneas formadas por lavas y tobas (PB im4), y rocas cuarcitas, psamitas (areniscas), esquistos micáceos, filitas (arcilla) con bandas ricas en grafitos, calcio y fierro (FCBC, 2014).

Mapa 3. Unidades fisiográficas y de relieve en las cuencas de interés.



Fuente: Elaboración basada en la información SERGEOMIN

Mapa 4. Mapa geológico en las cuencas de interés.

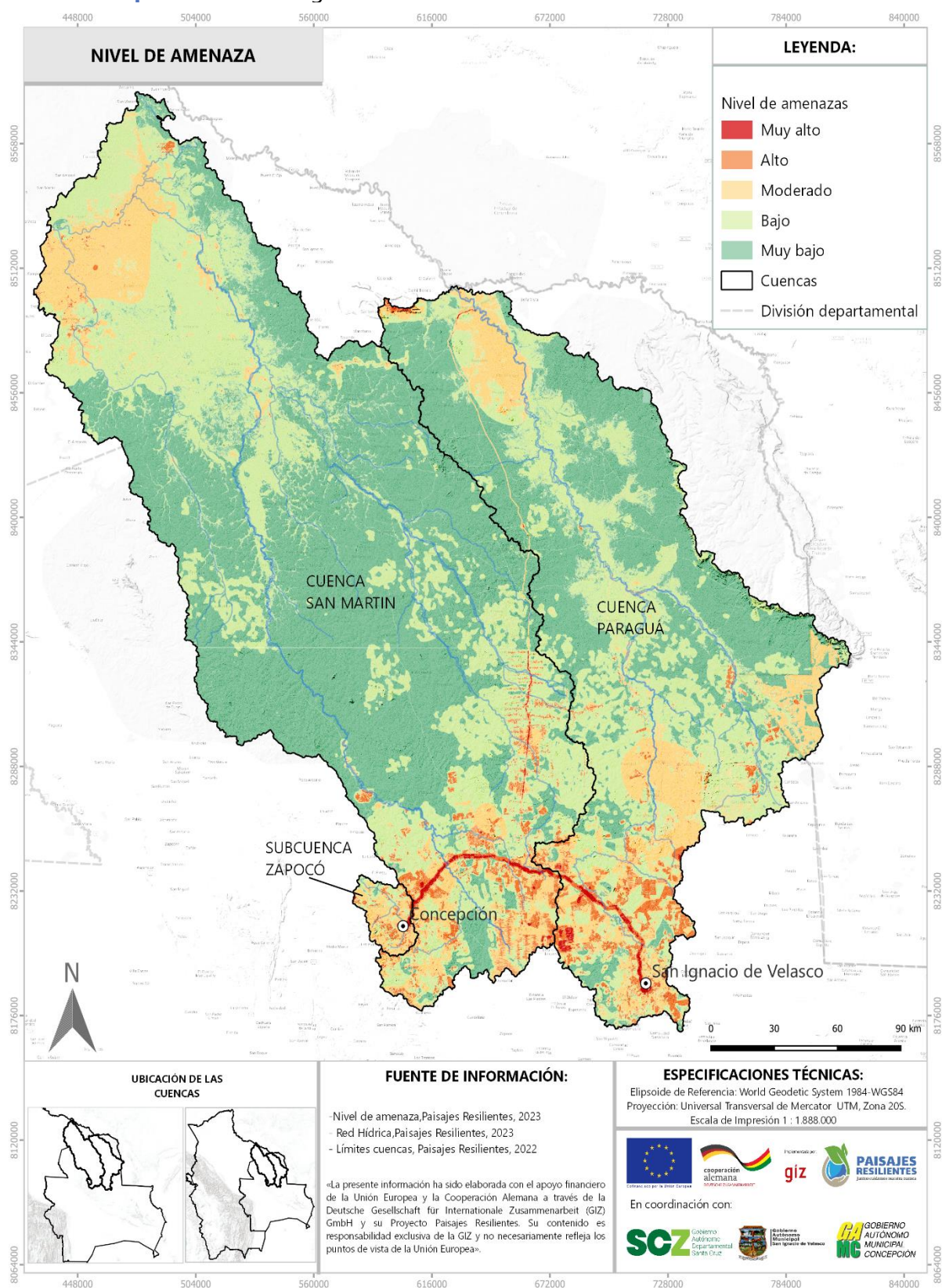


Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de SERGEOMIN.

Las principales amenazas asociados a las cuencas son:

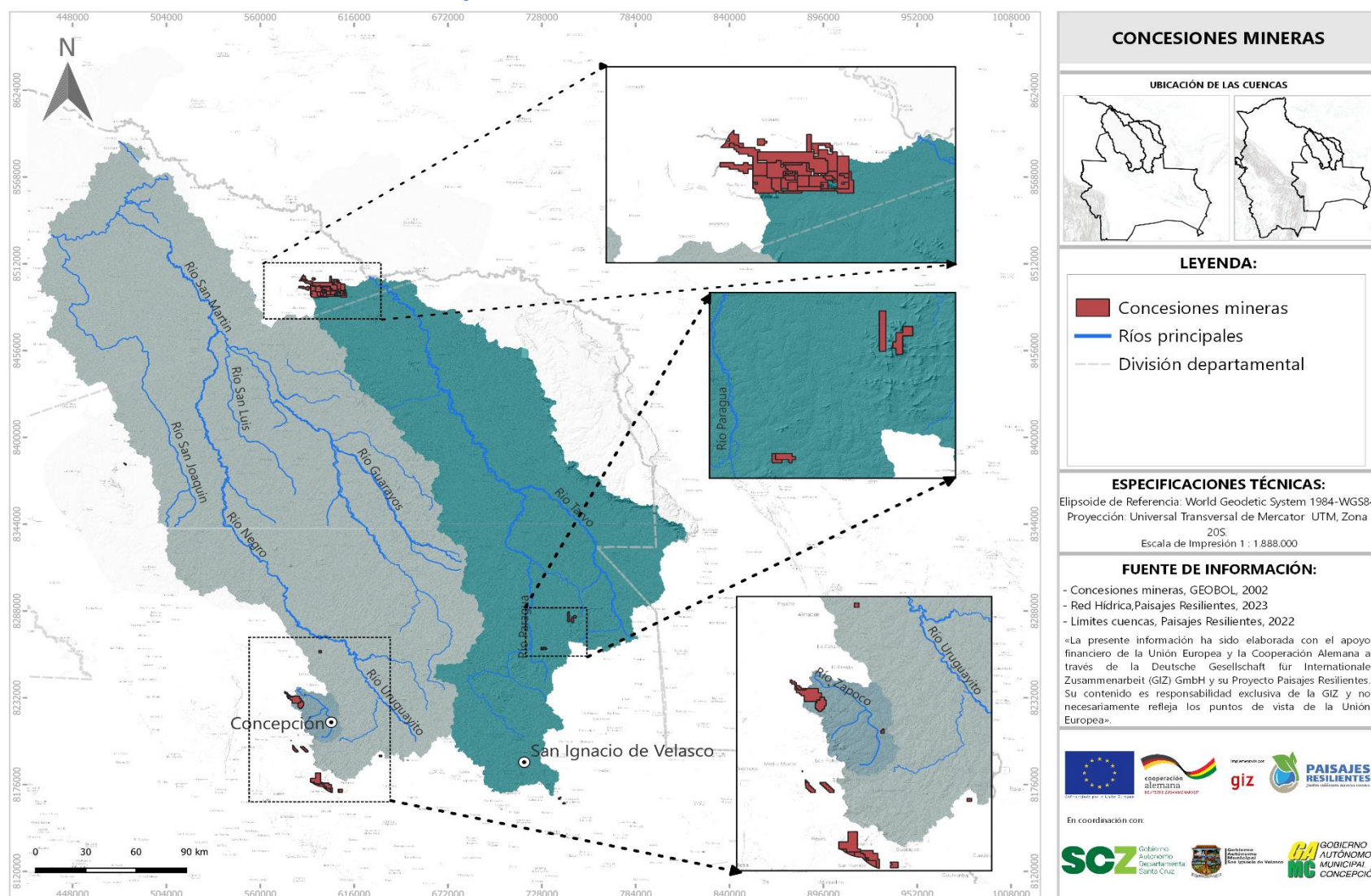
- La intensificación de las actividades antrópicas, en especial en la parte alta de la cuenca, por la ampliación de la frontera agrícola y pecuaria, incide en la fragmentación de paúros, lo que les convierte en lagunas de gran tamaño que impiden el flujo de agua cuenca abajo.
- La apertura de la frontera agrícola incide en la pérdida de la turba, que permite la retención de agua, con lo cual la pérdida de agua por evaporación incrementa e incide en la disminución del nivel del agua y la desecación de humedales (Mapa 5).
- En la subcuenca alta del Paraguá en la región del Guapomó, se identificaron dos fuentes de importante impacto, la primera son las piscinas de decantación del Frigorífico BFC y la laguna de sedimentación de aguas residuales de San Ignacio de Velasco, que no tiene conexión directa sobre la represa, pero afecta a otros humedales ya que las aguas no tienen tratamiento previo para ser liberadas.
- Todo esto implica que las amenazas en las partes altas de la cuenca sean consideradas entre altas a muy altas, lo que repercute sobre la cantidad de agua.
- Por otro lado, se identifican actividades mineras, principalmente en la parte baja de la cuenca Paraguá y en la zona de Santa Mónica en San Martín (Mapa 6), en esta última se identificó la desviación del cauce principal para la actividad minera. Sin embargo, en la etapa de prospección no se encontraron cauces cercanos a las concesiones. No obstante, se debe considerar el peligro potencial de las actividades mineras.

Mapa 5. Describe el grado de amenaza a nivel de las cuencas estudiadas.



Fuente: Elaboración basada en información de la (RAISG, 2021) y del proyecto Paisajes Resilientes en la Chiquitania.

Mapa 6. Concesiones mineras en las cuencas de estudio.



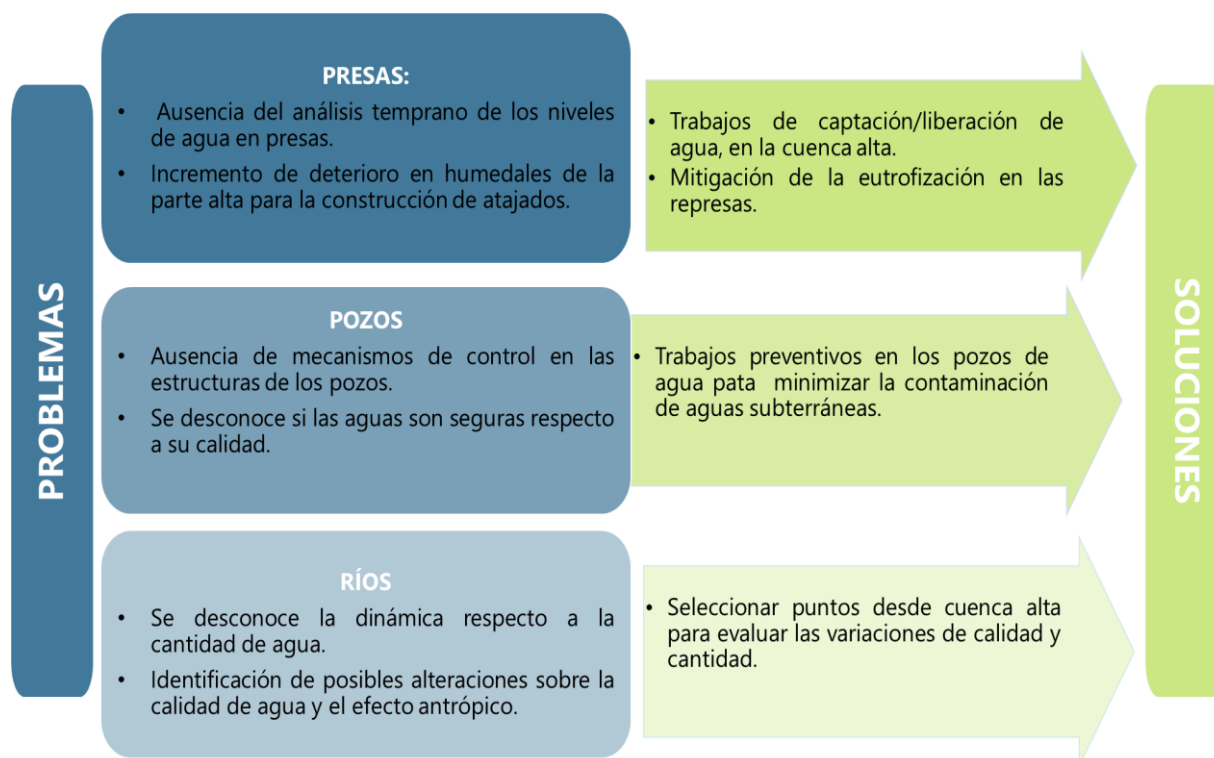
Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes en la Chiquitania.

4.2 Diseño de muestreo

4.2.1 Criterios para la elección de puntos de muestreo

En principio se identificaron los problemas asociados a los principales cuerpos de agua en las cuencas de interés (recuadros azules), así también se describen las posibles acciones a partir del desarrollo de un monitoreo participativo (recuadros verdes) (Figura 1.)

Figura 1. Descripción de los problemas por tipo de cuerpo de agua dentro de las cuencas estudiadas.



Fuente: Elaboración basado en la información del proyecto "Paisajes Resilientes en la Chiquitania".

Además, de la identificación de los problemas, se emplearon criterios para la selección de puntos de muestreo, que son detallados a continuación:

Tabla 1. Descripción de los criterios empleados para la selección de puntos de muestreo, en función del tipo de cuerpo de agua.

TIPO DE CRITERIO	PRESAS	POZOS	RÍOS
SOCIAL	- Tiene amplia cobertura > 2000 personas. - A priori problemas de contaminación por el olor.	Es la principal fuente de agua en las comunidades de ambas cuencas.	Posibles alteraciones por efecto antrópico
ACCESIBILIDAD	Ingreso expedito y limpio de maleza.	Pueda ser evaluado por sondas de medición	Estén cerca de la carretera.

		(introducir la cinta del pozómetro ⁶)	
TÉCNICO	• Suministre de agua a la población. • Alteración antrópica identificada.	• Compromiso por parte de las comunidades para detectar de forma temprana posibles fuentes de contaminación.	• Los puntos deberían estar distribuidos a lo largo de toda la cuenca.

Fuente: Elaboración basado en la información del proyecto "Paisajes Resilientes en la Chiquitanía".

4.2.2 Unidades y puntos de evaluación

Se consideraron como unidades de evaluación a la cuenca y subcuenca. Dentro de las unidades, se evaluaron un total de 93 puntos de evaluación en cuerpos de aguas subterráneos y superficiales (Tabla 2), distribuidos en 31 zonas de evaluación, 18 para Paraguá, 9 para San Martín y 4 para Zapocó. Las zonas de evaluación se muestran en el Mapa 7.

Tabla 2. Número de puntos de evaluación por comunidad y tipo de cuerpo de agua, en las cuencas evaluadas.

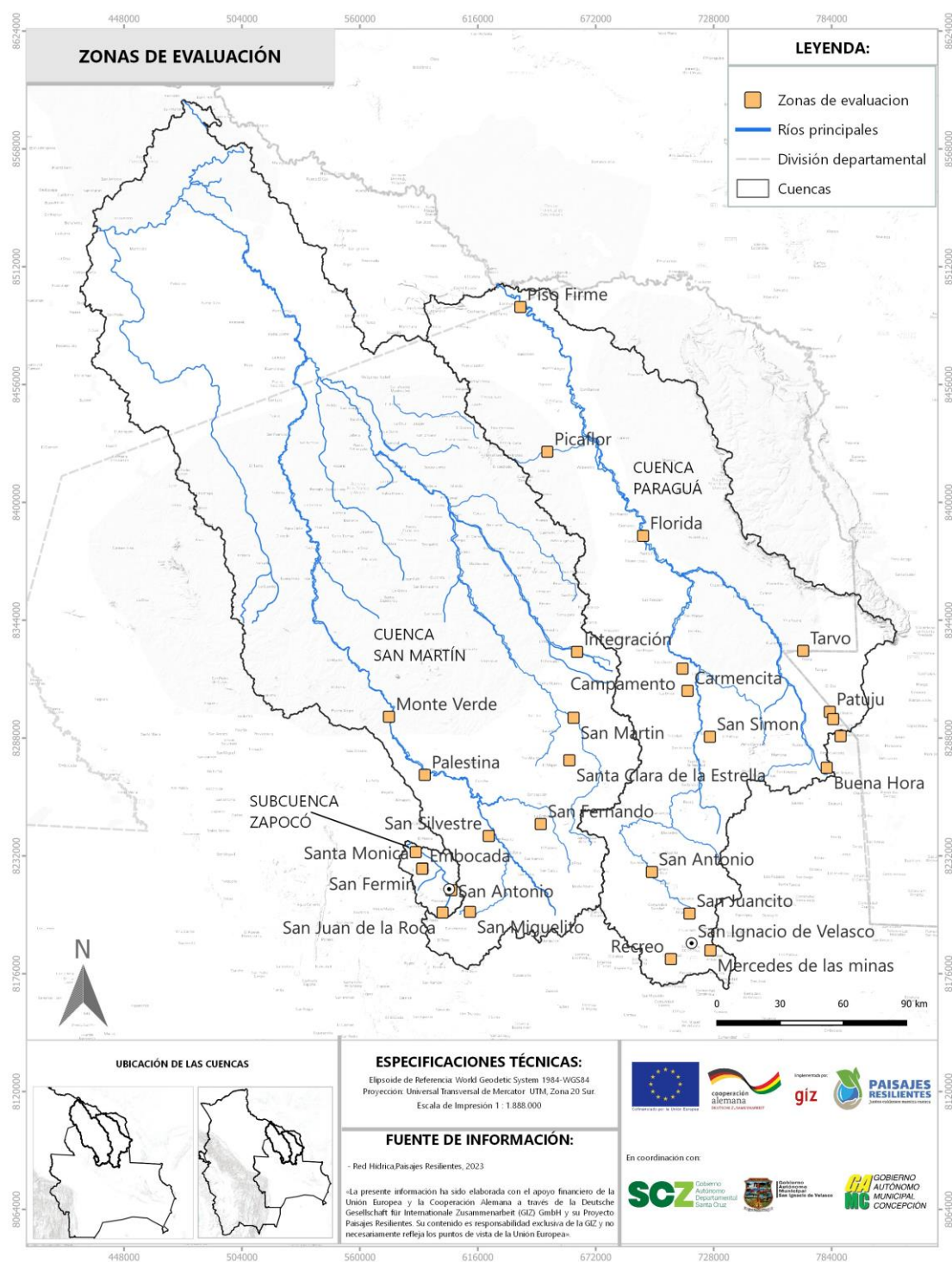
Cuenca/Subcuenca	Zona/Comunidad	Cuerpo de agua/Infraestructura			
		Pozos	Represas	Ríos	Total
Paraguá	Buena Hora	1	-	-	1
	Campamento	2	-	-	2
	Carmencita	1	-	-	1
	Chichapó	-	-	3	3
	El Recreo	1	-	-	1
	Florida	4	-	3	7
	Marfil	1	-	-	1
	Mercedes de las minas	2	-	-	2
	Pailitas	1	-	-	1
	Patujú	2	-	-	2
	Picaflor	4	-	-	4
	Piso Firme	1	-	3	4
	San Antonio	-	-	2	2
	San Juancito	2	3	-	5
	San Nicolas de Cerrito	2	-	-	2
	San Simón	1	-	3	4
	Ciudad de San Ignacio	-	6	-	6
	Tarvo	-	-	3	3
San Martín	San Martín	1	-	3	4
	Embocada	1	-	-	1
	Integración	-	-	2	2

⁶ Los pozos para ser monitoreados deberían tener estructuras para la introducción de sondas de medición y toma de muestras.

Cuenca/Subcuenca	Zona/Comunidad	Cuerpo de agua/Infraestructura			
		Pozos	Represas	Ríos	Total
	Monte Verde	2	-	3	5
	Palestina	2	-	-	2
	San Fernando	1	-	-	1
	San Miguelito	2	-	-	2
	San Silvestre	2	-	3	5
	Santa Clara de la estrella	3	-	-	3
Zapocó	Ciudad de Concepción	3	6	-	9
	San Fermín	2	-	-	2
	San Juan De la Roca	3	-	-	3
	Santa Mónica	3	-	-	3
	Total general	50	15	28	93

Fuente: Elaboración propia

Mapa 7. Zonas de evaluación dentro de la Red de Monitoreo (RDM).



Fuente: Elaboración basado en la información del proyecto "Paisajes Resilientes en la Chiquitania".

En cada zona/comunidad se evaluaron diferentes cuerpos de agua según la importancia de uso para la comunidad. En cada punto de evaluación se evaluaron dos conjuntos de variables: cantidad y la calidad de agua, según muestra la Figura 2. La distribución de las áreas o zonas de muestreo, así como los puntos de evaluación en pozos, ríos y represas.

Figura 2. Esquema del diseño de muestreo para la toma de datos.



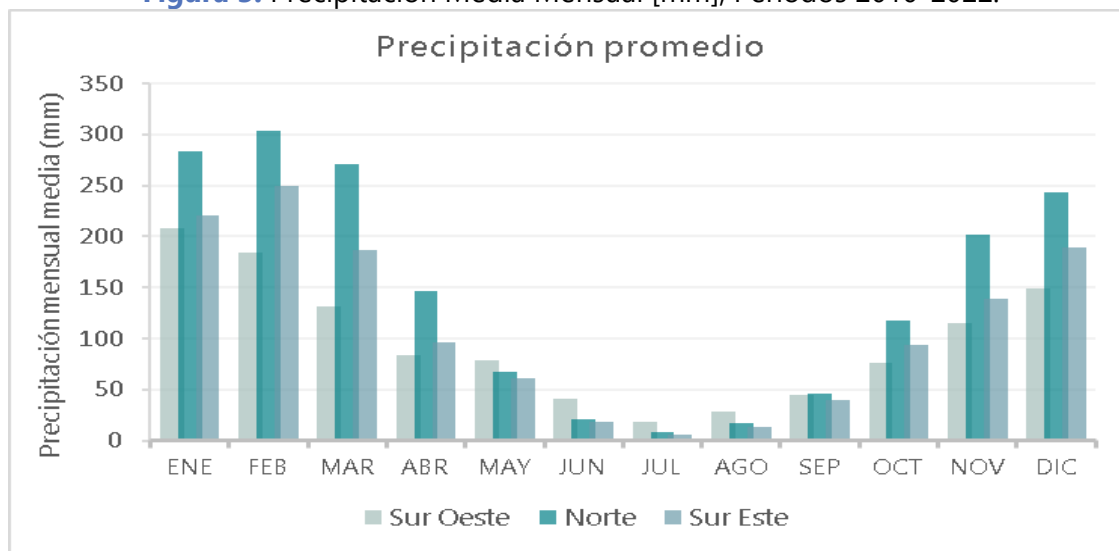
Fuente: Elaboración propia

Para la codificación de los puntos de monitoreo, se inicia con las primeras letras del municipio, seguido de las primeras letras de la cuenca. Posteriormente, se usó un acrónimo de la comunidad (zona de evaluación), seguido del punto de monitoreo representado por el tipo de cuerpo de agua muestreado y el número de muestra dentro del cuerpo de agua.

4.2.3 Periodos de muestreo

Para este trabajo se observó que los meses más secos y húmedos tuvieron un desplazamiento temporal o “retraso” que sólo fue perceptible analizando los últimos 10 años, donde la época seca iniciaba a fines de abril y era contundente a partir de mayo, mientras que en este periodo temporal del estudio entre 2022 y 2023 comienza a fines de mayo y es contundente en agosto (Figura 3).

Figura 3. Precipitación Media Mensual [mm], Períodos 2010-2022.



Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes (se representan los datos meteorológicos encontradas para las cuencas de estudio).

Las muestras fueron evaluadas en los periodos:

- **Periodo de Transición Más Húmedo (PTMH)** desde febrero a mayo del 2022.
- **Periodo de Transición Más Seco (PTMS)** desde fines de abril a junio del 2023.

4.3 Variables de monitoreo

Las mediciones en ambos periodos de monitoreo sirvieron para seleccionar las métricas que varían a lo largo de las cuencas y de esta forma conservar las más importantes para posteriores monitoreos. A continuación, se resumen las principales variables de monitoreo para la calidad y cantidad de aguas, así como las referencias de los análisis empleados para este trabajo.

4.3.1 Cantidad de aguas

A Aguas subterráneas

A continuación, se resumen las principales variables empleadas en las mediciones de pozos Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de las variables de evaluación de pozos.

Variable	Descripción	Uso en la red de monitoreo.
Datos constructivos del pozo	Diámetro y profundidad del pozo, material y altura de la boca de pozo.	Los datos constructivos de pozo se usan como información complementaria al análisis de producción de agua, operación y mantenimiento del pozo. Estos datos generalmente se miden sólo una vez, excepto la profundidad del pozo, que puede medirse en cada campaña para detectar si existe colapso de las paredes del pozo y programar mantenimiento.
Uso del agua y régimen de bombeo	Uso del agua: Se refiere a la finalidad del uso de agua Tiempo de bombeo, se refiere al lapso que dura el bombeo del pozo (medido en hrs) Frecuencia de bombeo, se refiere a la cantidad de veces al día que se bombea el pozo Suficiencia del pozo, evalúa cualitativamente si el pozo es suficiente como fuente de agua para el uso declarado (suficiente o insuficiente) Potencia de bomba del pozo (medido en Hp) Volumen del reservorio de agua que alimenta el pozo (medido en litros)	Se requiere conocer el uso del agua para determinar si el agua del pozo es apta para su consumo o requiere algún tipo de tratamiento adicional. El régimen de bombeo está relacionado con la operación del pozo, con esta información se puede estimar la producción de agua del pozo, programar limpieza de la rejilla y filtros del pozo y detectar declives en la producción de agua con el monitoreo continuo.
Niveles de agua subterránea	Altura al nivel estático es la altura medida desde la boca del pozo al nivel de agua subterránea, cuando el pozo no ha sido bombeado por lo menos 12 hrs antes de la medición (medido en m) Altura al nivel dinámico es la altura medida desde la boca del pozo al nivel de agua subterránea cuando el pozo es bombeado hasta alcanzar un nivel estable (medido en metros)	El análisis de los niveles estáticos y dinámicos de los pozos permiten estimar la recarga en los acuíferos, la producción de agua de los pozos, detectar sobre explotación del acuífero, establecer conexiones hidráulicas con aguas superficiales y estimar flujos

Variable	Descripción	Uso en la red de monitoreo.
		base en cuerpos de agua superficial.
Protección de boca de pozo	Condición de la boca de pozo y tapa: - Buena, el encamisado de la boca de pozo y/o su tapa sellan el acceso al pozo y son metálicos, no tienen rajaduras ni grietas y a la altura del encamisado es ≥ 25 cm. - Regular, el encamisado de la boca de pozo y/o su tapa tienen rajaduras o grietas y son metálicos, la altura del encamisado es < 25 cm. - Mala, el encamisado de la boca de pozo y/o su tapa tienen rajaduras, grietas u orificios que permiten el acceso a reptiles, anfibios y otros animales pequeños o la tapa se abre fácilmente o son de materiales poco resistentes (gomas, plásticos). Condición de la base: - Buena, la boca de pozo tiene una base de hormigón que no presenta deterioro, ni rajaduras que permitan paso de contaminantes. - Regular, la boca de pozo tiene una base de hormigón deteriorada o desgastada por el paso del tiempo y rajaduras o grietas que no son profundas. - Mala, la boca de pozo no tiene base de hormigón o tiene una muy deteriorada que permite el crecimiento de algas y rajaduras o grietas profundas que permiten paso de agua a la base de la boca del pozo. Accesibilidad al pozo: - Buena, acceso al pozo está restringido a personal autorizado. Existe infraestructura de cerramiento o caseta. - Regular, aunque existe cerramiento alrededor del pozo, este puede ser sorteado (por ejemplo, alambre de púas, tabla y estacas de madera). - Malo, no existe cerramiento, tanto personas como humanos pueden acceder a la boca del pozo.	Las condiciones de protección de boca de pozo permiten evaluar el riesgo y posibles fuentes de contaminación de un pozo, lo cual es útil en el análisis de calidad de agua. También se alerta a los usuarios del pozo de mantener en buenas condiciones la boca de pozo protegida y crea conciencia de la importancia de esta tarea. Adicionalmente es posible realizar el seguimiento de mejoras de las condiciones de boca de pozo en el tiempo y evaluar su efecto en la calidad del agua subterránea.

Variable	Descripción	Uso en la red de monitoreo.
	Actividad antrópica, se describe las actividades humanas en un radio de 50 m alrededor del pozo (por ejemplo, pozos ciegos, ganado pastando, etc.)	

Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes.

B Aguas superficiales

A continuación, se resumen las principales variables que se emplearon para aguas superficiales: ríos y represas (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de las variables de evaluación de ríos y represas.

Variable	Descripción	Uso en la red de monitoreo.
Forma del río	Recto, cuando la sinuosidad y tiene un canal único Meandriforme, cuando la sinuosidad y tiene un canal único Anastomosado, cuando la sinuosidad y tiene múltiples canales.	La forma del río es importante al establecer el punto de monitoreo especialmente de caudales evitando tramos curvos y anastomosados. La forma del río se realiza por una solo vez, a menos que exista evidencia de que la forma del río cambie.
Tipo de margen	Encajonado, normalmente el agua no desborda el canal del río en época de lluvias Inundable, cuando el agua desborda el canal del río en época de lluvias con frecuencia.	El tipo de margen es importante al establecer el punto de monitoreo y ha sido determinado a partir de información proporcionada por las comunidades cercanas. Al momento de elegir puntos de monitoreo se prefieren tramos encajonados debido a la facilidad de ubicar los puntos de referencia y es posible la medición de caudales a diferencia de los tramos inundables donde no es posible medir caudales en época de lluvias.
Variables hidrológicas	Altura bpr (bajo punto de referencia), es la altura medida desde un punto de referencia fijo (por ejemplo, un puente, muelle, etc.) hasta el nivel de agua superficial, medido en m Tirante es la altura de agua medida desde el punto más bajo del lecho del río hasta el nivel de agua. El punto más bajo puede variar por lo que se requiere hacer varias mediciones a lo largo de una sección de río y elegir la mayor.	Las variables hidrológicas son mediciones que permiten determinar la cantidad de agua que se produce en la cuenca y por tanto es fundamental para la gestión y manejo de recursos hídricos.

Variable	Descripción	Uso en la red de monitoreo.
Caudal del río medido en m ³ /s		
Nivel de agua en la represa	Altura bpr (bajo punto de referencia), es la altura medida desde un punto de referencia fijo (por ejemplo, un puente, muelle, estación de bombeo, etc.) hasta el nivel de agua superficial, medido en metros.	El nivel de agua en la represa combinada con una curva batimétrica de la misma permite determinar el volumen de agua almacenada en la presa.

Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes.

4.3.2 Calidad de aguas

A continuación, se resumen las principales variables medidas en aguas superficiales y subterráneas, la descripción del uso de cada variable analizada se separa en ambas categorías (Tabla 5).

Tabla 5. Descripción de las principales variables de monitoreo de calidad de aguas fisicoquímicas para aguas subterráneas y superficiales.

Tipo de variables	Variable	Aguas subterráneas	Aguas superficiales
In Situ	pH	Medición de la cantidad de acidez o basicidad en el agua. Las aguas subterráneas de las cuencas evaluadas en general tienen aguas ácidas de manera natural.	En cambio, en aguas superficiales, este parámetro cambia a neutro, por lo cual debe ser evaluado en el monitoreo.
	Sólidos Suspendidos totales (TDS mg/l)	Se mide debido a que en aguas subterráneas un incremento en este punto podría indicar falta de limpieza en el pozo.	En aguas superficiales mide el efecto de remoción de la ribera en el río y la formación de arcillas.
	Conductividad (µs/cm ²)	Medición de la cantidad de sales disueltas en el agua; en pozos puede ser alta por la presencia de carbonatos u otro tipo de sales.	En el caso de ríos y represas este parámetro mide la cantidad de sales que entran de manera natural o por efecto antrópico.
	Oxígeno disuelto (mg/l)	Evalúa el efecto de sobresaturación producido en tanques derivado de la materia orgánica por falta de limpieza. Los niveles bajos son comunes en estos ambientes.	En ríos y represas derivan de la contaminación antrópica tanto en la sobresaturación (> 130%) como en niveles bajos (<30%).
Ex Situ	Turbidez (NTU) Este parámetro sólo fue evaluado para el PTMS, ya que los altos valores	Se mide debido a que en aguas subterráneas la falta de transparencia refleja que los pozos tienen alteración por efecto de derrumbes internos.	En aguas superficiales refleja los desmontes de la ribera.

Tipo de variables	Variable	Aguas subterráneas	Aguas superficiales
	derivados de las lluvias son normalmente altos.	donde debe existir transparencia total.	
	Fosfatos (mg/l)	Se mide debido a que en aguas subterráneas podría existir rocas fosfatadas.	En aguas superficiales, presencia de fósforo indica el vertido de, detergentes o fertilizantes fosforados.
	Nitratos (mg/l)	Se mide debido a que en aguas subterráneas existe cercanía de aguas servidas por pozos ciegos, en especial en pozos poco profundos.	En aguas superficiales podrían ser fuentes de alteración orgánica.
	Sulfatos (mg/l)	Se mide debido a que en aguas subterráneas podría existir posibles infiltraciones de fertilizantes.	En aguas superficiales, presencia de actividades agrícolas a escalas industriales.
	Hierro (mg/l)	Se mide debido a posibles formaciones de oxi-hidróxidos de hierro, que podrían estar asociadas a metales como el arsénico.	En aguas superficiales, el hierro en grandes cantidades podría ser natural o bien estar asociado a otras trazas de metales como el cadmio o plomo.
	OTROS PARÁMETROS ANALIZADOS DE FORMA CUALITATIVA	Todos los parámetros descritos a continuación fueron un mecanismo para identificar algún elemento traza presente en el agua. Se evaluaron: ○ Cianuro, plomo, cobre, aluminio, mercurio, cloro total, cloro libre, bromo, nitritos, flúor, dureza y alcalinidad. ○ Todos estos parámetros estuvieron en un nivel sin ser detectados, por lo cual no se presentan más que en la base de datos.	

Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes.

De forma complementaria a los análisis fisicoquímicos, en aguas superficiales se evaluó la calidad biológica para esto se empleó como bioindicadores a la comunidad de macroinvertebrados acuáticos (MIA). Las colectas se realizaron en base a la guía para la evaluación de las condiciones biológicas de los cuerpos de agua utilizando macroinvertebrados bentónicos (Rocabado & Goitia 2011). La Tabla 6 describe las variables analizadas en las cuencas de estudio.

Tabla 6. Descripción de las principales variables de monitoreo para macroinvertebrados acuáticos

Variable	Descripción del uso para el monitoreo
Abundancia	La abundancia evalúa la cantidad total de macroinvertebrados encontrados, frente a la contaminación a veces se incrementa la abundancia, pero sólo de pocos grupos.
Números de Hill	Los números de Hill, son una herramienta matemática utilizada en ecología para medir como la presencia de contaminantes afecta a la diversidad de especies en un ecosistema acuático. Para caracterizar la diversidad de especies de un conjunto, se utilizar tres variables basadas en: riqueza de especies, la exponencial de la entropía de Shannon (a la que nos referimos como diversidad de Shannon) y la concentración inversa de Simpson (a lo que nos referimos como diversidad Simpson).
Riqueza	Es una medida simple que se refiere al número total de taxones diferentes (por ejemplo: especies o familias), presentes en un área o comunidad. Puede medir las variaciones del número de taxones en función de la contaminación antrópica, mientras más afectado este un sitio menor riqueza tiene. La riqueza de especies es importante como punto de partida para comprender la biodiversidad en un área, pero no proporciona información sobre la distribución relativa de individuos entre esos taxones, su equidad o dominancia.
Diversidad Shannon	Es una medida que tiene en cuenta tanto la riqueza de especies como la equidad o la uniformidad en la distribución de individuos entre esas especies en una comunidad. Cuanto mayor sea el valor de la diversidad de Shannon (su unidad es taxones equivalentes), mayor será la diversidad y la equidad en la comunidad. Una comunidad biológica con un gran número de <i>taxones equivalentes igualmente abundantes</i> es una característica de ecosistemas acuáticos no contaminados.
Diversidad de Simpson	Es otra medida de diversidad que se centra en la dominancia de especies en una comunidad (su unidad es taxones equivalentes). Cuanto mayor sea el valor de la diversidad de Simpson, mayor será el número de especies dominantes en la comunidad. Una comunidad con un gran número de <i>taxones equivalentes igualmente dominantes</i> es una característica de ecosistemas acuáticos no contaminados.
Índice BMWP/Bol	Evalúa los valores de sensibilidad / tolerancia, de la comunidad de macroinvertebrados, mientras más contaminación exista sólo subsisten organismos resistentes a la contaminación.

4.4 Análisis de la información

4.4.1 Cantidad de aguas

A Aguas Subterráneas

El monitoreo de agua subterránea permitió la medición de los niveles de agua subterránea que se encuentra en los acuíferos. La forma, extensión y el tipo de acuíferos están ligados a la geología de la zona, porque el tipo de suelo y/o roca son el “recipiente” que contiene el agua subterránea.

En las cuencas de estudio existe información geológica regional, pero hay un vacío de información a escala local, en especial en las zonas de los pozos de monitoreo. Sin

embargo, es posible analizar la información geológica regional (Mapa 4) e inferir pautas para entender cómo son los acuíferos en las cuencas de estudio, aunque todo esto debe ser complemento con estudios localizados en los pozos de monitoreo.

- El mapa geológico regional (Mapa 4), muestra gran variedad de unidades geológicas en la zona de estudio. Esta variedad de rocas provoca que no existan acuíferos someros que sean continuos y de grandes extensiones ya que las distintas unidades y estructuras geológicas funcionan como límites o bordes naturales de los acuíferos.
- Los sedimentos superficiales no tienen gran espesor, es decir que las rocas del escudo brasileiro están a baja profundidad, lo que limita la profundidad de los pozos.

En general se entiende que los acuíferos monitoreados en las cuencas no tienen grandes extensiones y no son profundos y no están conectados entre sí, especialmente entre puntos de monitoreo alejados.

B Aguas superficiales

i Ríos

No se encontraron estudios previos de monitoreo realizados en los ríos o en las cuencas salvo descripciones básicas. En este sentido, en el presente estudio se realizó una clasificación básica de la forma de los tramos evaluados, que permite entender el tipo y las características asociadas al mismo.

ii Represas

La información de la represa Guapomó y Zapocó se obtuvo del "*Inventario Nacional de Presas*" (PROAGRO, 2010), que se resume a continuación:

- La represa Guapomó se encuentra en San Ignacio de Velasco y fue construida entre 1975 y 1977, y tuvo reparaciones en 1991 y ampliaciones en 2001. Actualmente es administrada por la Cooperativa de Servicios Públicos de San Ignacio de Velasco (COOSIV Ltda.). Esta presa cuenta con información batimétrica, lo cual permite determinar el volumen de agua almacenada para los distintos monitoreos.
- La represa San Juancito, por el momento no es parte del inventario nacional de presas (PROAGRO, 2010). Esta represa, se ubica en el municipio de San Ignacio, es un reservorio de agua, que se espera alimente al sistema de distribución de aguas en el municipio. Por el momento, es utilizada para la pesca y tienen una función recreativa de la cual se beneficia la comunidad San Juancito y otras cercanas.

- La represa Zapocó se encuentra en Concepción y fue construida entre 1987 y 1988, y tuvo ampliaciones en los años 1990 y 2007. Desafortunadamente no se tiene información batimétrica de esta presa. Actualmente es administrada por la Cooperativa de Servicios Públicos de Concepción (COSEPCO).

4.4.2 Calidad de aguas

A Clasificación de parámetros fisicoquímicos

La Ley 1333 clasifica a las variables de calidad de aguas en cinco categorías, que están divididas en función de distintos usos que se pueden dar a las aguas. Se diferencian por colores de acuerdo con la implementación de medidas de purificación. Esta normativa se empleó para saber el tipo de aguas que se tienen dentro de las cuencas Tabla 7.

Tabla 7. Categorización de clases de agua, usos y protección según el Anexo 1 del RMCH de la Ley 1333.

Clase de Agua	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Clase mayor que "D"
Color asignado	Celeste	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
Definición	Aguas naturales de máxima calidad, sin contaminación antrópica o natural.	Aguas naturales sin efectos de contaminación natural o antrópica.	Aguas con signos iniciales de contaminación antrópica.	Aguas de utilidad general.	Aguas de mínima calidad, provienen de efluentes industriales.
Consumo humano de agua	Abastecimiento doméstico de agua potable sin tratamiento bacteriológico.	Abastecimiento doméstico de agua potable, previa desinfección.	Antes de su consumo debe realizar un tratamiento físico y bacteriológico.	Antes de su consumo debe realizar un tratamiento fisicoquímico o bacteriológico.	Antes de su consumo debe realizar un tratamiento fisicoquímico y bacteriológico, más sofisticado.
Uso para recreación	De contacto primario, como natación e higiene.	De contacto primario, como natación e higiene.	Apta	No apta	No apta
Protección de hidrobiología	Apta	Apta	No apta	No apta	No apta
Aptitud para riego	Es útil, pero es mejor conservar la fuente de agua.	Apta, y para consumo de verdura cruda y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas	Apta, y para consumo de verdura cruda y frutas con cáscara gruesa.	No apta	No apta

Clase de Agua	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Clase mayor que "D"
crudas sin remoción.					
Acuicultura*	Debe evitarse porque son necesarios criterios de conservación. **	Es posible, con manejo de residuos orgánicos.	Para la cría natural y/o intensiva de especies destinadas a la alimentación humana.	No apta	No apta
Ganadería	Debería evitarse y tener medidas de conservación**	Debería ser preservada para su conservación.	Para abrevadero de animales.	Antes del consumo deben recibir tratamientos físico-químicos.	Evitar el consumo para el ganado
Navegación	Debería evitarse porque deben estar en algún criterio de conservación *	Útil para navegación	Útil para navegación	Útil para navegación	Útil para navegación

* Manejo de la pesca con fines comerciales.

* En el medio natural es muy difícil encontrar aguas de clase A, por lo tanto, es necesario su conservación y manejo adecuado.

Fuente: Elaboración propia basada en la Ley 1333 - RMCH.

Una evaluación de calidad de aguas puede tener múltiples categorías, pero la Ley 1333 establece que la clase que adopta el cuerpo de agua es la más pobre encontrada en el análisis. Las variables de calidad evaluadas se resumieron en cuatro categorías: Variables básicas, no metálicas, metales y microbiológicos, así mismo para presentar los gráficos se empleó la codificación basada en la Tabla 8.

Tabla 8. Categorías empleadas en la sistematización de la información de variables fisicoquímicas.

Categoría	Variable	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Clase mayor a "D"
Básicas	pH	6,0 a 8,5	8,5 a 9,0	-	-	< 6 y > 9
	Conductividad eléctrica (C.E.) (µcm/cm)	0 a 140	140 a 300	300 a 500	500 a 1,600	>1,600
	Sólidos Totales disueltos (T.D.S.) (mg/l)	0 a 1,000	-	1,000 a 1,500	-	>1,500
	Oxígeno Disuelto (% O.D.)	>80	70 a 80	60 a 70	50 a 60	<50

Categoría	Variable	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Clase mayor a "D"
	Turbidez (TURB) (NTU)	0 a 10	10 a 50	50 a 100	100 a 200	>200
No metálicas	Nitratos (NO ₃) (mg/l)	0 a 20	20 a 50	-	-	>50
	Fosfatos (PO ₄) (mg/l)	0 a 0,4	0,4 a 0,5	0,5 a 1	-	>1
	Sulfatos (SO ₄) (mg/l)	0 a 300	300 a 350	350 a 400	-	>400
	Hierro (Fe) (mg/l)	0 a 0,3	-	0,3 a 1	-	>1
Microbiológicas	Coliformes fecales (Coli.Fec) (NMP)	0 - <5	5 - 200	200 - <1000	1000 - 5000	≥5000

Fuente: Elaboración propia, a partir de los límites en el Anexo 1 de la Ley 1333.

B Análisis descriptivos de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos (MIA)

Los datos fueron analizados utilizando: estadística descriptiva (máximo, mínimo, promedio y desviación típica estándar), números de Hill, índices de similitud, análisis de agrupamiento y correlación.

Con el propósito de comparar entre los tramos evaluados se cuantificó el número de especie, familia u orden, de acuerdo con el método presentado por Moreno (2001). Para comparar la riqueza de especies entre cada sitio de estudio, se realizó la estandarización por rarefacción al número comparable de individuos (Gotelli y Colwell, 2001). Para esto, se utilizó el programa R versión 3.4.0 (R Core Team, 2021), que utiliza la riqueza, exponencial de Shannon y Simpson invertido como base del análisis (Jost, 2006; Chao et al., 2014).

Para clasificar la calidad del agua en base a la diversidad de Shannon (Exponencial de Shannon) y diversidad de Simpson (Inverso de Simpson), se utilizó la escala que se describe en la siguiente tabla, construida en base a los límites máximos, mínimos y la división de cuatro clases de calidad de agua, definidas para este trabajo.

Tabla 9. Categorías empleadas en la sistematización de la información de variables biológicas, desarrolladas para las cuencas de estudio.

Clases de calidad del agua en base a los índices de diversidad de Shannon y Simpson						
Clases	Diversidad de Shannon		Unidad	Medición	Explicación biológica	Significado calidad biológica de las aguas
Clase 1	4.5	8.6	Taxones equivalentes	Mide la cantidad de taxones	Baja equitatividad	Calidad muy baja
Clase 2	8.6	12.8		igualmente abundantes	Equitatividad media	Calidad baja
Clase 3	12.8	17.0			Equitativa	Calidad buena

Clase 4	17.0	21.2		Muy equitativa	Calidad muy buena
---------	------	------	--	----------------	-------------------

Clases	Diversidad de Simpson		Unidad	Medición	Explicación biológica	Significado calidad biológica de las aguas
Clase 1	2.4	5.4	Taxones equivalentes	Mide la cantidad de taxones igualmente dominantes	Dominancia muy baja	Calidad muy baja
Clase 2	5.4	8.3			Dominancia baja	Calidad baja
Clase 3	8.3	11.2			Dominancia media	Calidad buena
Clase 4	11.2	14.1			Alta dominancia	Calidad muy buena

Fuente: Elaboración propia

5. RESULTADOS

Los resultados de los periodos de monitoreo corresponden a una línea base de cantidad y calidad de agua en las cuencas, y por el momento no tienen puntos de comparación. De esta forma, los análisis descritos abajo corresponden a primeros hallazgos, que deben ser corroboradas, complementadas y/o rectificadas a medida que la red de monitoreo cuente con mayor cantidad de información. Este hecho denota la importancia de mantener la red de monitoreo.

5.1 AGUAS SUBTERRÁNEAS

5.1.1 CANTIDAD DE AGUA

A Descripción general

Un acuífero es un reservorio de agua, si el nivel estático del agua subterránea sube significa que el acuífero se recarga y tiene mayor cantidad de agua disponible, cuando este nivel desciende entonces el acuífero se descarga y tiene menos cantidad de agua.

El monitoreo continuo de los niveles de agua en los acuíferos y el análisis de las variaciones de estos niveles permite conocer si el acuífero gana o pierde agua, estimar su recarga, determinar los meses de mayor y menor almacenamiento de agua, establecer su producción de agua sostenible, establecer límites para alertas tempranas en caso del deterioro del acuífero en términos de cantidad de agua entre otros.

Si bien aún no es posible conocer las características de los acuíferos mencionadas anteriormente, con las campañas de monitoreo realizadas, se da el primer paso hacia este fin.

B Análisis del nivel estático en pozos

Se midieron los niveles estáticos en los pozos de monitoreo, desde la superficie hasta el nivel de agua en el pozo. Las variaciones de los niveles estáticos entre las fechas de monitoreo se determinaron mediante la diferencia entre los niveles estáticos medidos en el PTMH y el PTMS.

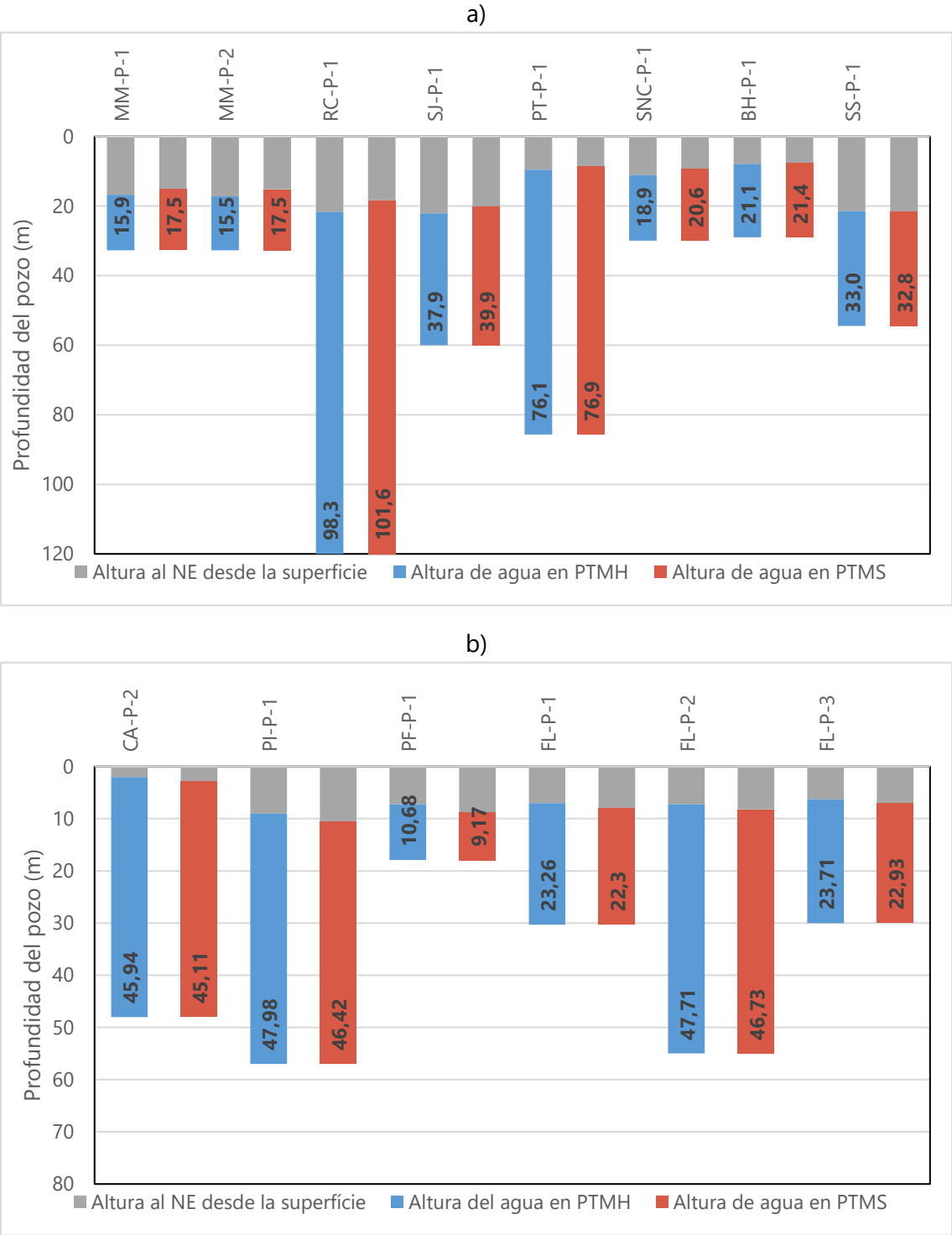
En las siguientes figuras, se representa esquemáticamente los pozos medidos donde: El tamaño de la barra completa es la medición de profundidad del pozo, es decir la altura al nivel estático⁷ (en gris) y la altura o columna de agua en el pozo (azul para PTMH y rojo para PTMS), para las cuencas Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó respectivamente, para los periodos de monitoreo.

Los pozos monitoreados: Mercedes de las minas (MM), Recreo (RC), San Juancito (SJ), Patujú (PT), San Nicolas del Cerrito (SNC), Buena Hora (BH), San Simón (SS) se ubican en la cuenca alta, se destacan los pozos de Recreo y Patujú como los más profundos (Figura

⁷ La altura al nivel estático es la medición desde la superficie al nivel de agua subterránea. Esta medición se realiza cuando no el pozo no ha sido bombeado por lo menos 12 hrs antes de la medición.

4 a). En la cuenca baja los pozos de Campamento (CA), Picaflor (PF), Florida (FL) no superan los 60 m de profundidad (Figura4 b).

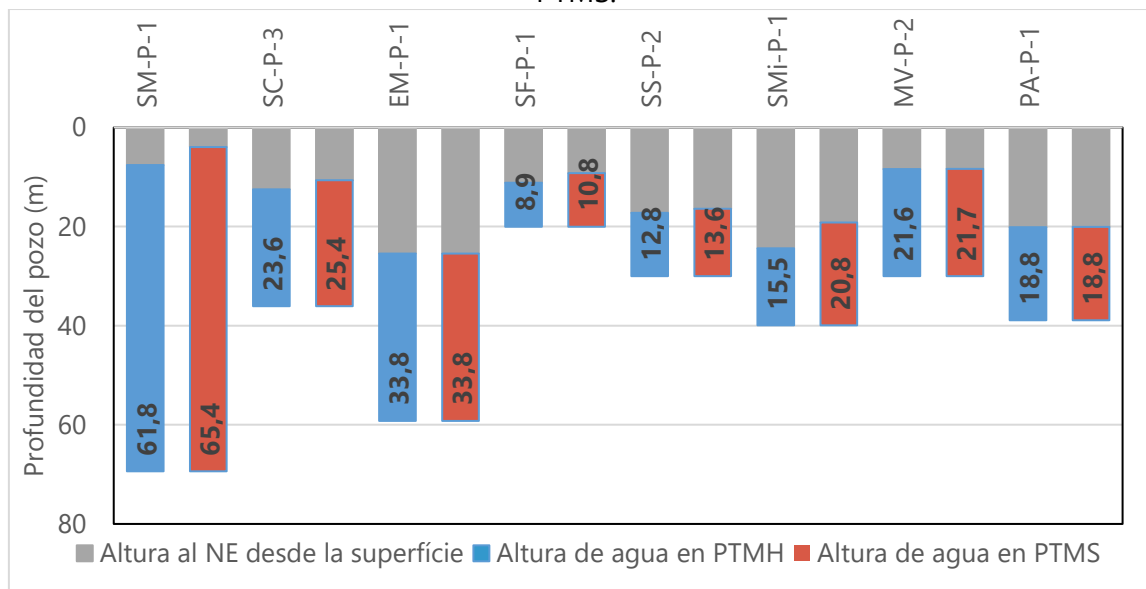
Figura 4. Mediciones de profundidad de pozos, altura del nivel estático (NE) y columna de agua en los pozos de la cuenca Paraguá, a) Parte alta de la cuenca b) Parte baja de la cuenca



Fuente: Elaboración propia.

En la cuenca San Martín se encuentran los pozos de Santa Clara de la estrella (SC), Embocada (EM), San Fernando (SF), San Silvestre (SS), San Miguelito (SMi), San Martín (SM), Monte Verde (MV) y Palestina (PA), los más profundos son Embocada y San Martín Con 59 y 69 metros de profundidad respectivamente.

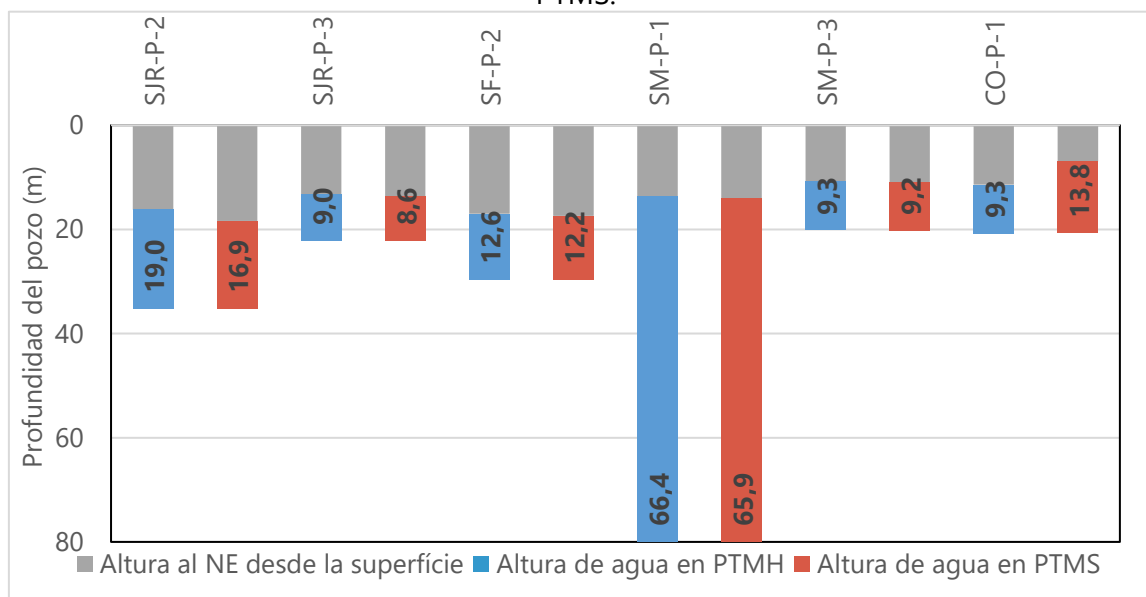
Figura 5. Mediciones de profundidad de pozo, altura al nivel estático y columna de agua en los pozos en la cuenca San Martín, para los periodos de monitoreo PTMH y PTMS.



Fuente: Elaboración propia.

Para la subcuenca Zapocó se monitorearon los pozos de San Juan de la Roca (SJ), San Fermín (SF), Santa Mónica (SM). El pozo (CO) es parte de la cooperativa de agua COCEPCO y a pesar de su baja profundidad es uno de los principales pozos que abastece al centro urbano del municipio de Concepción.

Figura 6. Mediciones de profundidad de pozo, altura al nivel estático y columna de agua en los pozos en la subcuenca Zapocó, para los periodos de monitoreo PTMH y PTMS.

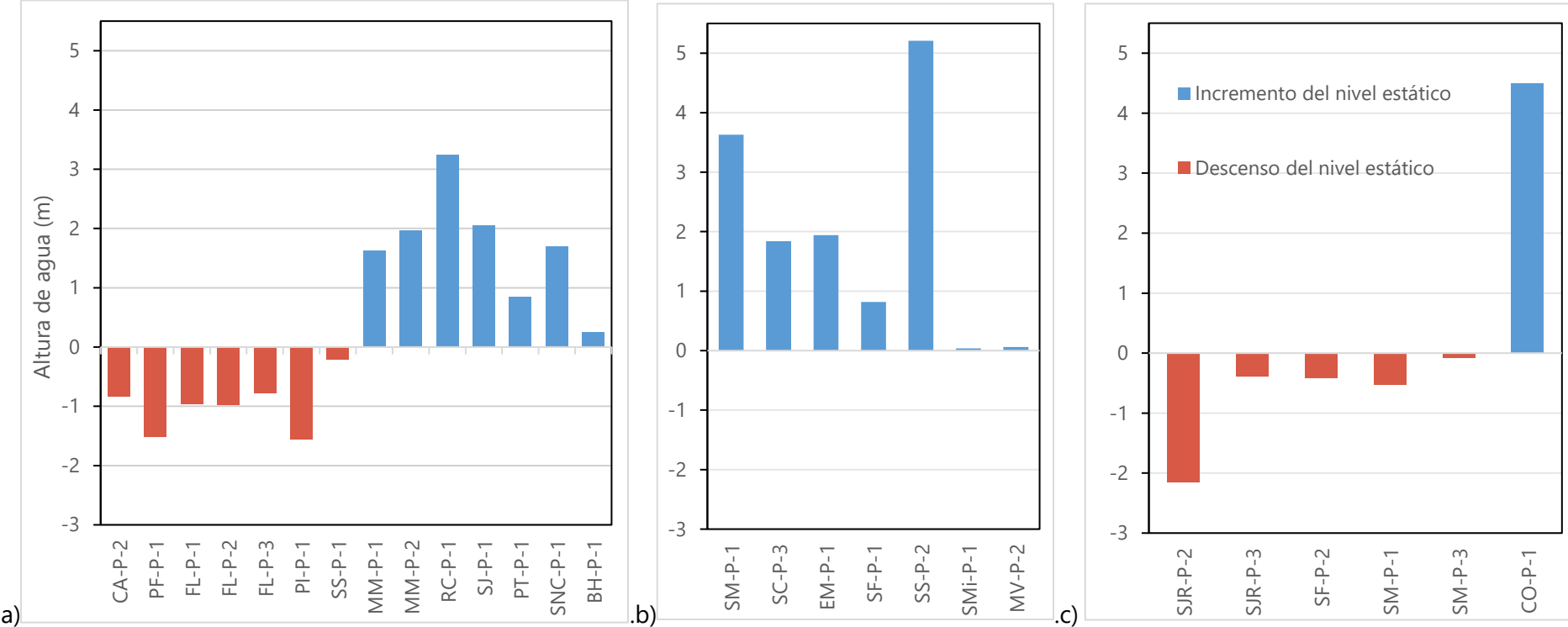


Fuente: Elaboración propia.

A partir de los niveles de agua en ambos monitoreos, se determinó la variación temporal de los niveles estáticos, mediante una la sustracción del PTMH menos el PTMS, que se ilustra en la Figura 7. Los valores negativos indican que hubo un descenso del nivel estático, los valores positivos indican que existió un ascenso en el nivel estático, este ascenso indica que hubo recarga de acuífero que proviene principalmente de la lluvia, se observa que:

- En la cuenca Paraguá, la variación temporal de los niveles de agua no muestra una tendencia clara. Existe casi la misma cantidad de pozos monitoreados con incrementos y descensos de niveles de agua.
- En la cuenca San Martín, la mayoría de los pozos de monitoreo presentaron un incremento del nivel estático entre las épocas de monitoreo.
- En la subcuenca Zapocó, la mayoría de los pozos de monitoreo presentaron un descenso en el nivel estático entre las épocas de monitoreo.

Figura 7. Variación de niveles estáticos entre periodos de medición, a) Paraguá, b) San Martín y c) Zapocó.



Fuente: Elaboración propia.

C Variación espacial

El análisis espacial de las variaciones de nivel estático muestra si existe relación de la variable con la ubicación geográfica, lo cual ayuda a explicar su comportamiento y plantear hipótesis iniciales del funcionamiento de los acuíferos que deben ser corroborados en las campañas de monitoreo futuras.

La Figura 8 muestra la variación del nivel estático en los pozos de monitoreo, donde el tamaño de los puntos es proporcional a la magnitud de variación y los colores azul y rojo indican ascenso o descenso del nivel estático respectivamente. Las observaciones han sido divididas por zonas más pequeñas que las cuencas para mejorar su comprensión:

- Para la parte alta de la cuenca Paraguá, los pozos monitoreados (Recreo, San Juancito y Mercedes de las minas) indican una elevación del nivel estático. Además, estos pozos están en la cuenca alta y son cercanos a la divisoria de cuenca.

En el alto y bajo Paraguá los pozos monitoreados indican un descenso del nivel de agua para el PTMS, también es importante notar que los pozos se encuentran en zonas más bajas y más alejados de la divisoria de la cuenca.

- En la cuenca San Martín, los pozos monitoreados indican una elevación del nivel estático. Se observa que los pozos están cercanos a las divisorias de las cuencas. Excepto Santa Mónica y San Fernando.
- En la subcuenca Zapocó, los pozos monitoreados indican un descenso del nivel estático para el PTMS y también están cercanos a la divisoria de la cuenca.

Generalizando las observaciones de la variación temporal y espacial del nivel estático, se pueden resumir en:

- La variación temporal de los niveles estáticos no muestra patrones o tendencias claras, ya que casi la misma cantidad de pozos experimentaron un incremento y un descenso del nivel estático durante el periodo de PTMH a PTMS.
- En cuanto a la variación espacial de los niveles estáticos, se observa que, en general, los pozos ubicados en las partes altas de las cuencas y/o en las divisiones entre cuencas experimentaron un aumento en el nivel estático, indicando así un proceso de recarga. Por otro lado, los pozos situados en las zonas medias o bajas de la cuenca, más alejados de la divisoria y cercanos a los ríos principales, registraron un descenso en el nivel estático.

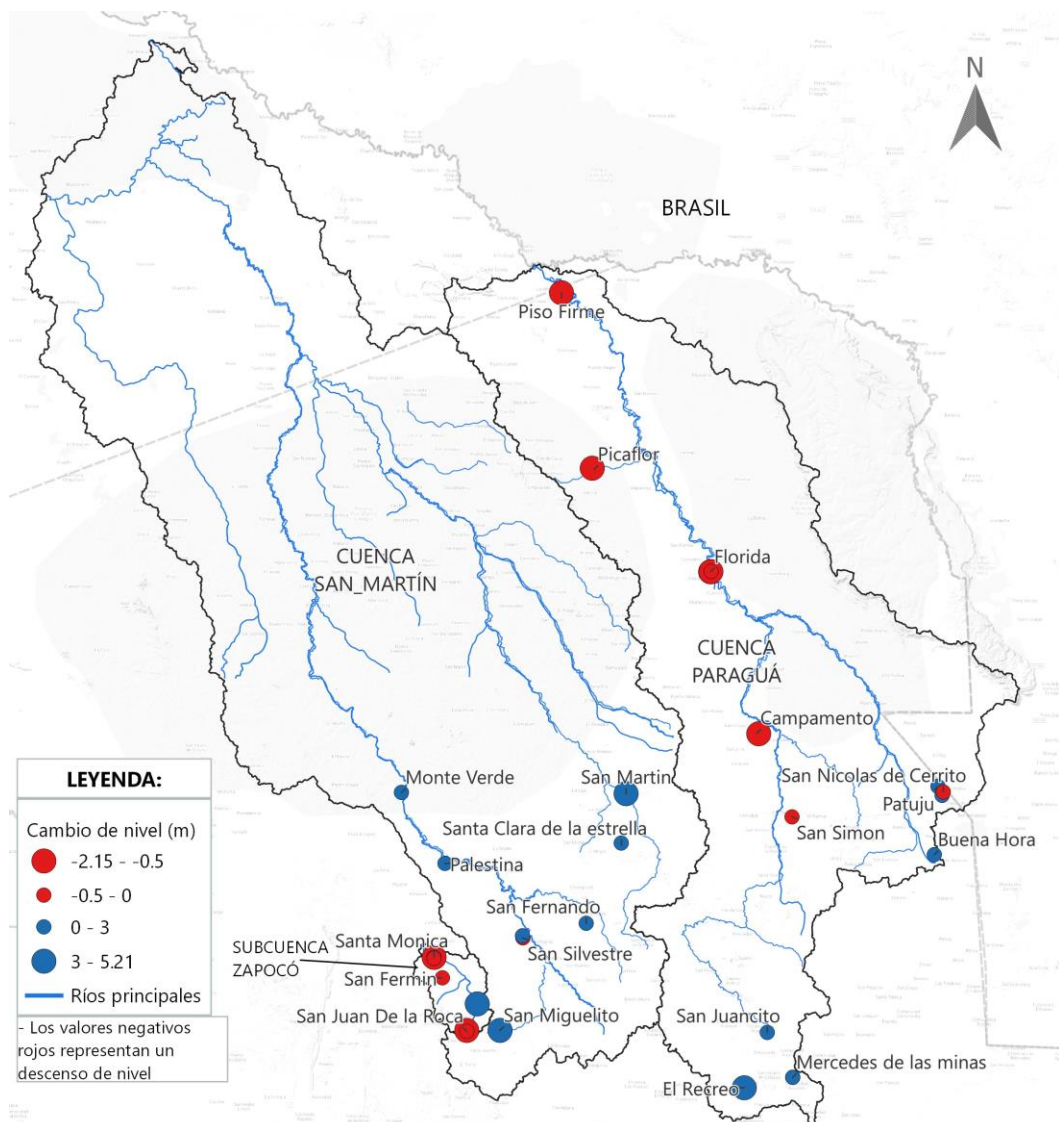
Esto lleva a plantear la hipótesis de que las épocas de recarga de los acuíferos en las cuencas de estudio están relacionadas con su ubicación geográfica (representada por la localización del pozo) que con los periodos de lluvias. Esta conclusión se apoya en el entendimiento de que la recarga de un acuífero a causa de la lluvia no es instantánea, ya que procesos como la infiltración y percolación generan un retraso. Esta afirmación, debe

ser confirmada o replanteada a medida que se genere más información en la red de monitoreo.

Es necesario que los periodos de monitoreo se ajusten a medida que la red genere suficiente información para identificar las épocas dónde los acuíferos presenten la mayor recarga (niveles estáticos más elevados) y cuáles son los mayores descensos del nivel.

Esta información es crucial para estimar la recarga del acuífero, conocer su funcionamiento y evaluar posibles riesgos mediante alertas tempranas en caso de observar comportamientos atípicos.

Figura 8. Variación de los niveles estáticos en los pozos de monitoreo para los (PTMH y PTMS), los círculos rojos representan descenso en el nivel de agua y los círculos azules representan incremento.



Fuente Elaboración propia.

D Producción de agua estimada en los pozos

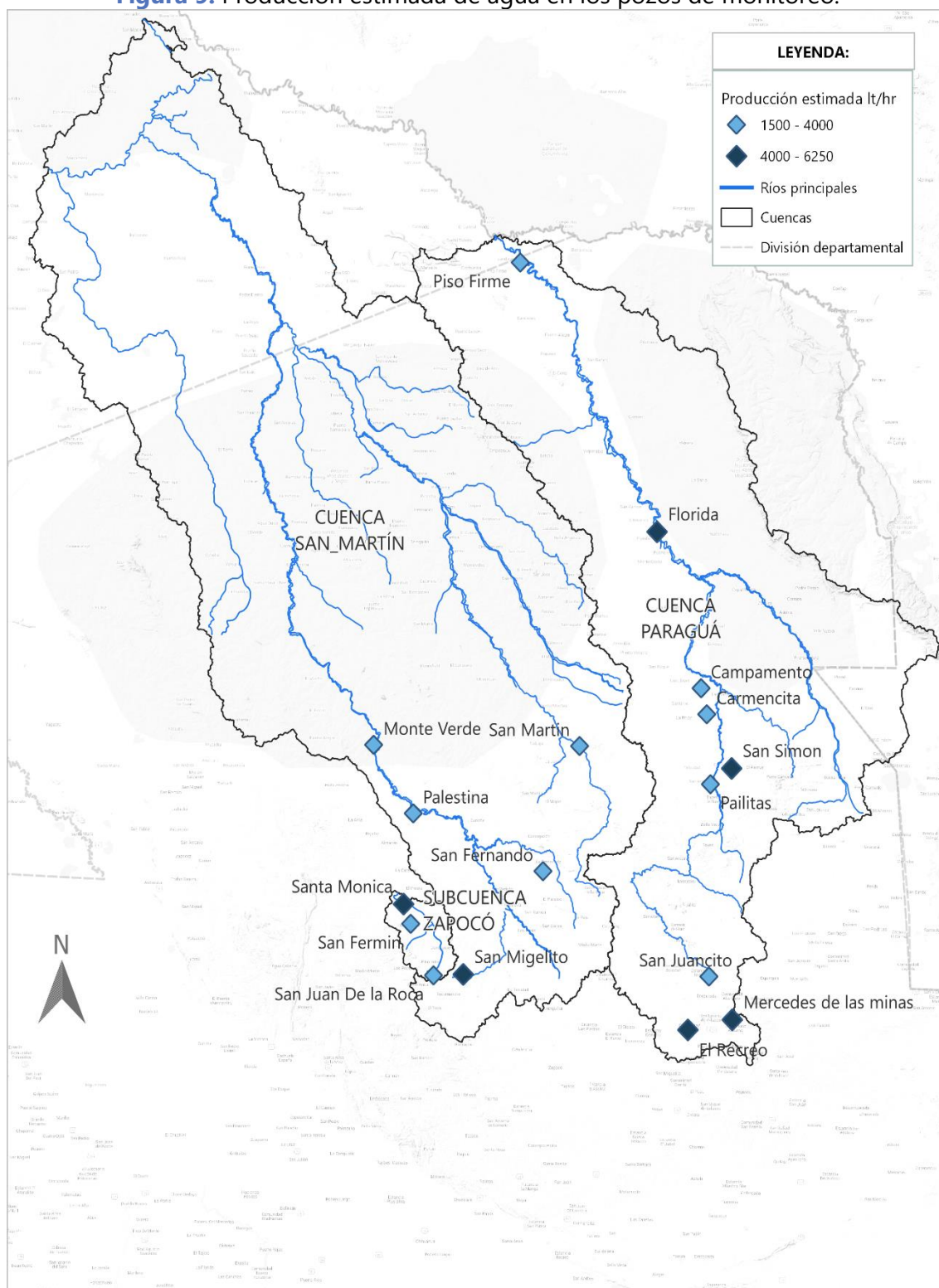
Con la información recolectada en el monitoreo, se estimó la producción de agua en los pozos en base al volumen del reservorio de agua y el tiempo de bombeo indicado por los operadores. Esta estimación no ha sido realizada para los pozos manuales, pozos noria y pozos con sistema automático de bombeo.

Se debe entender que la estimación realizada es únicamente referencial, para conocer la magnitud de la producción de agua. Para determinar el potencial de producción real de agua subterránea se deben realizar pruebas de bombeo. En la Figura 9 se muestra la producción de agua estimada en distintos pozos de monitoreo en las cuencas de estudio.

Se observa que la producción de agua en los pozos de monitoreo es variable y no tiene patrones fácilmente reconocibles. Esto puede deberse a los tipos de acuífero que existen en la zona, los cuales dependen completamente de la geología del escudo brasileiro. Los acuíferos se pueden dividir en:

- Acuíferos de sedimentos consolidados (laterita) que suelen tener baja a media producción de agua (1500 a 4000 l/hr), debido a su reducida porosidad.
- Acuíferos en medio fracturado o fisurado, que se desarrollan en la roca madre y suelen tener producciones relativamente altas para la zona (> 4000 l/hr).

Figura 9. Producción estimada de agua en los pozos de monitoreo.



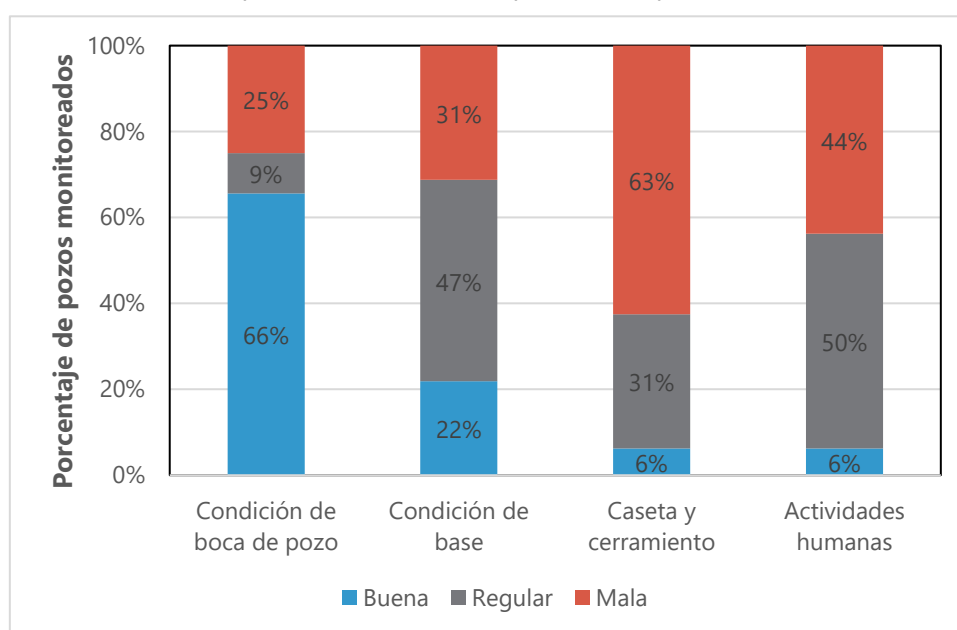
Fuente: Elaboración propia.

E Protección de boca de pozo

La protección de la boca de pozo es importante para prevenir la contaminación del agua subterránea. Se entiende que una protección adecuada impide que agentes externos, como bacterias, sedimentos, elementos químicos, insectos, animales, etc. entren en el pozo y contaminen el agua. Además, evita la entrada de materiales que puedan dañar el equipo de bombeo.

En las cuencas de estudio se ha evaluado la protección de la boca de pozo en los pozos de monitoreo, en función a cuatro parámetros que son: La condición de la boca de pozo (incluye la tapa), condición de la base, caseta o cerramiento y el desarrollo de actividades humanas en la cercanía del pozo (50 m alrededor). Estos parámetros se evaluaron de forma cualitativa como: Bueno, regular y malo. El resumen de los resultados se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Resumen de la protección de boca de pozo en los pozos monitoreados.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la protección de la boca de pozo fue realizado a los pozos de monitoreo y se puede resumir en:

- El 66% de los pozos monitoreados tiene una buena condición de boca de pozo lo que significa que el pozo está encamisado y tiene una tapa que no permite el ingreso de elementos externos al acuífero. Sin embargo, es preciso mejorar las condiciones del 34% de los pozos restantes.
- El 78% de los pozos monitoreados tiene una base de protección de pozo de regular a mala, esto significa que existe riesgo de que elementos contaminantes ingresen al acuífero por la base.
- El parámetro de caseta y cerramiento evalúa la facilidad que tienen las personas para acceder al pozo, en las cuencas de estudio el 94% de los pozos

monitoreados son accesibles, esto puede ser considerado como un riesgo ya que las personas pueden contaminar o manipular de forma errónea el pozo.

- El 94% de los pozos de monitoreo tienen actividades humanas cercanas que pueden ser contaminantes como: La crianza de ganado, aves, viviendas, caminos y/o calles, etc.

El objetivo de esta evaluación es lograr una adecuada protección de boca de pozo, entonces es necesario mejorar la condición de boca de pozo y su base, el control del acceso a los pozos y mantener alejadas actividades humanas potencialmente contaminantes. Estas recomendaciones pueden ser también aplicadas a todos los pozos de las cuencas de estudio.

5.1.2 CALIDAD DE AGUA

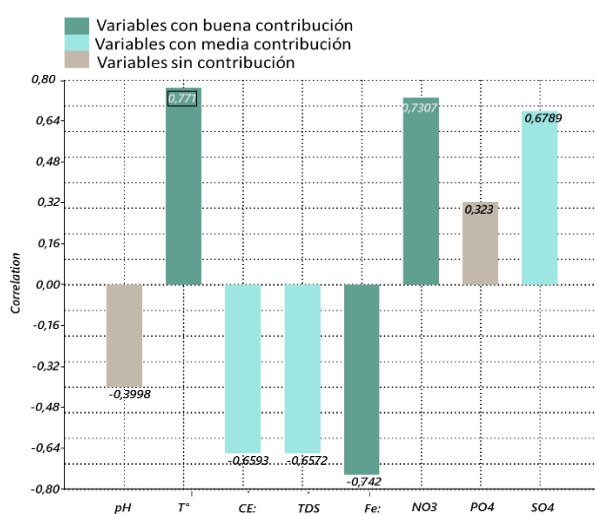
A Descripción general

En la Figura 11, se muestra el comportamiento de las variables que en general contribuyen más a la caracterización de la calidad de aguas subterráneas. Las variables que mejor contribuyeron a esta caracterización fueron aquellas que tuvieron las correlaciones más altas dentro del análisis multifactorial PCA⁸ ($R > 0,4$), cuando el valor de $R < 0,4$ la variable debería ser eliminado a largo plazo del monitoreo.

En el caso de los pozos analizados las variables con correlaciones significativas fueron: la temperatura del agua, el hierro y los nitratos. En general fueron las variables más importantes en todas las cuencas de evaluación, sólo para la cuenca San Martín, se tiene fuerte influencia de la turbidez. Sin embargo, hay que considerar que la conductividad eléctrica (CE), sólidos totales suspendidos (TDS) son otras variables que aportan en menor medida al análisis a la calidad fisicoquímica de la cuenca. Otras variables con alta influencia a lo largo de las cuencas son los fosfatos y nitratos.

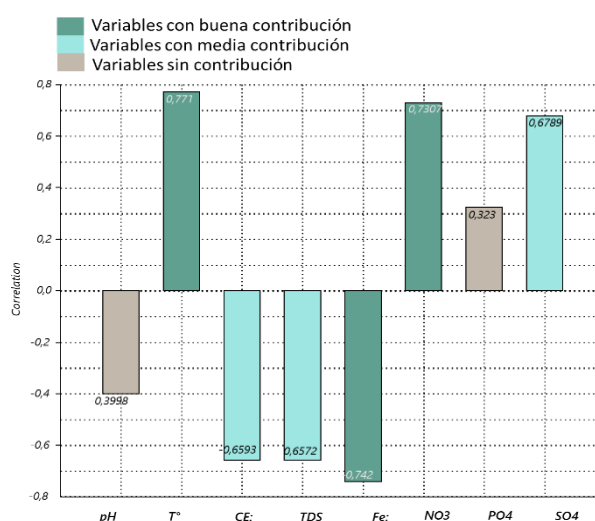
Figura 11. Correlaciones entre factores fisicoquímicos a partir del PCA para pozos en: la cuenca Paragará a) PTMH y b) PTMS, cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS, y subcuenca Zapocó e) PTMH y f) PTMS.

a) PTMH



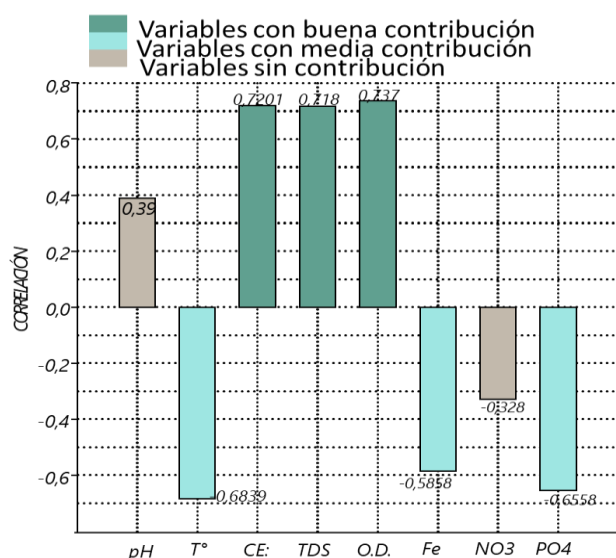
c) PTMH

b) PTMS

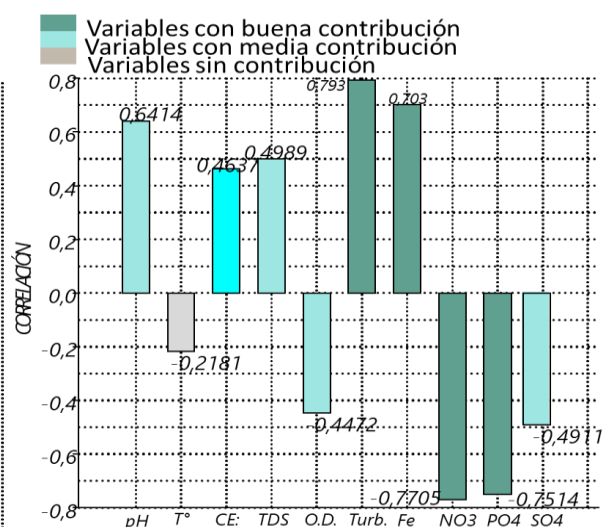
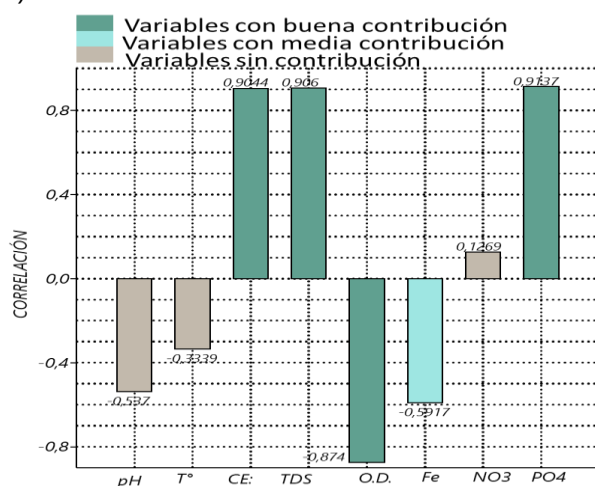


d) PTMS

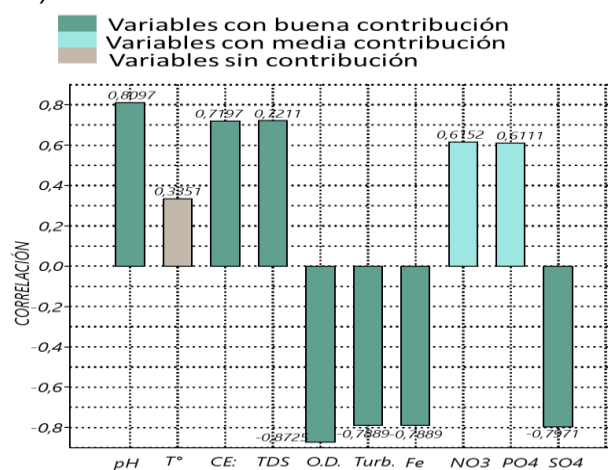
⁸ El análisis PCA se empleó para analizar la correlación multivariada de todas las variables fisicoquímicas, de esta forma caracterizar de forma rápida la calidad del agua.



e) PTMH



f) PTMS



Fuente: Elaboración propia.

La distribución de pozos en función de las variables ambientales del análisis PCA permitió distinguir grupos de pozos que se asemejan respecto a su calidad de aguas⁹. El análisis exploratorio permitió visualizar la variabilidad de la fisicoquímica en función de los pozos evaluados, mientras más cerca estén los pozos (códigos con letras negras), su calidad de aguas es similar; así también si los pozos tienen un valor alto respecto a alguna variable están cerca de la variable (letras verdes).

- En la cuenca Paraguará Figura 12 (a y b) en el PTMH, muestra que las zonas de bajo Paraguará Florida (FI), Picaflor (PI PN) y Piso Firme (PF) en general, están influenciadas negativamente por sulfatos (SO4), fosfatos (PO4), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (TDS) y hierro (Fe); estas zonas corresponden a las áreas con menor impacto antrópico. En cambio, las

⁹ Las flechas verdes representan la magnitud de la variable ambiental, mientras más larga sea mayores concentraciones tiene, la dispersión de los sitios alrededor (códigos azules), representan sitios que tienen altas concentraciones de esa variable.

comunidades de la parte alta y media de la cuenca, además de la zona del Tarvo, Carmencita (CA), Marfil (MR), San Nicolás del Cerrito (SNC), Recreo (RE) y San Juancito (SJ), muestran altos valores de conductividad. En el PTMS, se corrobora los datos de que las zonas menos pobladas como Mercedes de las Minas (MM), Florida, Picaflor y Piso Firme muestran valores bajos de todas las variables medidas.

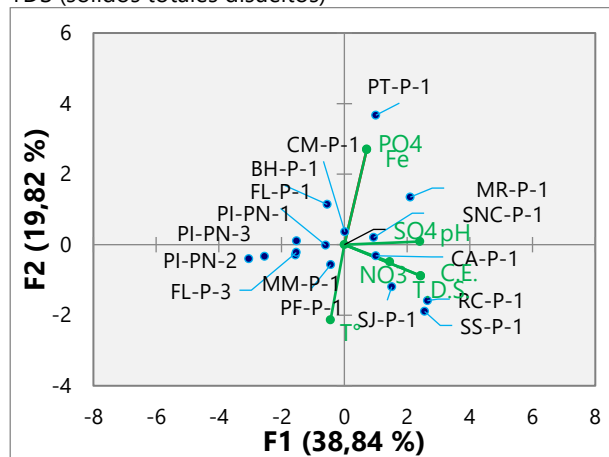
- En la cuenca San Martín Figura 12 (c y d) en el PTMH se registraron las zonas de SC (Santa Clara) y MV (Monte Verde) relacionadas con altos valores de fosfatos (PO₄) y nitratos (NO₃). Las zonas de San Fernando (SF), San Martín (SM) y San Silvestre (SS), tienen los valores más altos de sulfatos (SO₄); ambos patrones atribuibles a zonas agrícolas cercanas.

Los pozos de Palestina (PA) tienen valores altos de pH y hierro (Fe). Para el PTMS, San Silvestre (SS), San Fernando (SF) tienen valores bajos de sulfatos (SO₄), sólidos totales disueltos (T.D.S.). La comunidad de San Martín (SM) tiene valores altos de nitratos (NO₃) y fosfatos (PO₄), coincidiendo nuevamente con una de las áreas agrícolas más fuertes. En el caso de Santa Clara de la Estrella (SC), los pozos SC-P-1 y 2 difieren de su calidad de agua, donde el SC-P-2 tiene altos valores de conductividad (CE) y fosfatos. Posiblemente el agua de ambos pozos provenga de dos fuentes diferentes, de allí las variaciones respecto a la calidad del agua.

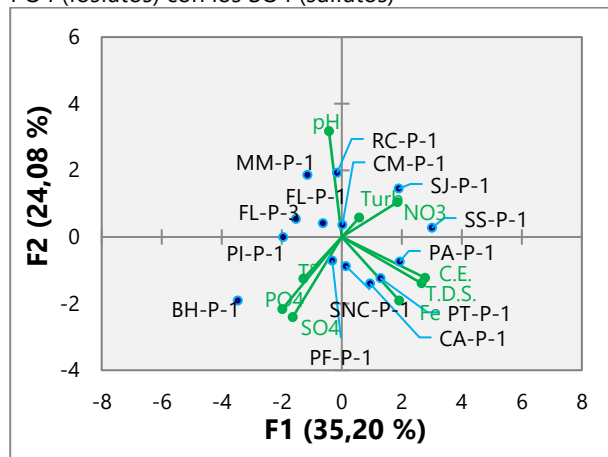
- En la subcuenca Zapocó Figura 12 (d y e) en el PTMH las comunidades de San Juan de la Roca (SJR), Santa Mónica (SM) y San Fermín (SF) están influenciadas por la temperatura (T°), fosfatos (PO₄) y nitratos (NO₃), estas comunidades se encuentran en la parte alta de la cuenca, donde la influencia antrópica es alta. En cambio, la zona de Concepción (CO) se relaciona con el pH y hierro. El PTMS de la comunidad de San Martín (SM) muestra las tendencias de pH, fosfatos (PO₄), conductividad eléctrica (CE.) y sólidos totales disueltos (T.D.S.). El pozo CO-P-3 de Concepción tiene altos valores de turbidez (TURB) y hierro (Fe).

Figura 12. Agrupación de pozos en función de su calidad de aguas en: Cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS, Cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS, y subcuenca Zapocó e) PTMH y f) PTMS, las variables fisicoquímicas vector (verde) y pozos puntos (azul).

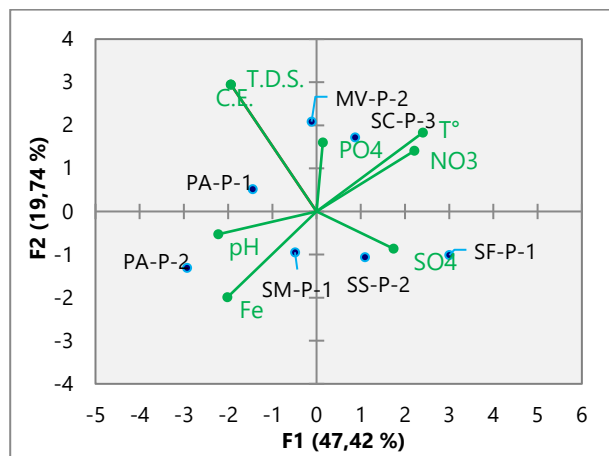
a) PTMH Las variables correlacionadas entre sí, fueron: PO4 (fosfatos) con el Fe (hierro), y NO3 (nitratos) con los TDS (sólidos totales disueltos)



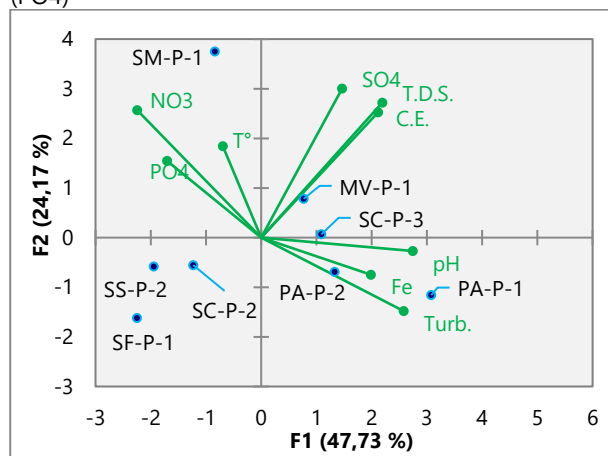
b) Para el PTMS, la TURB (turbidez) se relaciona con los NO3 (nitratos), la CE se relaciona con el Fe (hierro), y los PO4 (fosfatos) con los SO4 (sulfatos)



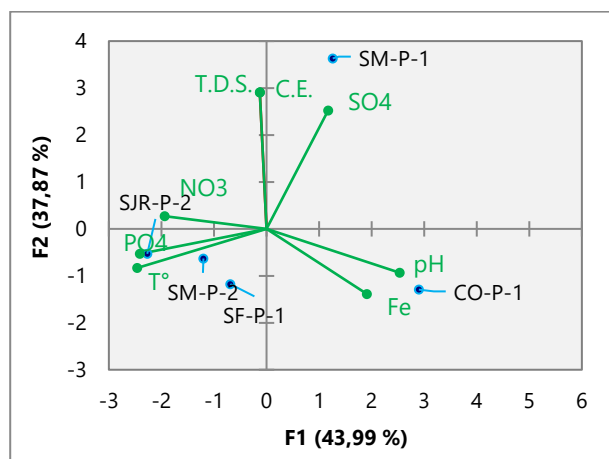
c) PTMH, las variables relacionadas fueron: los NO3 (nitratos) con PO4 (fosfatos) y la T° (temperatura)



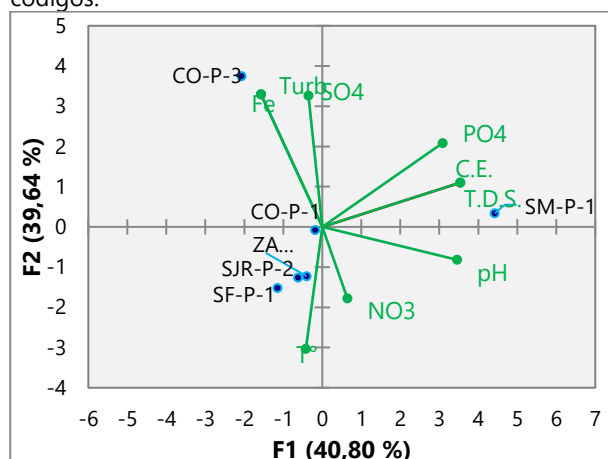
d) Para el PTMS, la TURB (turbidez) se relaciona con el pH y con el Fe (hierro), y los nitratos (NO3) con los Fosfatos (PO4)



e) PTMH las variables que se relacionaron fueron



f) PCA (biplot) Zapocó en la PTMS. Variables fisicoquímicas vector (verde) y pozos puntos (azul) y sus códigos.



Fuente: Elaboración propia.

B Variación temporal

Para el PMOT-SIV (2011), el análisis de los diagramas de Stiff y Piper mostraron que las aguas subterráneas del municipio de San Ignacio de Velasco son bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, mostrando aguas de alta a muy alta calidad.

Los diagramas de caja identifican las variaciones de cada variable analizado los datos mínimos, extremos y de tendencia central de las variables de calidad de aguas evaluadas para el área de estudio. En base a este análisis, se detectó que la mayoría de los datos tenían alta dispersión de datos (cajas alargadas), lo que muestra heterogeneidad en la calidad de aguas en pozos, tal como se sugería la descripción de cantidad de aguas respecto a que los acuíferos no provienen de un mismo bolsón de agua.

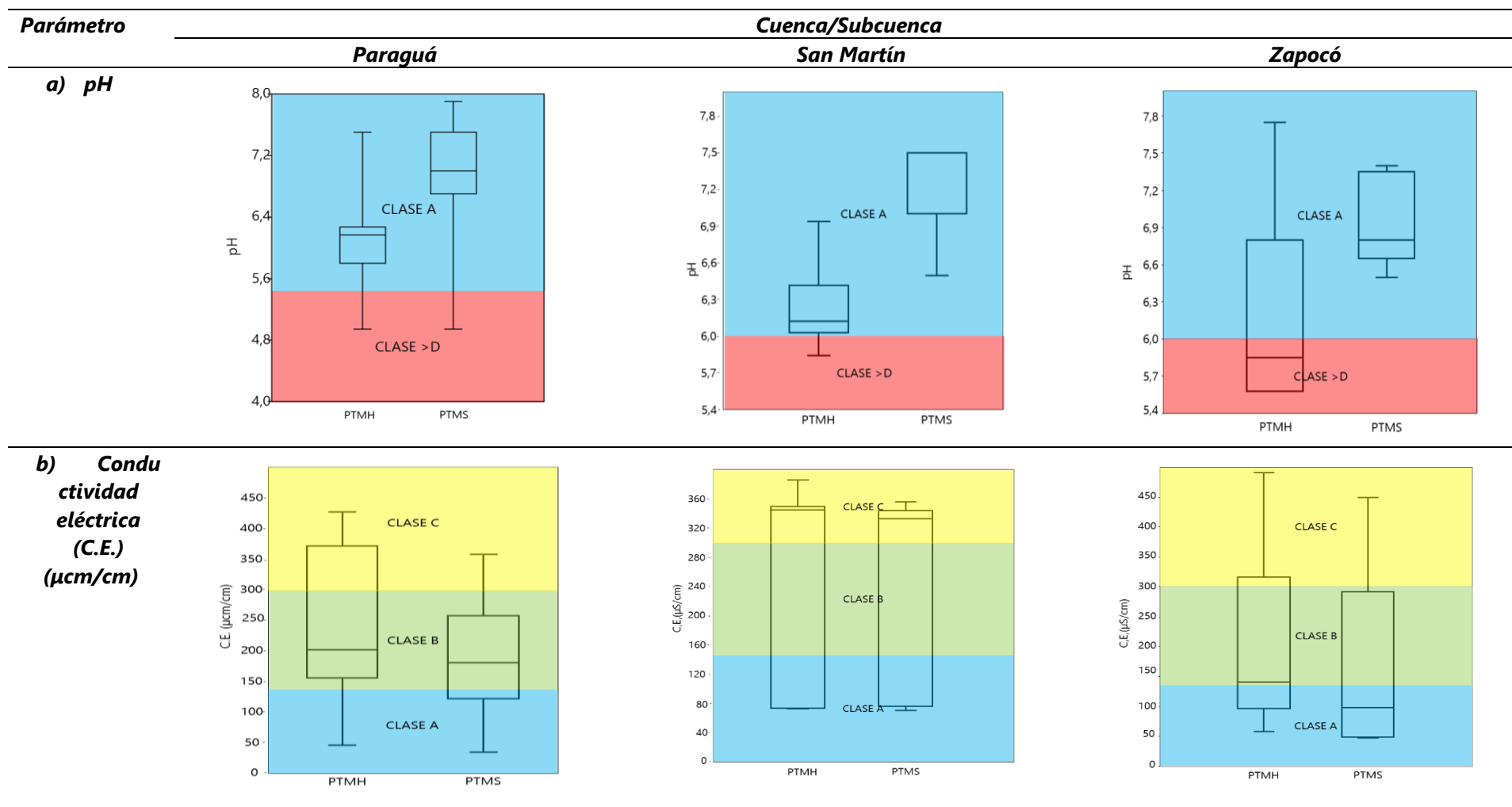
Las distinciones de colores reflejan las clases de calidad de agua según la Ley 1333.

- En la Figura 13 a) se observan las variaciones de pH, este varía entre 5 (ácido) a 8 (básico) en las diferentes cuencas. En promedio la mayor parte de las observaciones están en la categoría "A" con valores por encima de 6 (aguas neutras). Sólo se detectaron algunos valores extremos que alcanzan a pH 5 (aguas ácidas) en las cuencas Paraguá y subcuenca Zapocó, lo cual puede ser natural debido al origen de las aguas, ya que en otras cuencas las aguas subterráneas poco profundas muestran el mismo comportamiento (Gonzales et al., 2019).
- Para la Figura 13 b), la conductividad eléctrica (C.E.) presentó fluctuaciones en sus datos determinando tres categorías de calidad de agua para las tres cuencas estudiadas. La menor proporción de las observaciones se encuentra en la categoría "A" que se encuentra de 0 a 140 ($\mu\text{cm}/\text{cm}$). La mayoría de los sitios evaluados se encuentran en la categoría "B" por debajo de los 300 ($\mu\text{cm}/\text{cm}$). Para las tres cuencas y en ambos periodos de muestreo (PTMH y PTMS) en algunos casos se alcanzan valores extremos a la categoría "C" por encima de los 300 ($\mu\text{cm}/\text{cm}$). Sin embargo, estos datos no alcanzan a valores extremos de contaminación, en comparación con otros pozos contaminados en zonas amazónicas benianas que alcanzan valores de hasta 2000 ($\mu\text{cm}/\text{cm}$) (Ayuda en Acción, 2020).
- En la Figura 13 c) los sólidos totales suspendidos o disueltos (TDS), no mostraron gran influencia debido a su corto rango de distribución de datos, por lo tanto, en todas las áreas de todas se encuentran en la categoría "A". Si bien se encontró una variación por época en los datos nunca superaron los 1000 (mg/l), lo cual sugiere que las comunidades por el momento no necesitan de filtros de potabilización y sedimentación de las aguas.
- El porcentaje de oxígeno disuelto Figura 13 d) sugiere que en la cuenca Paraguá están en las categorías "C" y "D". La cuenca San Martín muestra un comportamiento similar. Los valores correspondientes al PTMH en su mayoría están dentro de la categoría crítica ">D". Y Los pozos de la subcuenca Zapocó, en general están dentro de las categorías "C" y ">D". Este fenómeno no debería considerarse como un

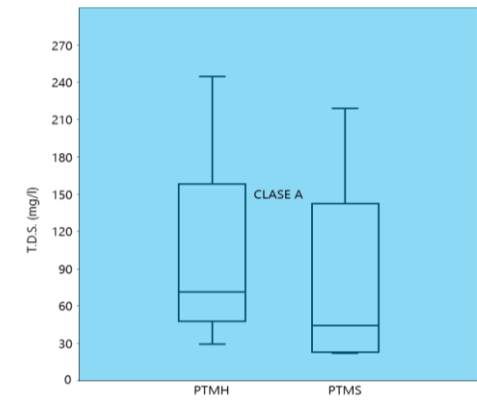
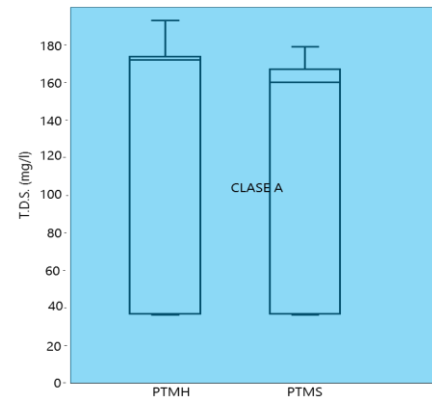
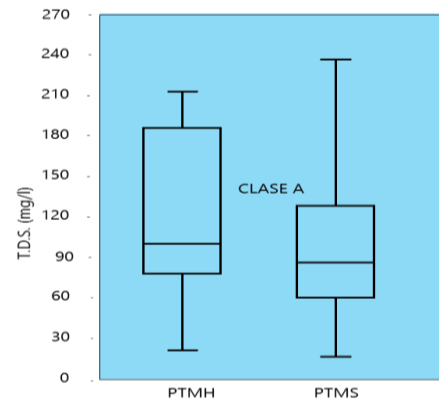
proceso de contaminación, sino es un fenómeno natural, ya que por la ubicación de las aguas el intercambio gaseoso con el exterior es mínimo por tanto tienen baja oxigenación. En los puntos de monitoreo un incremento por encima del 70% indica aguas con contaminación orgánica ya que fueron los puntos de evaluación en tanques o piletas.

- En el caso de la turbidez Figura 13 e) muestra poca variabilidad, la mayor parte de los puntos evaluados están en la categoría "A" y sólo en la cuenca San Martín se obtuvieron valores extremos superior a 10 (NTU), llegando a la categoría "B". Cabe mencionar que en este grupo de datos solo corresponde al PTMS.

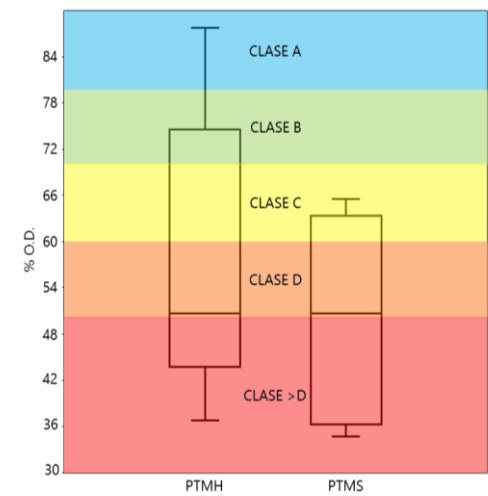
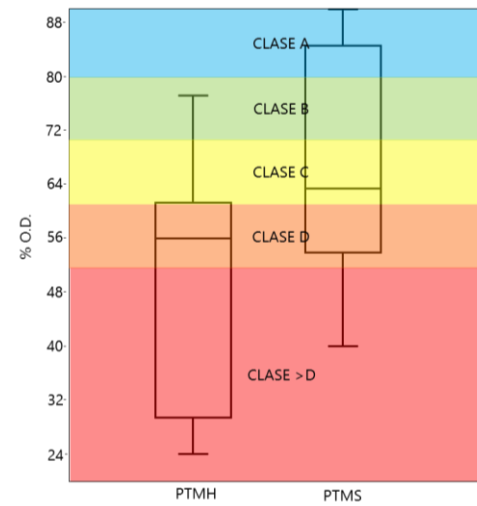
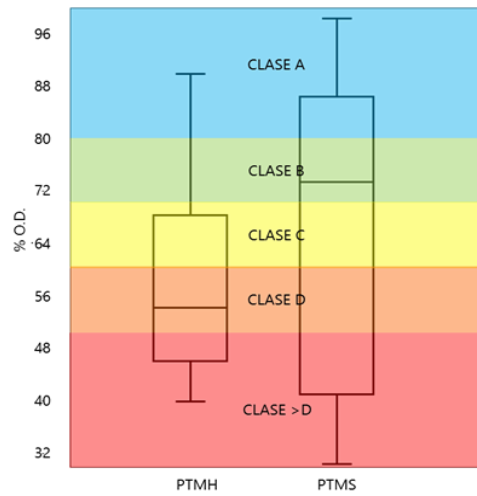
Figura 13. Variables básicas pH, conductividad, TDS, oxígeno disuelto y turbidez en las cuencas estudiadas.



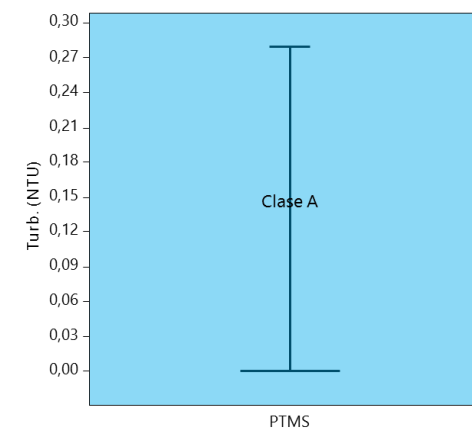
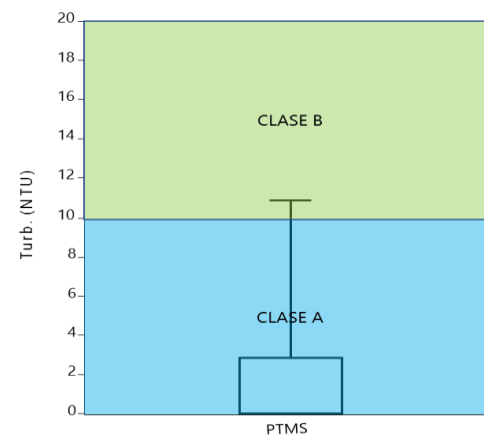
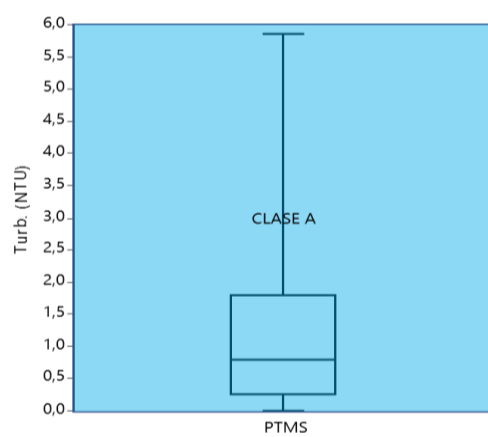
c) Sólidos Totales disueltos (T.D.S.) (mg/l)



d) Oxígeno Disuelto (% O.D.)



**e) Turbidez
(TURB)
(NTU)**

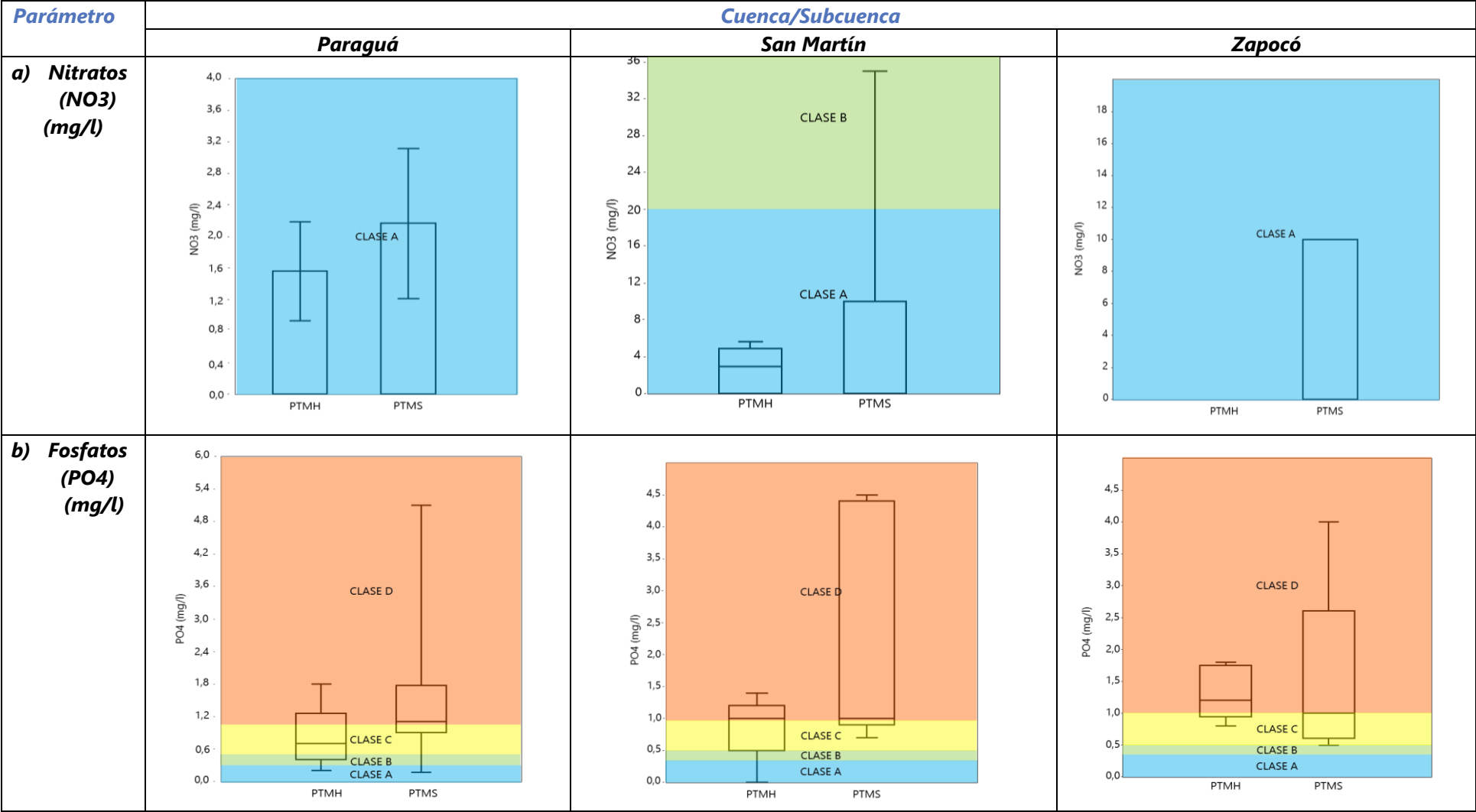


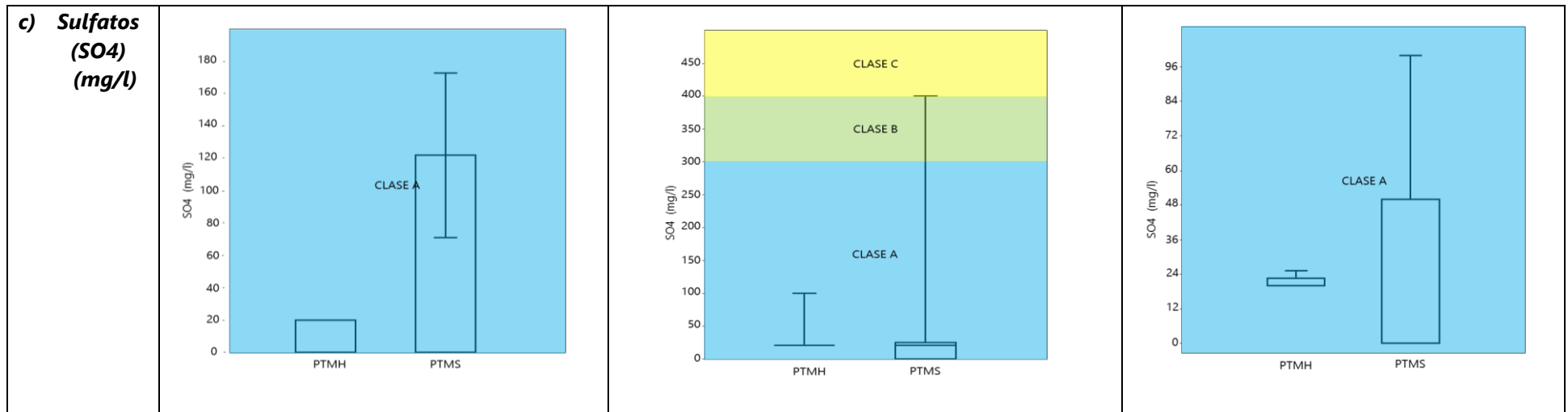
Fuente: Elaboración propia.

Los elementos no metálicos (Figura 14) se encuentran naturalmente en las aguas superficiales, pero no así en aguas subterráneas, pero los seres humanos también pueden introducir grandes cantidades de estos nutrientes en el agua a través de actividades como la agricultura como fertilizantes, la cría de animales y la descarga de aguas residuales.

- Los nitratos Figura 14 a) no variaron respecto a su clasificación en las tres cuencas y en general están en la categoría "A" debido a que no se superaron los 10 (mg/l). Solo en la cuenca San Martín (comunidad del mismo nombre) se encuentra un valor extremo que supera este rango, clasificándose en categoría "B". La presencia de este valor podría estar relacionado con el ingreso de fertilizantes nitrogenados, ya que la zona es agrícola y el nivel de las aguas es muy superficial, pero esto podría ser indicio de impacto antrópico. En este caso (Bolaños-Alfaro et al., 2017), mencionan que debido a la baja solubilidad y dispersión de este compuesto es débil, y el encontrar un valor extremo sugiere un uso persistente de fertilizantes en las zonas agrícolas.
- La concentración de fosfatos Figura 14 b), en el agua fueron clasificados desde la clase "A" hasta clase "D", pocas observaciones se encuentran en la categoría "A" o "B" por debajo de 0,5 (mg/l). La presencia de este elemento podría estar asociado a zonas con fertilizantes fosfatados que se infiltran, ya que en todas las cuencas la presencia agrícola es elevada, la presencia de este elemento también fue detectada en los pozos de Zapocó, esto podría estar relacionado a que los niveles de agua en esta zona están cerca de la superficie, lo cual los hace más susceptibles a la infiltración y percolación de este compuesto.
- Los sulfatos Figura 14 c), no mostraron variabilidad respecto a la clasificación de calidad de aguas, por lo que las tres cuencas se encuentran en promedio en la categoría "A" posiblemente debido a la baja cantidad de rocas ígneas en la zona de estudio. Sólo para la cuenca San Martín encontramos valores extremos que superan este rango y entraron en las categorías "B".

Figura 14. Variables no metálicas: nitratos, fosfatos, sulfatos en las cuencas Paraguá, San Martín y subcuenca Zapocó.





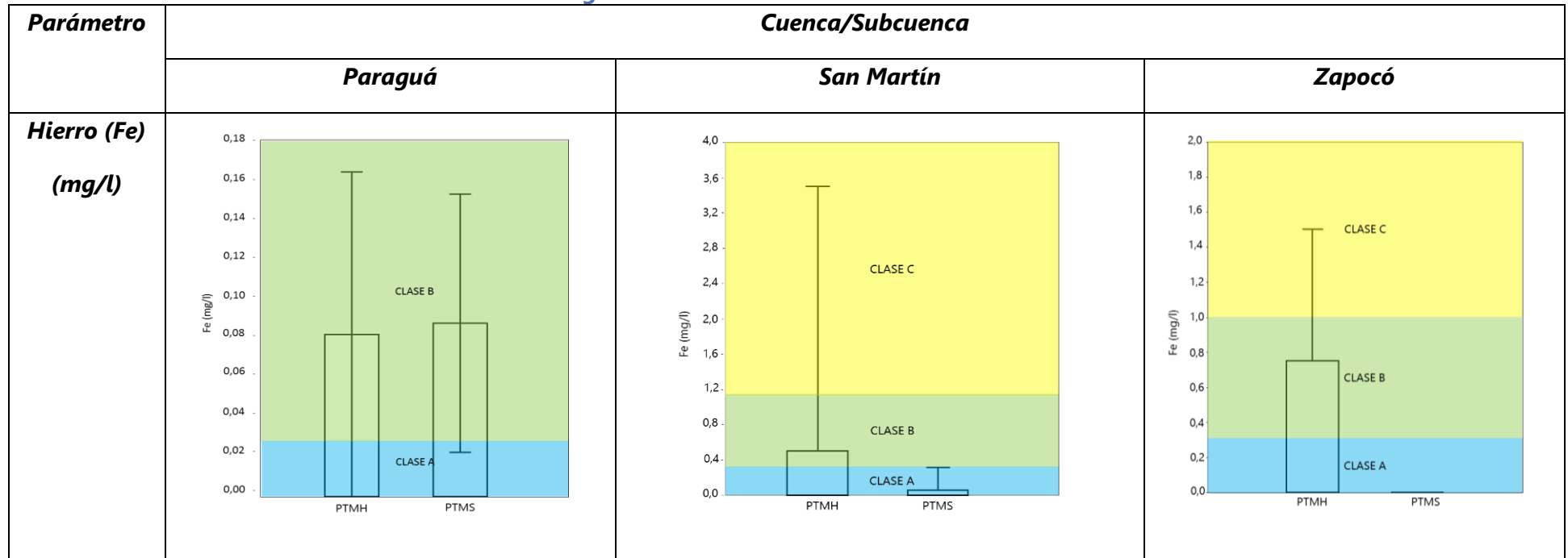
Fuente: Elaboración propia.

- Los metales en aguas subterráneas en general son bajos, el hierro procede del subsuelo procedente de la disolución de rocas ferrosas. Esta variable (Figura 15), tuvo alta variabilidad en las tres cuencas, que concentraron sus valores en las categorías "B" y "C" en especial para Paraguá. En la cuenca San Martín y subcuenca Zapocó superan 1 (mg/l) y entran en la categoría "C".
- Los factores biológicos como la presencia de coliformes fecales en el agua indica la presencia de bacterias que se encuentran en el intestino de los seres humanos y otros animales de sangre caliente, por lo cual es un riesgo para la población. En Figura 16 se observa que la cuenca Paraguá y San Martín tienen un comportamiento similar y están en la categoría "B" y con valores extremos en la categoría "C". En cambio, la subcuenca Zapocó concentró sus datos en clase B menores a 200 (NMP). La alta cantidad de bacterias en los tanques también podría estar relacionado con el fósforo, ya que este elemento ayuda en el crecimiento de algas en los tanques y a la vez en esta media también se desarrollan las bacterias fecales.

La distribución espacial de los fosfatos a lo largo de ambas cuencas muestra que en la mayor parte de los pozos evaluados se sobrepasa el límite de la clase "C", lo cual podría estar relacionado a las prácticas agrícolas de las cuencas y posiblemente se tenga un proceso de infiltración hacia la columna de agua de fertilizantes fosforados (Figura 17 a).

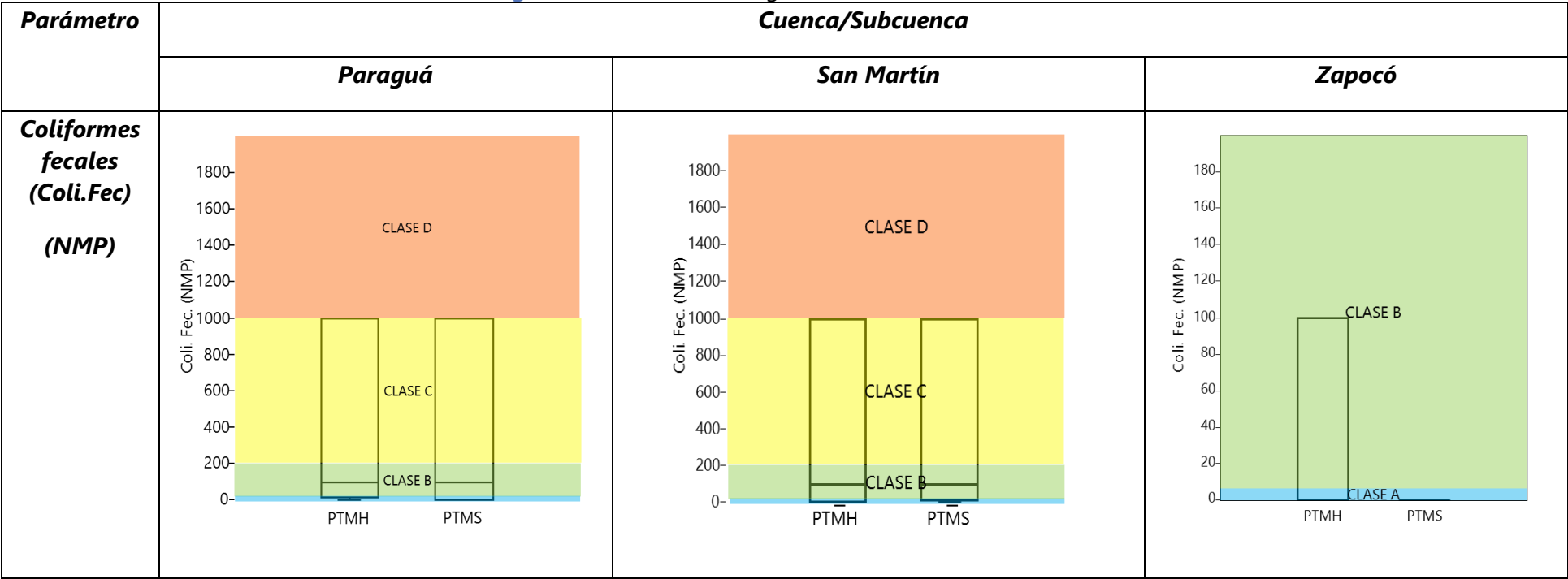
En el caso de los nitratos, todos los pozos están en la clase "A", sin embargo, los valores más altos detectados para esta variable están en cuenca media, donde la actividad agrícola es intensiva (Figura 17 b).

Figura 15. Variables metálicas: Hierro.



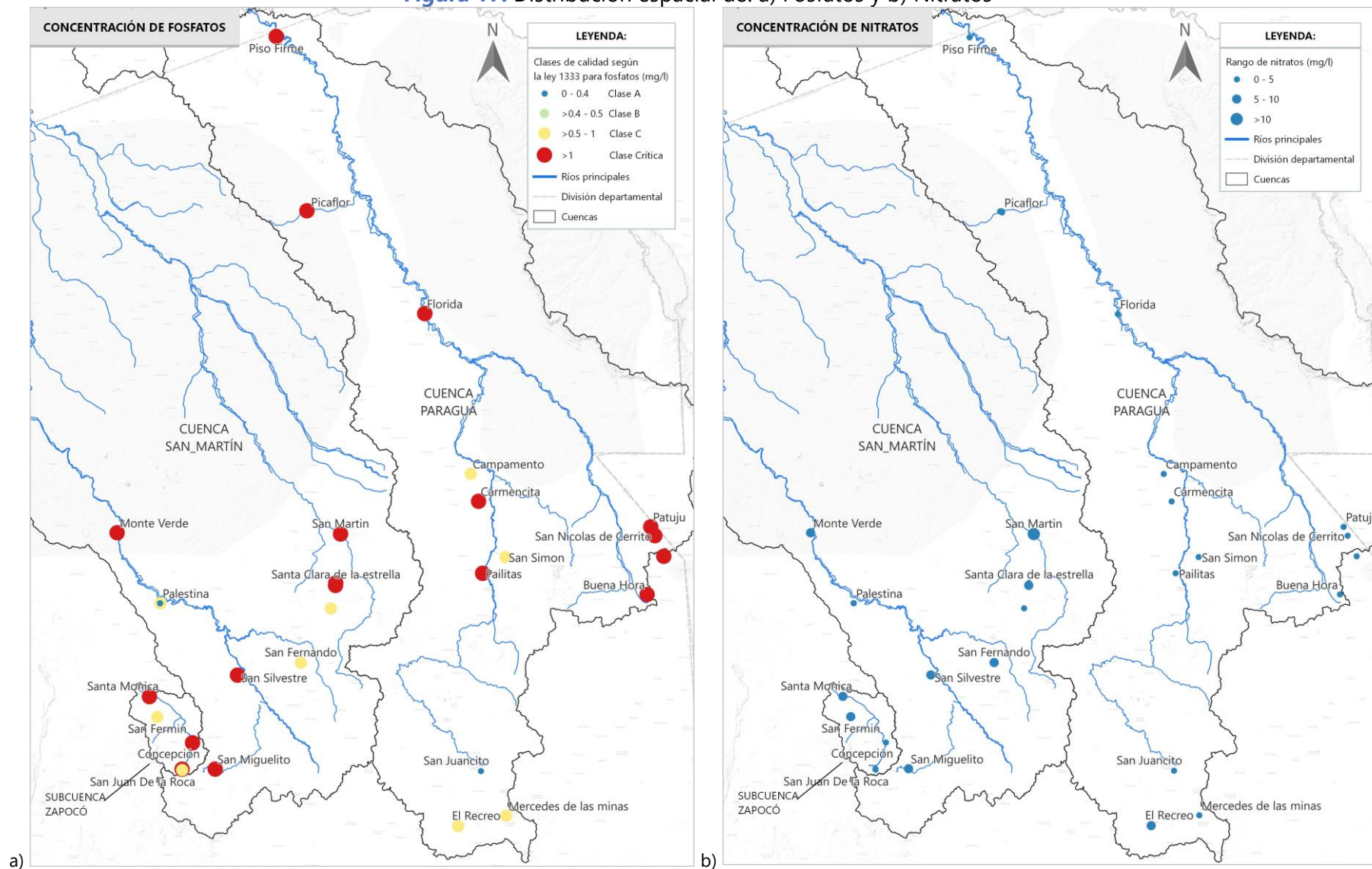
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Variables biológicas: Coliformes fecales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Distribución espacial de: a) Fosfatos y b) Nitratos



Fuente: Elaboración propia.

5.2 AGUAS SUPERFICIALES

5.2.1 CANTIDAD DE AGUAS

A Ríos

i *Descripción General*

Para entender el funcionamiento de la red hídrica en las cuencas de estudio es necesario conocer las características básicas de los ríos monitoreados, estas características pueden resumirse en:

- o **Características geomorfológicas**

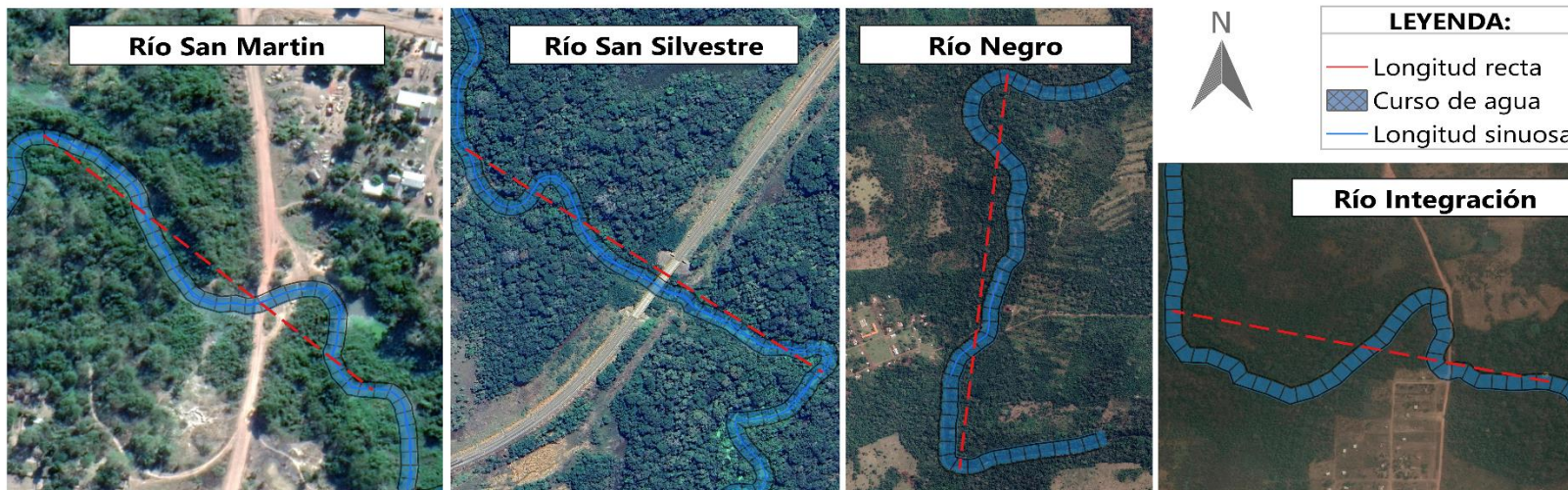
La forma de los ríos está fuertemente ligada a la forma de los valles que cambian en base a su posición respecto a la cuenca. En general los ríos en las zonas más altas de la cuenca tienden a ser más rectos con valles cerrados, a medida que descienden a la parte media y baja de la cuenca se hacen más sinuosos y con valles amplios, que son susceptibles al desborde de ríos. En este sentido, los ríos monitoreados han sido clasificados visualmente según su forma, utilizando la clasificación de (Rust, 1977).

Cabe aclarar que se clasificaron los ríos en tramos; se considera un tramo de análisis donde los patrones de curvatura del río se repiten. En caso de no observarse ningún patrón de curvatura, se define al tramo como 10 veces el ancho del río, el punto de monitoreo se ubicó dentro del tramo analizado, como se muestra en la Figura 18.

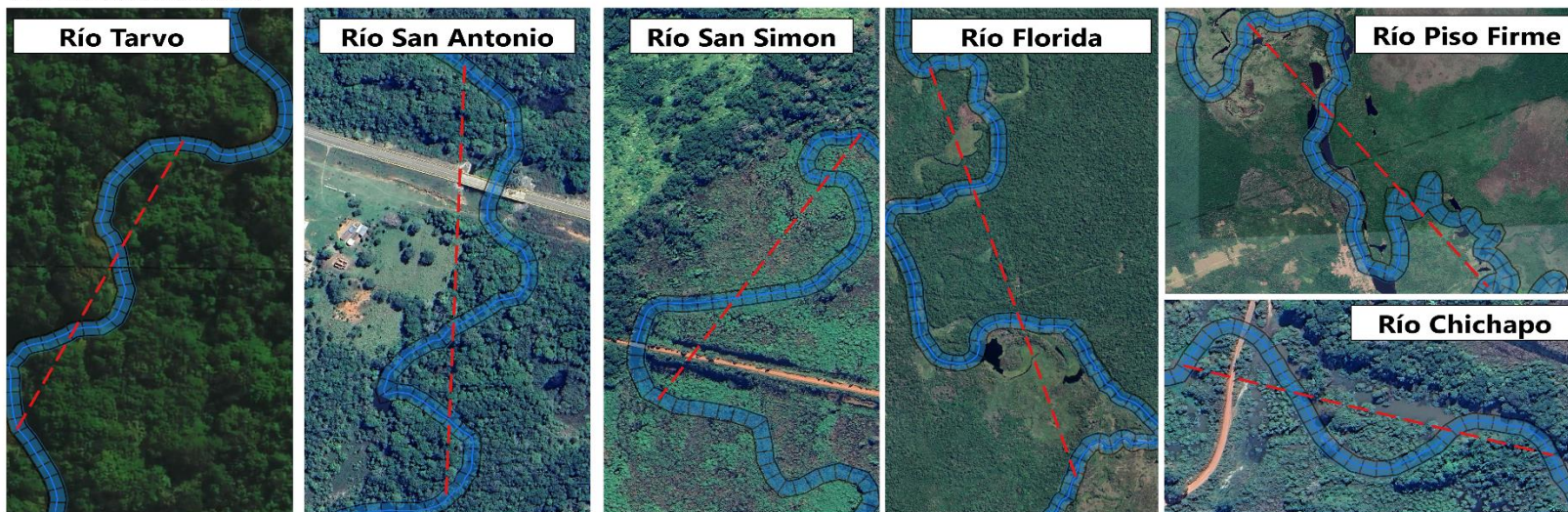
La clasificación de forma de los ríos monitoreados se detalla en la Tabla 10 en general se observa que los ríos cercanos a la divisoria de cuencas son tramos rectos o con poca sinuosidad, a medida que fluyen a la parte media y baja de las cuencas los ríos pasan a ser meandriformes.

Figura 18. Sinuosidad en los ríos evaluados.

CUENCA SAN MARTÍN



CUENCA PARAGUÁ



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Clasificación de forma de los ríos monitoreados.

Ríos	Sinuosidad	Cauces	Clase asignada	Tipo margen
San Antonio	1.38	Único	Recto	Encajonado
San Simón	1.61	Único	Recto	Encajonado
Santa Rosa	1.31	Único	Recto	Encajonado
Tarvo	1.51	Único	Meandriforme	Encajonado
Florida	1.87	Único	Meandriforme	Encajonado
Piso Firme	2.05	Único	Meandriforme	Encajonado
San Martín	1.54	Único	Meandriforme	Encajonado
Integración	1.50	Único	Meandriforme	Encajonado
San Silvestre	1.24	Único	Recto	Encajonado
Negro	1.15	Único	Recto	Encajonado

Fuente: Elaboración propia.

Esta clasificación y las características de los márgenes ribereños son útiles en la red de monitoreo para seleccionar o ratificar los puntos de monitoreo. A futuro, si se desea incorporar otros puntos de monitoreo en los ríos es preferible ubicar los puntos de monitoreo según los siguientes criterios:

- Ríos rectos y con márgenes encajonados en buenos lugares para los puntos de monitoreo de niveles y aforo de caudales.
- Ríos meandriformes con márgenes encajonados, se debe ubicar el punto de monitoreo en tramos rectos evitando las curvas de los cauces sinuosos, para monitoreo de niveles y caudales.
- Ríos con márgenes abiertos e inundables, se recomienda sólo realizar mediciones de nivel del agua, no así aforo de caudales.

Se observa que todos los tramos elegidos de los ríos son aptos para el monitoreo de niveles, respecto al aforo de caudales los ríos de Florida y Piso Firme requieren estructuras y equipos especiales para medir los caudales debido a su tamaño, como estaciones de aforo.

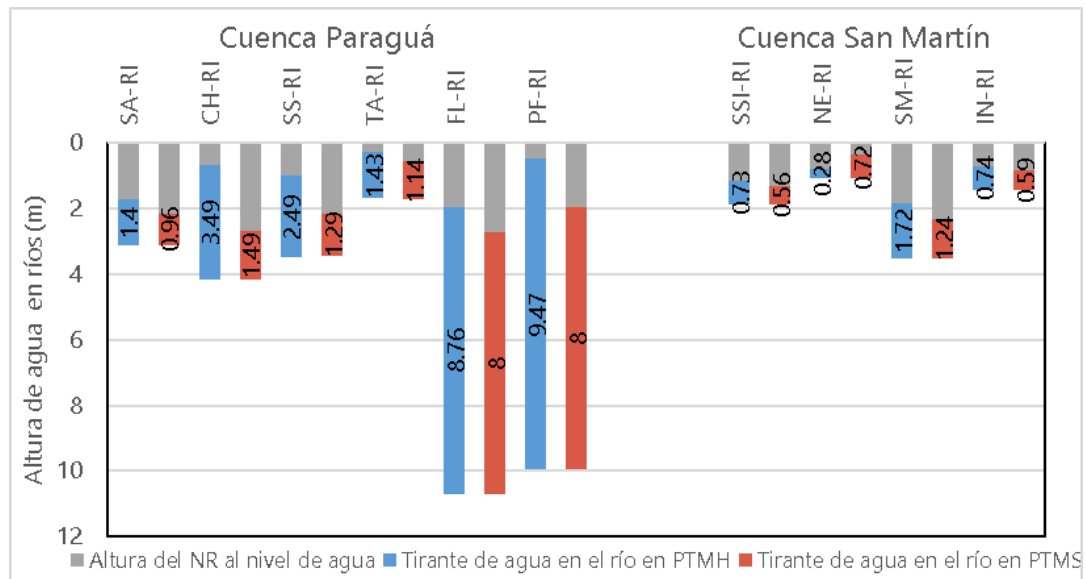
○ **Niveles del agua superficial.**

Se midieron los niveles de agua respecto a un punto de referencia fijo y tirantes que es la altura de agua desde el lecho del río en las zonas más profundas hasta el nivel de agua, para ambos periodos de monitoreos (PTMH y PTMS). En la Figura 19 las barras completas representan la sección de un río, la ordenada 0 es el nivel de referencia, el color azul representa el tirante de agua y el color gris es la distancia entre el nivel de agua al punto de referencia.

Los puntos de monitoreo en ríos que están entre los 332 y 200 m.s.n.m: SA (San Antonio), Chichapó (CH), SS (San Simón) y Tarvo (TA) (Cuenca Paraguá); Integración (IN), Negro (NG) y San Martín (SM) (cuenca San Martín) tienen niveles de agua menores a los 4 m.

En cambio, los ríos meandriiformes de cuenca baja: Piso Firme (PF) y Florida (FL), alcanzan valores mayores a los 9 m. Figura 19.

Figura 19. Nivel de agua en los ríos monitoreados para PMTH y PMTS.



Fuente: Elaboración propia

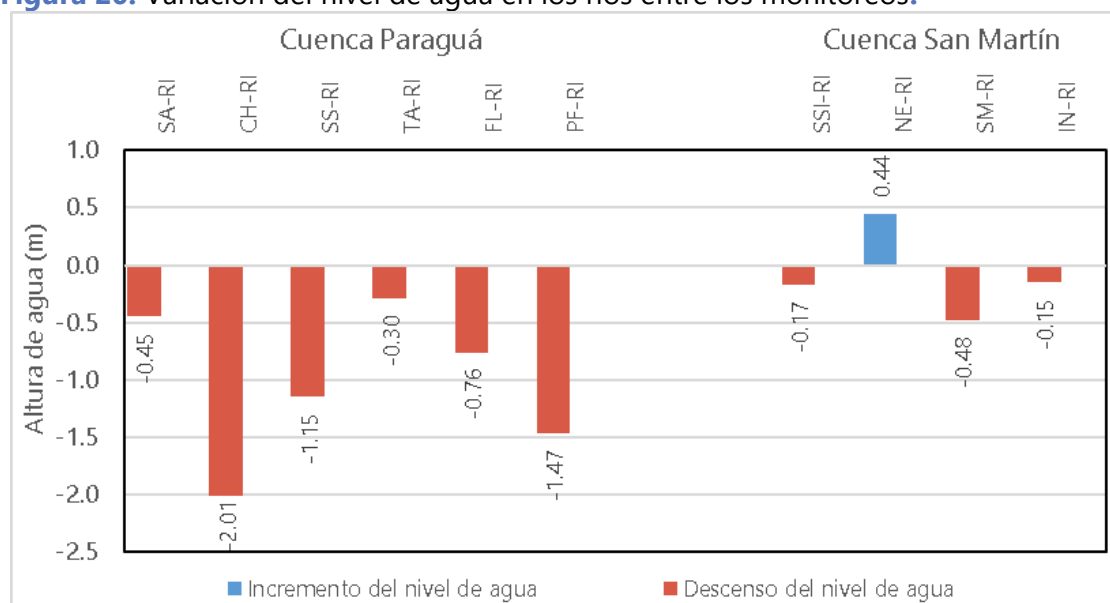
Los resultados del monitoreo hidrométrico pueden ser analizados en términos de variación temporal y espacial del nivel de agua en los ríos.

ii Variación temporal

La diferencia de los niveles de agua medidos permite conocer la variación del nivel de agua entre las fechas de monitoreo. En la Figura 20, se muestra la variación de los niveles de agua en los ríos de las cuencas de estudio.

En general se espera que los niveles de agua en los ríos descendan entre los periodos de monitoreo, debido a que el PTMH es más húmedo que el PTMS.

Figura 20. Variación del nivel de agua en los ríos entre los monitoreos.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores negativos indican un descenso del nivel de agua (el tirante del río disminuye), los valores positivos indican ascenso en el nivel de agua (el tirante del río aumenta). Se observa que:

- En la cuenca Paraguá, todos los ríos monitoreados presentan, un descenso de niveles de agua del PTMH al PTMS. Este descenso es consistente con el comportamiento esperado.
- En la cuenca San Martín, los ríos monitoreados, también tuvieron un descenso de nivel de agua consistente a la variación temporal de los monitoreos. Sin embargo, el río Negro tuvo un ascenso en el nivel de agua, este comportamiento es atípico y puede deberse a condiciones particulares en la zona como lluvias retrasadas, aportes de flujo base, entre otras, por lo que se requiere de más monitoreos para realizar un análisis más exhaustivo de este evento.

iii Variación espacial

La variación espacial de los niveles de agua en los ríos monitoreados de las cuencas de estudio está plasmada en la Figura 21.

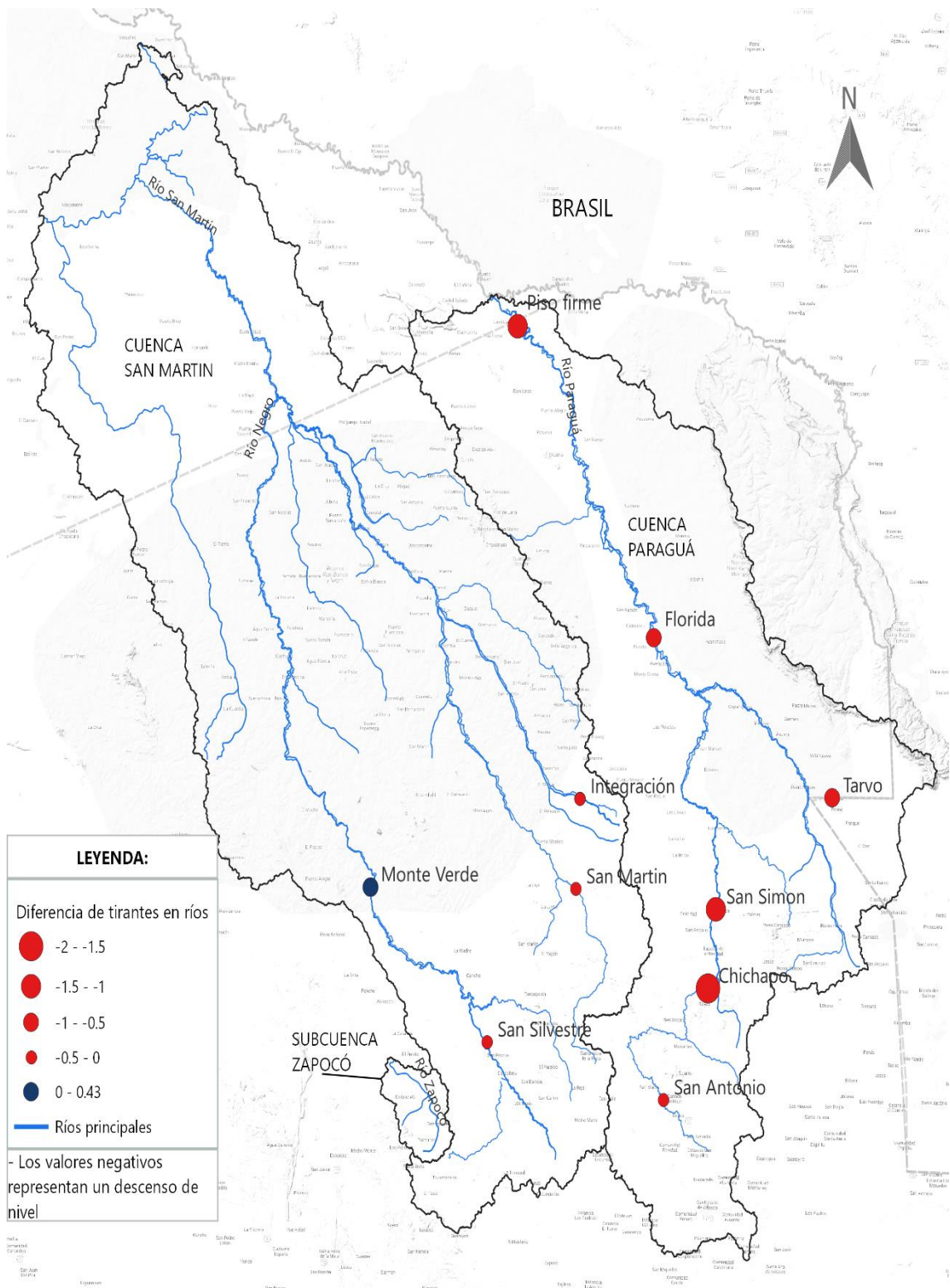
El análisis de la variación espacial de niveles plantea las siguientes hipótesis que podrán ser verificadas cuando la red de monitoreo tenga mayor cantidad de mediciones.

- Los ríos más cercanos a las divisorias de las cuencas presentaron una reducción de nivel relativamente baja (<0.6 m), lo cual sugiere que estos ríos son alimentados en parte por las aguas subterráneas.
- Los cursos de agua que se encuentran cerca de la parte más alta o divisoria de las cuencas son afluentes o tributarios de los ríos principales (Piso Firme, Florida, San Simón y Chichapó). Cuando estos afluentes o tributarios reducen su nivel,

significa que están transportando menos agua hacia los ríos principales. Por lo tanto, a medida que un río principal recibe menos agua de sus tributarios, su nivel desciende de manera pronunciada.

- En el caso de Florida, el descenso de nivel no ha sido mayor por la presencia del humedal cercano aguas arriba, que actúa como una laguna de regulación. Por lo que el descenso tiene menor magnitud.

Figura 21. Variación espacial de los niveles de agua entre el PTMH y el PTMS.



Fuente: Elaboración propia.

○ Caudales en los ríos

El aforo de caudales por el método del molinete se realizó sólo para el PTMS. No se realizaron aforos en los puntos de monitoreo del bajo Paraguá (Florida y Piso Firme), debido a las limitaciones del tamaño y magnitud de los ríos, los cuales necesitan infraestructura especializada para la medición de estas variables (estación de aforo).

En la Figura 22 se muestran los caudales aforados en los puntos de monitoreo, se puede notar que los caudales de los ríos aumentan a medida que el agua fluye desde la parte alta de la cuenca hacia la parte baja. Esta tendencia se debe al hecho de que los ríos principales recogen las aguas de sus afluentes que se encuentran en la zona superior de la cuenca, lo cual incrementa su caudal.

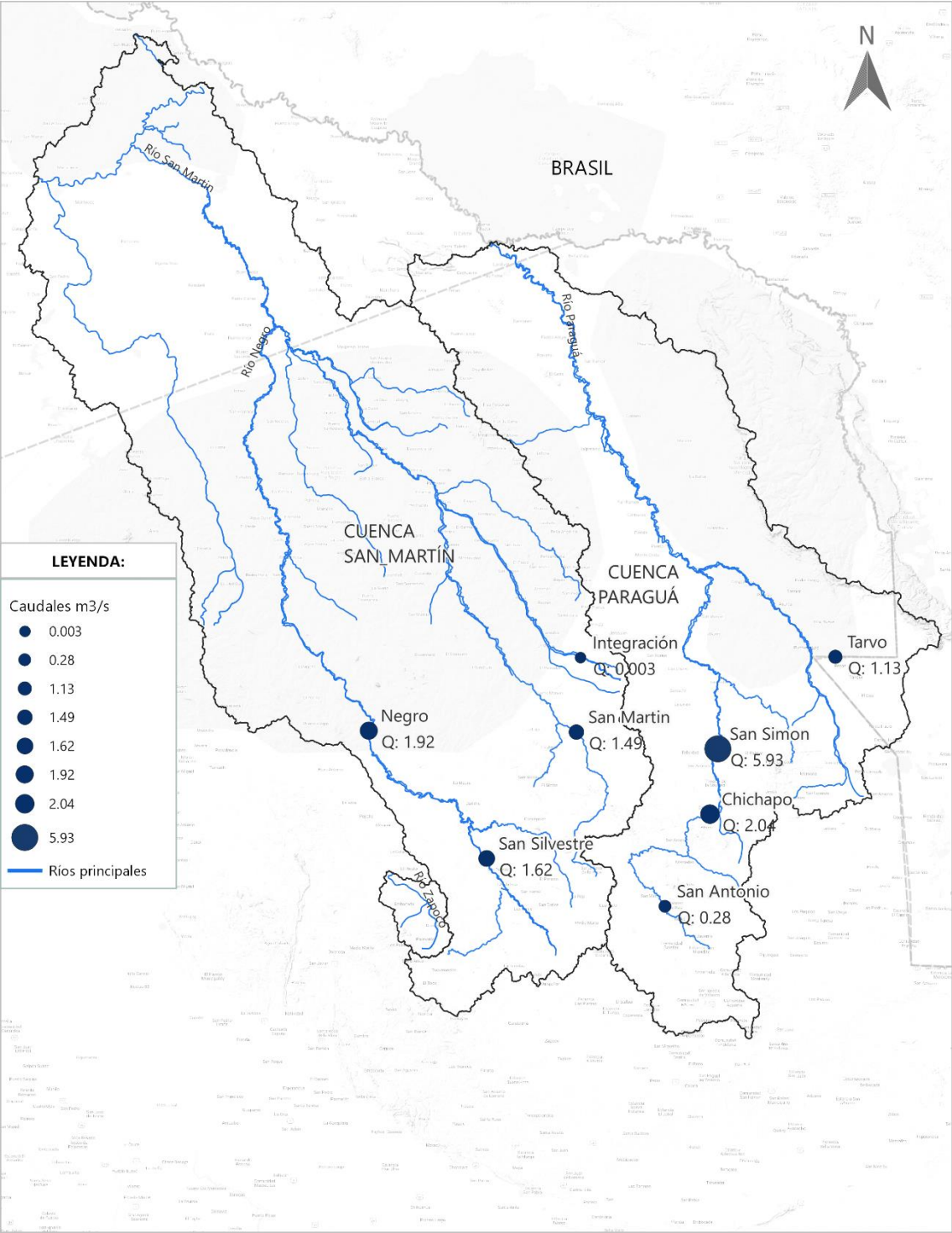
Generalizando las observaciones de los niveles de agua y los caudales, se pueden resumir en:

- La reducción casi general del nivel de agua en los ríos de las cuencas es consistente con lo esperado entre los periodos de medición.
- El comportamiento de los caudales en los ríos es el esperado (zonas altas de la cuenca tienen menores caudales y zonas más bajas tienen mayores caudales).

El monitoreo continuo de niveles y caudales en los ríos, permitirá realizar análisis profundos del funcionamiento hídrico en las cuencas como: relación de los niveles de agua y caudales con las precipitaciones, sus tendencias en el tiempo, determinación de flujos base, cantidad de agua superficial que se produce en las cuencas, establecer límites mínimos para alertas tempranas en caso de sequía, establecer límites máximos en caso de inundaciones, curvas de gasto que relacionan los niveles de agua con los caudales, relaciones entre la cantidad de agua y su calidad, entre otros.

Esto demuestra la gran variedad de aplicaciones que tiene la información de la red de monitoreo y su importancia en la gestión y manejo de recursos hídricos.

Figura 22. Caudales de los ríos monitoreados en las cuencas de estudio, para el PTMS.



Fuente: Elaboración propia.

B Presas

En el monitoreo de aguas en las presas es importante el conocimiento de las características hidrológicas y constructivas de las mismas. Durante los periodos de evaluación, se estableció que las presas son de tierra y de baja altura, debido al relieve natural de terreno, y su principal función es proporcionar agua potable a las poblaciones cercanas.

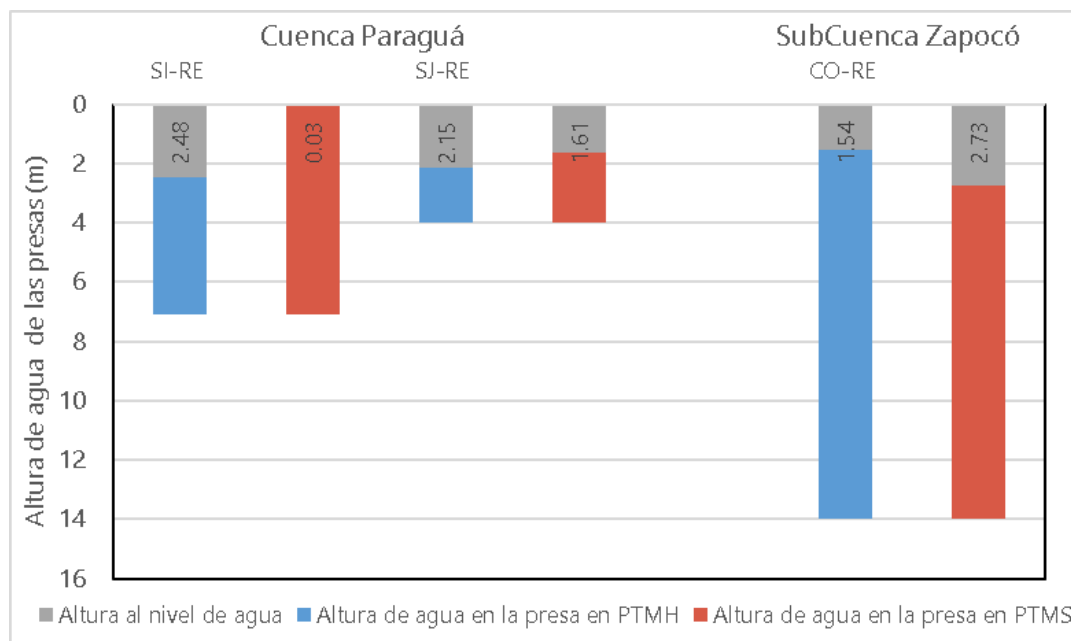
Los resultados del monitoreo de cantidad de agua pueden ser analizados en términos de variación temporal y espacial del nivel de agua, para las cuencas de estudio; En el caso de la presa Guapomó, fue posible estimar el volumen de agua almacenado en la presa para los monitoreos, porque es la única que tiene información de batimetría.

i Variación temporal base

Se midieron los niveles de agua en las presas, respecto a un punto de referencia fijo para ambos periodos (PTMH y PTMS). En la Figura 23 se grafica la sección de una presa donde: La ordenada 0 representa el nivel de referencia, el color gris es la distancia entre el punto de referencia y el nivel de agua en la presa y el color azul es la estimación de la altura de agua en la presa desde la zona más profunda; esta última es una aproximación debido a que no ha sido medida, fue estimada a partir de información secundaria.

Se destaca, que las represas de San Ignacio SI (Guapomó) y SJ (San Juancito), en la transición del PTMH a PTMS tienen un incremento en los niveles de agua, en cambio Zapocó (CO), un descenso.

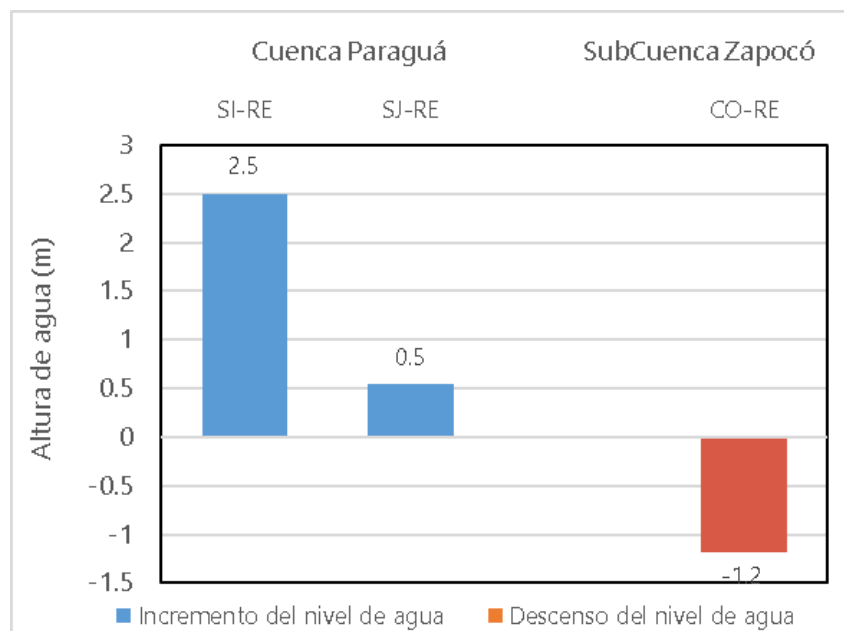
Figura 23. Nivel de agua en la presa para los monitoreos a) PMTH y b) PTMS.



Fuente: Elaboración propia.

La diferencia de los niveles de agua medidos permite conocer la variación del nivel de agua entre las fechas de monitoreo. En la Figura 24 se muestra la variación de los niveles de agua en las presas de las cuencas de estudio.

Figura 24. Variación del nivel de agua en las presas entre monitoreos.



Fuente: Elaboración propia.

Los valores negativos indican descenso del nivel de agua (en rojo), los valores positivos indican que existió un ascenso en el nivel de agua (en azul). Se observa que:

- Las presas de la cuenca Paraguá (Guapomó y San Juancito) incrementaron sus niveles de agua del PTMH al PTMS. Este incremento del nivel es un comportamiento inusual, porque se esperaba un descenso de niveles. Se atribuye este fenómeno al efecto combinado de dos factores:
 - Las lluvias retrasadas del año 2023 influyeron en el nivel del agua, por lo que las presas fueron recargadas poco antes del PTMS.
 - En el caso de la presa Guapomó, los atajados o pequeñas represas en los afluentes tributarios fueron abiertas y permitieron el paso de agua hacia la represa antes del PTMS, lo que resultó en un incremento en el nivel de agua de la presa.
- La presa Zapocó muestra descenso del nivel de agua, lo cual es consistente con las épocas de monitoreo, debido a que el PTMS se considera más seco que el PTMH.

El monitoreo continuo de los niveles de agua en las presas permite conocer su comportamiento natural, estimar volúmenes de almacenamiento de agua y planificar su uso sostenible en el desarrollo de las poblaciones beneficiadas por las presas.

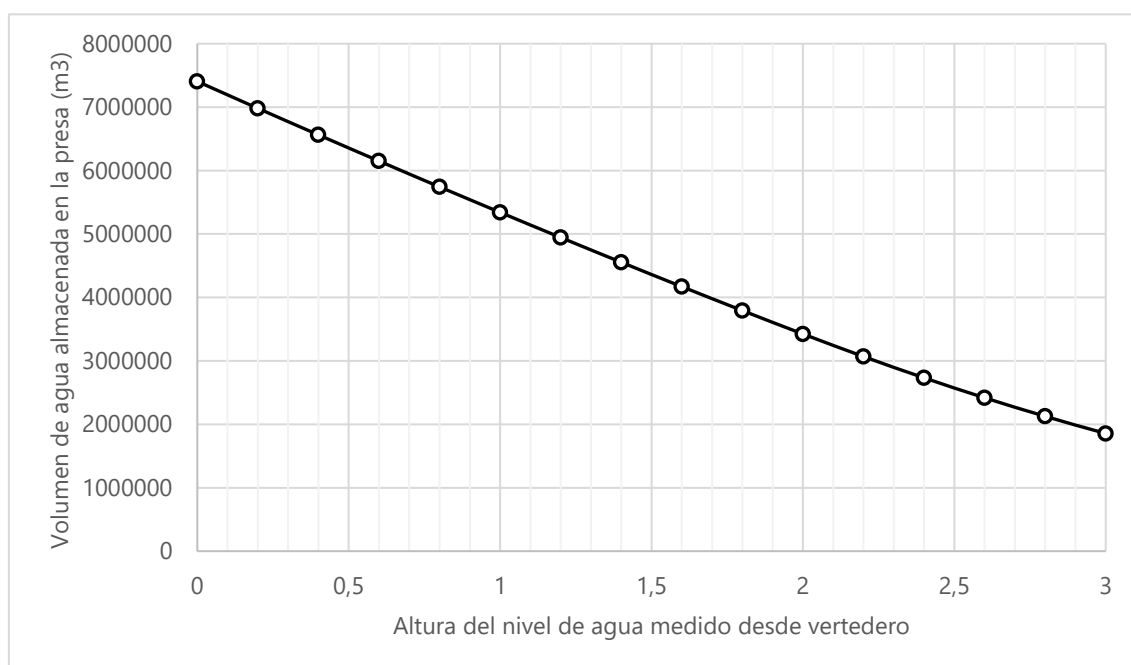
Asimismo, resulta de vital importancia evaluar el impacto del consumo humano sobre el nivel de agua en las represas, así como el manejo de los recursos hídricos por parte de

las actividades agropecuarias en las subcuencas de aporte de las represas, y su influencia en el almacenamiento de agua, datos que podrán ser obtenidos en el proceso de monitoreo continuo.

- **Estimación del volumen de agua almacenada en las presas.**

Para la Presa Guapomó, a partir de los datos generados por el monitoreo de niveles de agua en los periodos (PTMH y PTMS) combinados con la información del Inventario Nacional de Presas y del estudio realizado por (Van der Weijst, 2014), se evaluó el volumen de agua almacenada en la presa. En la Figura 25 se muestra la estimación de los volúmenes de agua a partir del nivel de agua y la curva de volumen de altura obtenida en la batimetría.

Figura 25. Estimación del volumen de agua almacenada en la presa Guapomó para PTMH y PTMS.



Fuente: Adaptado de estudio "Capacidad de Abastecimiento de la Represa Guapomó".

Los volúmenes de agua almacenados en la presa Guapomó fueron:

- Para PTMH, con altura del nivel de agua desde el vertedero de 2.48 m que equivale a un volumen de agua estimado de 2.6 millones de m³
- Para PTMS, con altura del nivel de agua desde el vertedero de 0.03 m que equivale aún volumen de agua estimado de 7.3 millones de m³

El estudio "Capacidad de Abastecimiento de la Represa Guapomó" indica que el volumen mínimo de agua aprovechable en la presa está alrededor de 2 millones de m³ (Van der Weijst, 2014), por lo que en el tiempo del monitoreo PTMH, el volumen

de agua en la presa estaba en sus niveles mínimos y posiblemente dejando de ser la principal fuente de agua para San Ignacio de Velasco.

En el caso de la presa Zapocó sólo se conoce la capacidad máxima del embalse (11.860.000 m³) (PROAGRO, 2010). Sin embargo, este volumen puede haber cambiado en el tiempo por efecto de sedimentación (como lo ocurrido en la presa Guapomó). Es necesario realizar un estudio de batimetría, que combinado con el monitoreo de niveles de agua sirva de insumo para conocer los volúmenes de agua que almacena la presa.

En el caso de la presa San Juancito, lamentablemente no se ha encontrado información sobre las características constructivas ni batimetría de la presa, es así como se recomienda generar información de las características constructivas y batimétricas en la presa.

Como se dijo anteriormente las presas monitoreadas son fuentes de agua principales para las poblaciones cercanas, es así que determinar el volumen de agua que almacenan es fundamental para realizar la gestión y el manejo de las presas y sus cuencas de aporte.

5.2.2 CALIDAD DE AGUAS

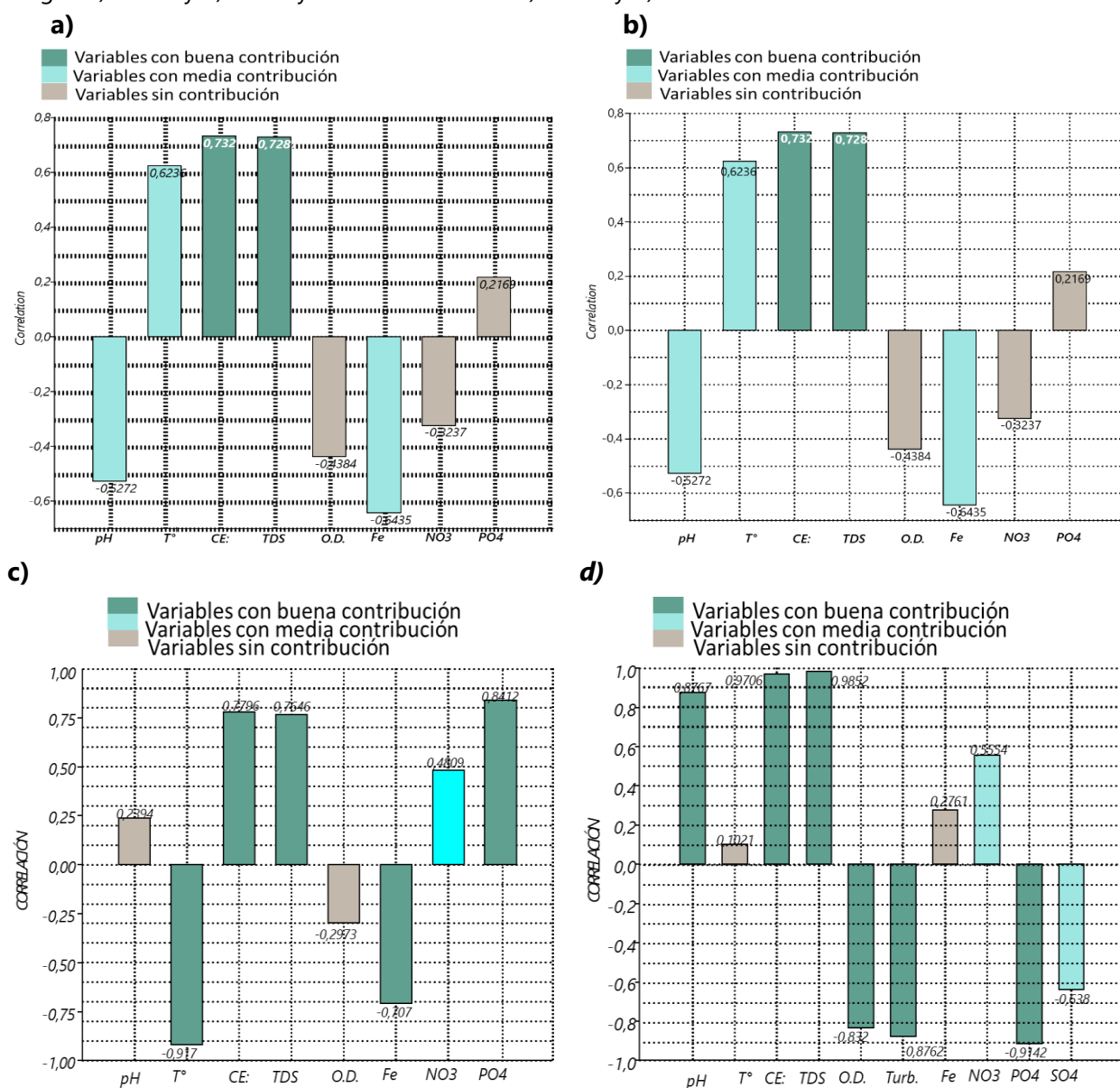
A Ríos

i Calidad fisicoquímica

o Descripción general

Respecto a las variables que tuvieron mayor cantidad de correlaciones significativas en los ríos evaluados (Figura 26) fueron la conductividad eléctrica (C.E.) y los sólidos totales disueltos (T.D.S.). En el caso del hierro (Fe), es la variable que tiene influencia media en la variación, esto se debe a que posiblemente el suelo contenga altas cantidades de hierro (causante de coloración rojiza en el suelo), sólo para San Martín en el PTMH, el fósforo es una variable con alta correlación.

Figura 26. Correlaciones entre factores fisicoquímicos a partir del PCA para ríos en: la cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS y cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS



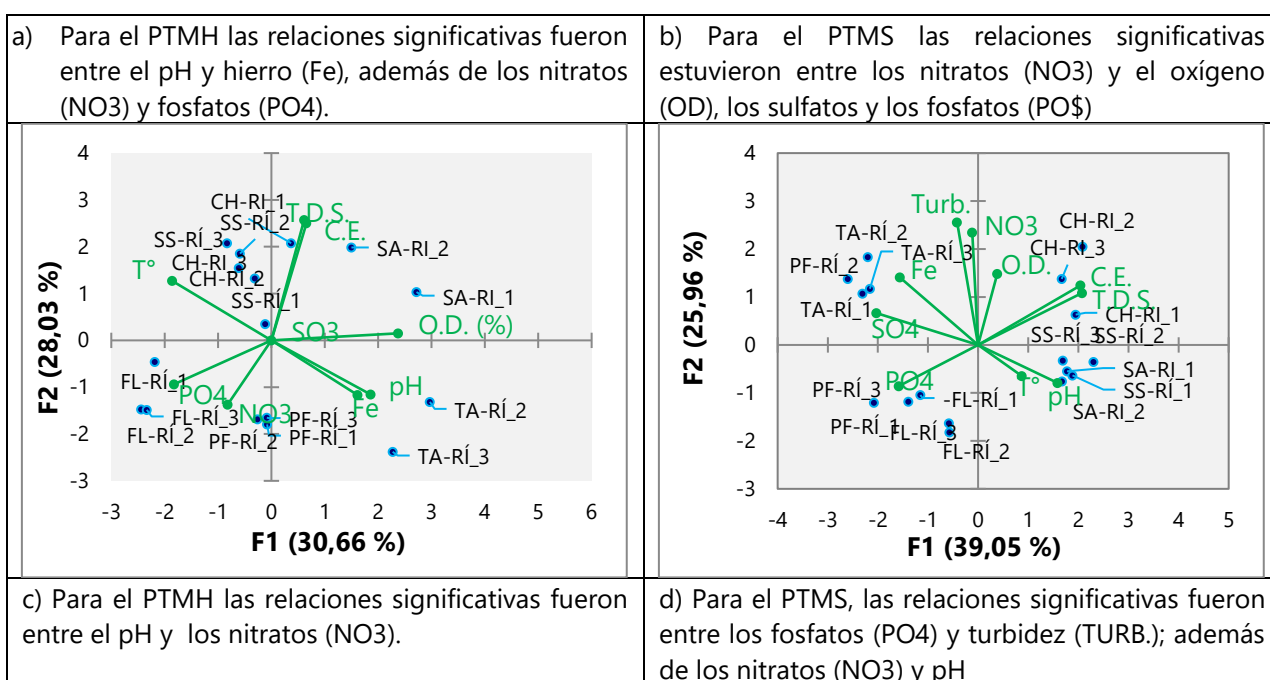
El análisis PCA muestra las correlaciones entre variables ambientales y la dispersión de los puntos. En las cuencas de Paraguá y San Martín, el análisis mostró la relación entre los parámetros y la localización de los sitios, que muestran relación con el incremento y decremento de las variables ambientales. Entre estas se encontraron que:

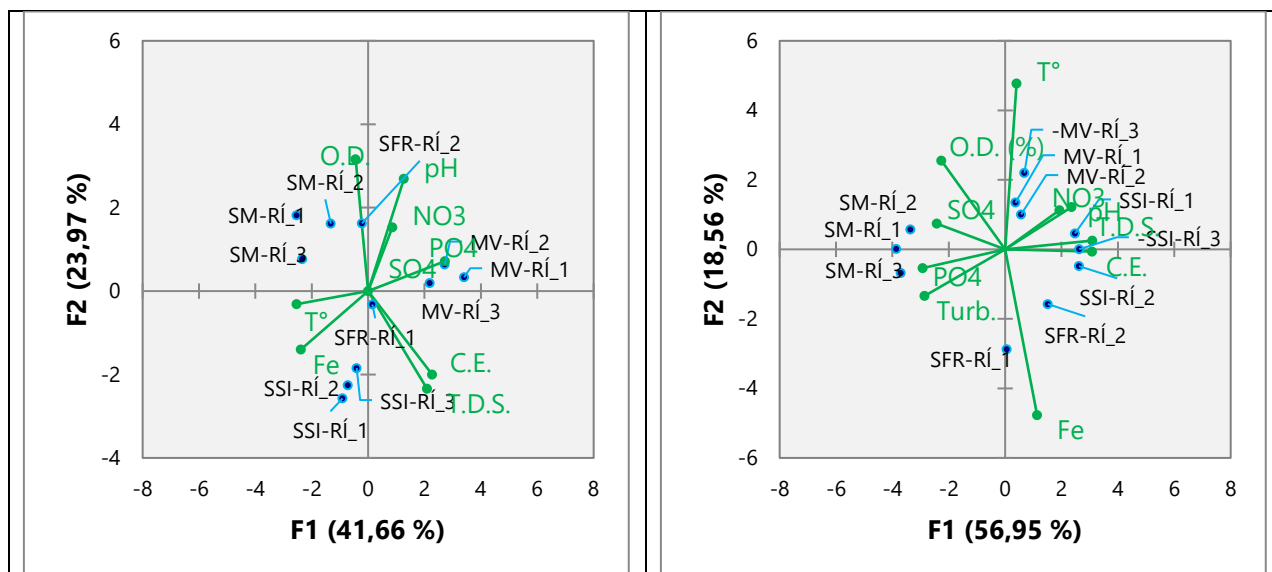
- La distribución de ríos del Paraguá (Figura 27 a) y b)), los puntos evaluados para el PTMH en la zona del alto Paraguá, Chichapó (CH) y San Simón (SS) tienen elevados valores de C.E., TDS y T°. En el caso de los puntos de la cuenca baja, Florida (FL) y Piso Firme (PF) muestran valores altos de nitratos (NO3) y fosfatos (PO4), lo que podría estar relacionado con el punto de muestreo, ya que se realizó en las orillas donde las macrófitas retienen mayor cantidad de materia orgánica. Para el río Tarvo (TA) las variables más importantes son el hierro (Fe) y el pH. Para el PTMS, se observa

una relación significativa entre la turbidez (TURB) y los nitratos (NO₃). Por lo demás, se mantiene el patrón descrito para el anterior periodo de monitoreo, sin embargo, para el Tarvo se tienen altos valores de sulfatos.

- Para la cuenca San Martín (Figura 27 c) y d) en el PTMH, los sitios de Monte Verde (MV) y San Francisco (SF) muestran valores altos de nitratos (NO₃), fosfatos (PO₄) y sulfatos (SO₄). El río San Martín (SM) presenta bajas concentraciones de oxígeno y eso podría estar relacionado con las concentraciones de materia orgánica. Para el PTMS, el patrón del río San Martín muestra asociación con altos valores de sulfatos, fosfatos y la turbidez, lo que sugiere principios de alteración antrópica.

Figura 27. Agrupación de ríos en función de su calidad de aguas en: cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS y cuenca San Martín c) PTMH y d) PTMS, las variables fisicoquímicas vector (verde) y pozos puntos (azul).





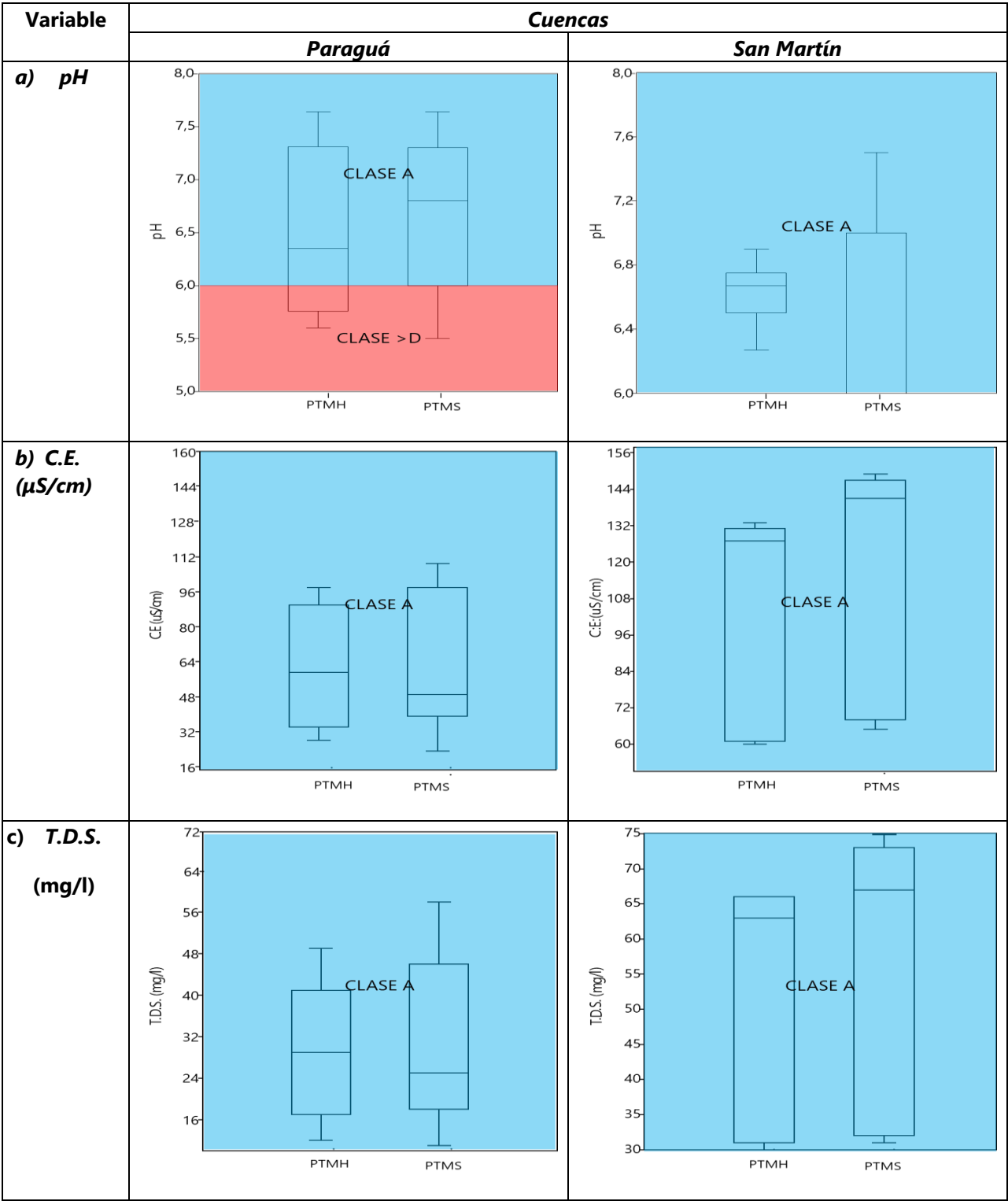
Fuente: Elaboración propia.

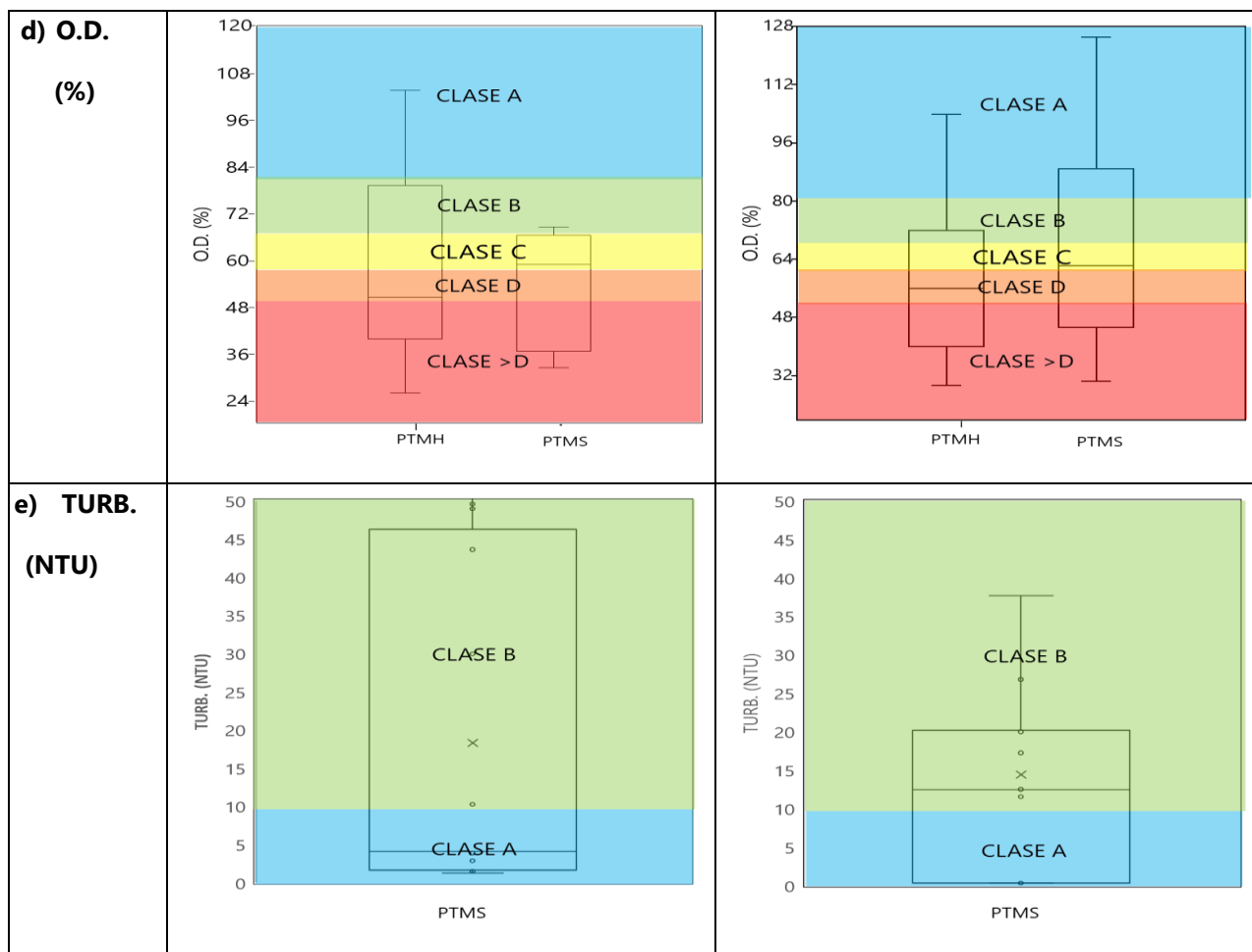
○ Variación temporal

Las variables básicas muestran que:

- Para el pH Figura 28 a) en la cuenca Paraguá se llega a categoría crítica en ríos de la parte de la cuenca alta. Posiblemente esto se deba a ácidos carbónicos provenientes de la cantidad de materia orgánica en el agua. Para los puntos del río San Martín en todos los períodos y puntos de muestreo se encuentran en la categoría "A".
- En el caso de la conductividad eléctrica C.E. y T.D.S. Figuras 27 b) y c) en todos los casos y puntos de monitoreo se encuentran en la categoría "A".
- En el caso del oxígeno (Figura 28 c) para ambas cuencas y periodos de monitoreo se presentan diferentes concentraciones, desde la categoría crítica (>D) a la "A", posiblemente esto es consecuencia de la hora de muestreo, ya que mientras más alta es la temperatura del agua, menor es la cantidad de oxígeno, pero también está asociado a la cantidad de materia orgánica en la zona. En futuros monitoreos se sugiere la evaluación de ácido carbónico para conocer de mejor manera el comportamiento del flujo de carbono en el agua, en el caso de este parámetro
- La turbidez (Figura 28 d) de las aguas para el PTMS se encuentra en las categorías "A" y "B", lo cual muestra buena transparencia en las aguas, sin embargo, para la Norma 512 de aguas para consumo humano, los valores obtenidos no son aptos para consumo. En los periodos más secos, sin embargo, las poblaciones ribereñas consumen de estas aguas debido a que el agua de pozos se agota.

Figura 28. Variables básicas para ríos, en las cuencas de estudio.





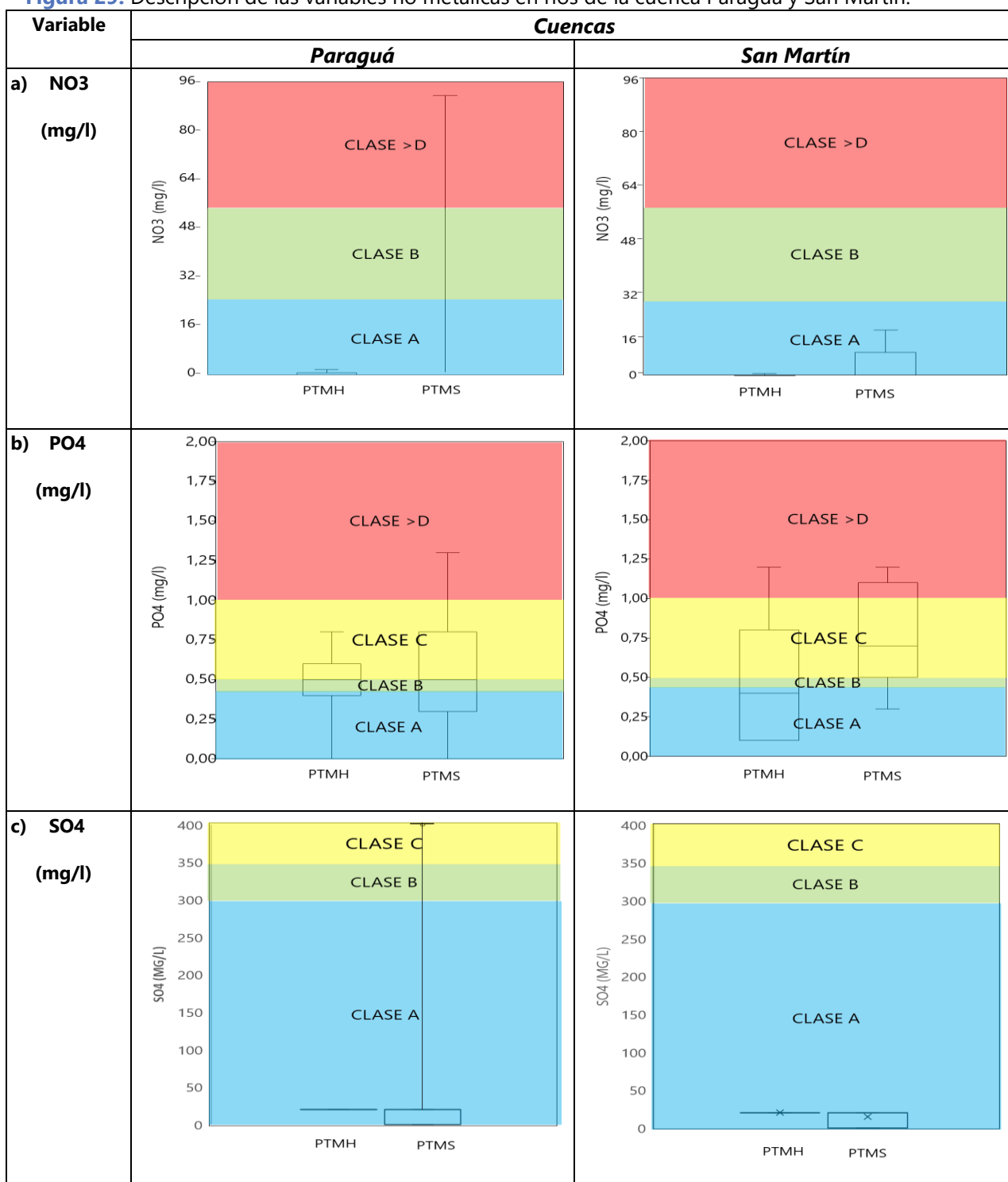
Fuente: Elaboración propia.

Las variables no metálicas, se evalúan para conocer el grado de contaminación por enriquecimiento orgánico se vio que generalmente son bajas, en especial el nitrógeno que es de difícil detección, además las temperaturas elevadas provocan una rápida mineralización de este elemento y posiblemente se precipite hacia el sedimento del río, imposibilitando su detección. Un análisis de nitrógeno amoniacal podría dar mejores indicios de aguas servidas y este parámetro debe ser monitoreado a futuro, aunque en general esta variable tiene relación directa con los nitratos.

- En el caso de los nitratos (NO_3) (Figura 29 a) de la cuenca Paraguá, sólo un punto llegó a la categoría ">D". Todos los otros ríos y puntos quedaron en la categoría "A".
- Los fosfatos (PO_4) (Figura 29 b), en general estuvieron en la categoría "D", posiblemente porque todos los puntos monitoreados se encuentran cercanos a puentes y centros poblados, donde la población está acostumbrada a lavar la ropa con detergentes fosforados o la presencia de fertilizantes fosforados, lo que a su vez se asocia a la baja remoción de las aguas, uno de los valores más altos encontrados está en la comunidad de San Martín (cuenca del mismo nombre), donde la actividad agrícola es muy alta.

- Para los sulfatos (SO₄) (Figura 28c) en general se registra bajo contenido de sulfatos, sin embargo, un punto del río Tarvo alcanza la categoría "C". Esto podría estar relacionado a que en el PTMS las aguas estaban más bajas y provocando un efecto de concentración de la materia orgánica e incrementando el valor de esta variable.

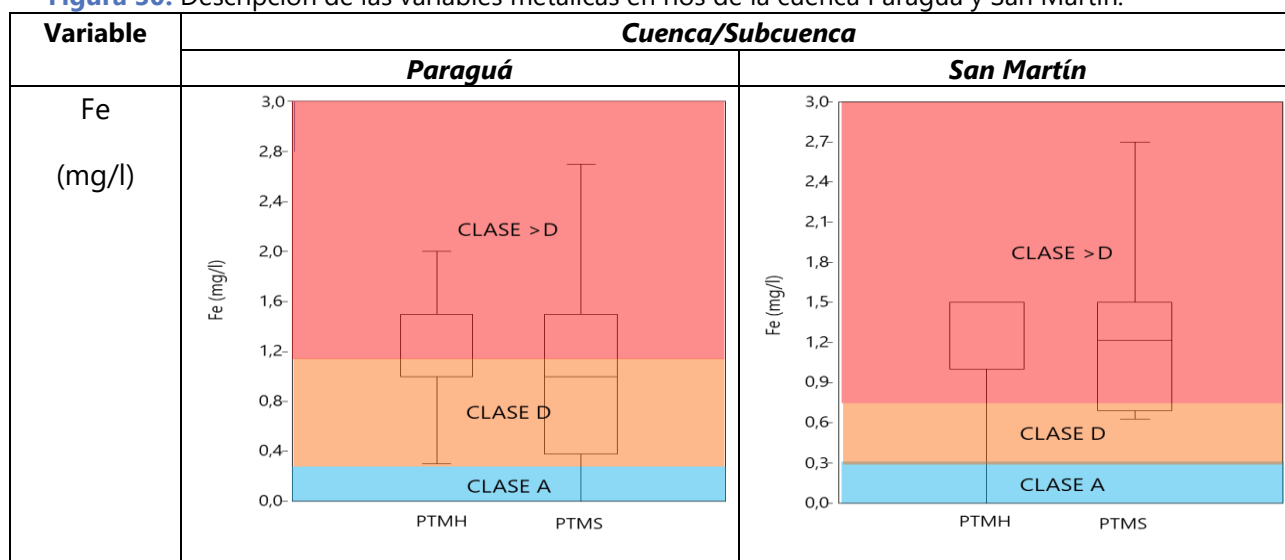
Figura 29. Descripción de las variables no metálicas en ríos de la cuenca Paragvá y San Martín.



Fuente: Elaboración propia.

- El hierro (Figura 30) en todos los casos y puntos de monitoreo estuvo en las categorías "D" y superior (" $>D$ "). Este comportamiento no está asociado a ningún proceso industrial o minero, ya que ninguno de los puntos evaluados está cercano a estas actividades. El arrastre de sedimentos desde la ribera provoca altas concentraciones de este metal debido a que los suelos contienen hierro.

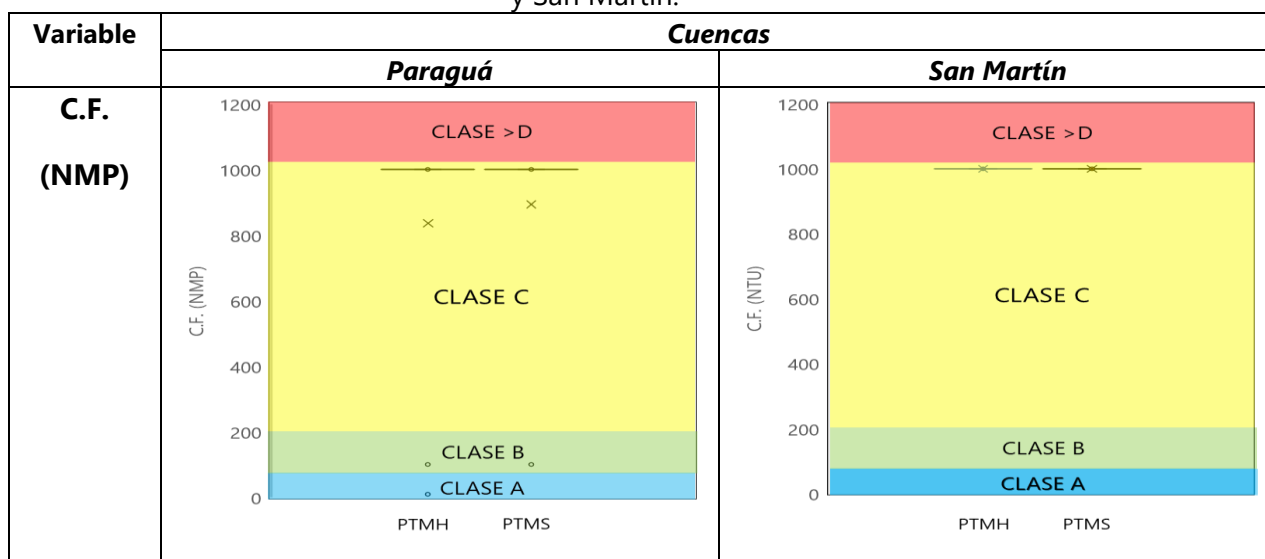
Figura 30. Descripción de las variables metálicas en ríos de la cuenca Paraguará y San Martín.



Fuente: Elaboración propia.

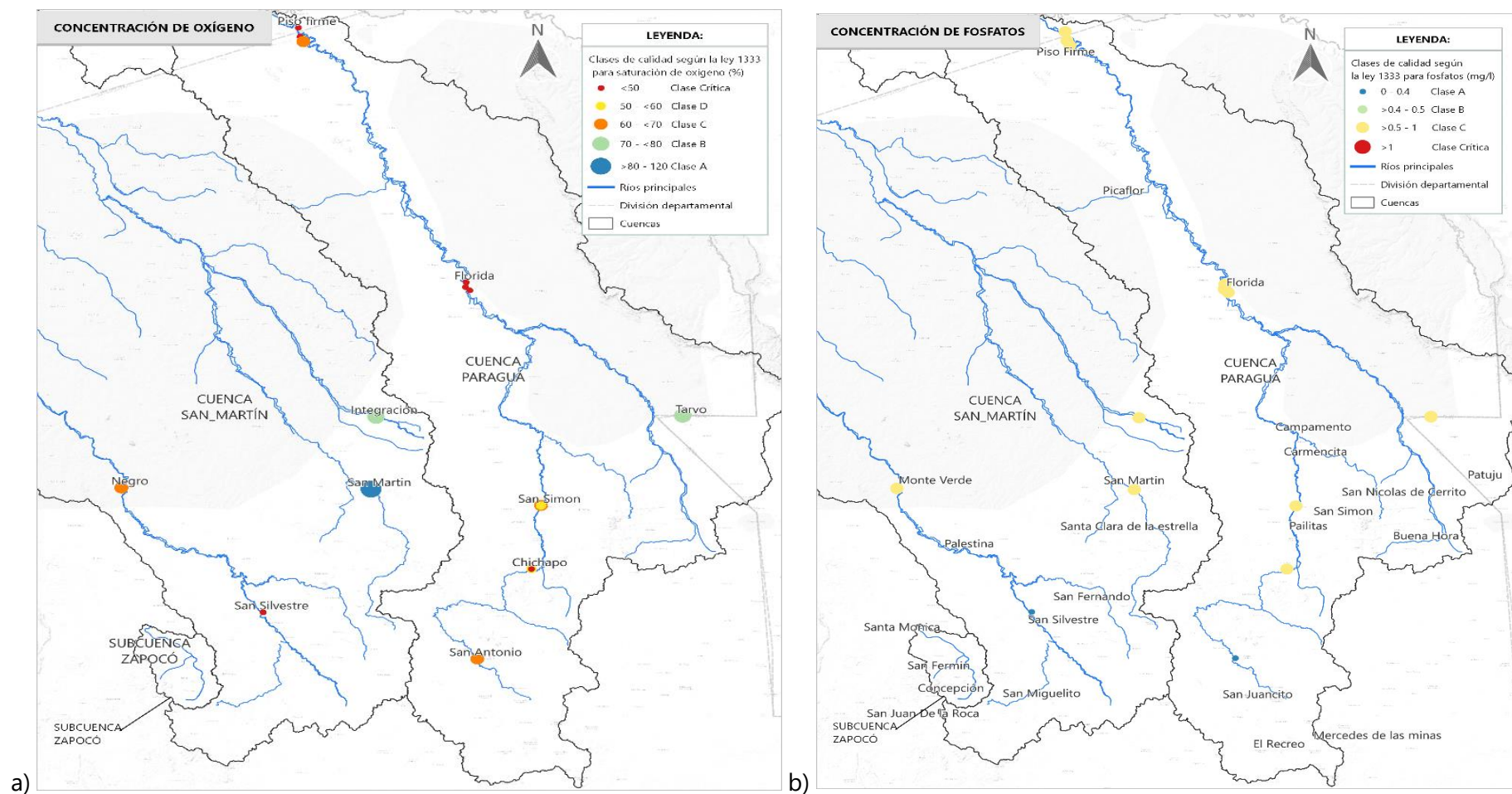
- En cuanto a las condiciones microbiológicas (Figura 31), en todos los casos se clasificamos dentro de la categoría "D". Estos datos, sin embargo, se consideran normales en ecosistemas al aire libre.

Figura 31. Descripción de las variables microbiológicas en ríos de las cuencas Paraguará y San Martín.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Comportamiento de las variables a) saturación de oxígeno, b) fosfatos y c) turbidez.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 32 muestra las variaciones de oxígeno disuelto y fosfatos en ríos, distribuidos a lo largo de la cuenca, donde en general todos los sitios evaluados muestran indicios de alteración antrópica, sobre todo por el ingreso de materia orgánica que al transformarse en detritus consume gran cantidad de oxígeno, por lo cual afecta la calidad de las aguas.

i Calidad biológica

o Descripción general

La comunidad de macroinvertebrados acuáticos (MIA) registrada en los ríos de las cuencas Paraguá y San Martín en el periodo de transición más húmedo (PTMH) y periodo de transición más seco (PTMS), están compuestas por 93 familias distribuidas en 28 órdenes, 13 clases y 5 phylum. El phylum más abundante fue Arthropoda en ambos periodos transicionales (PTMH y PTMS) y cuencas (Paraguá y San Martín). Aunque, es posible notar que los ríos de la cuenca Paraguá fue donde se registró la mayor abundancia de Arthropoda (Tabla 11).

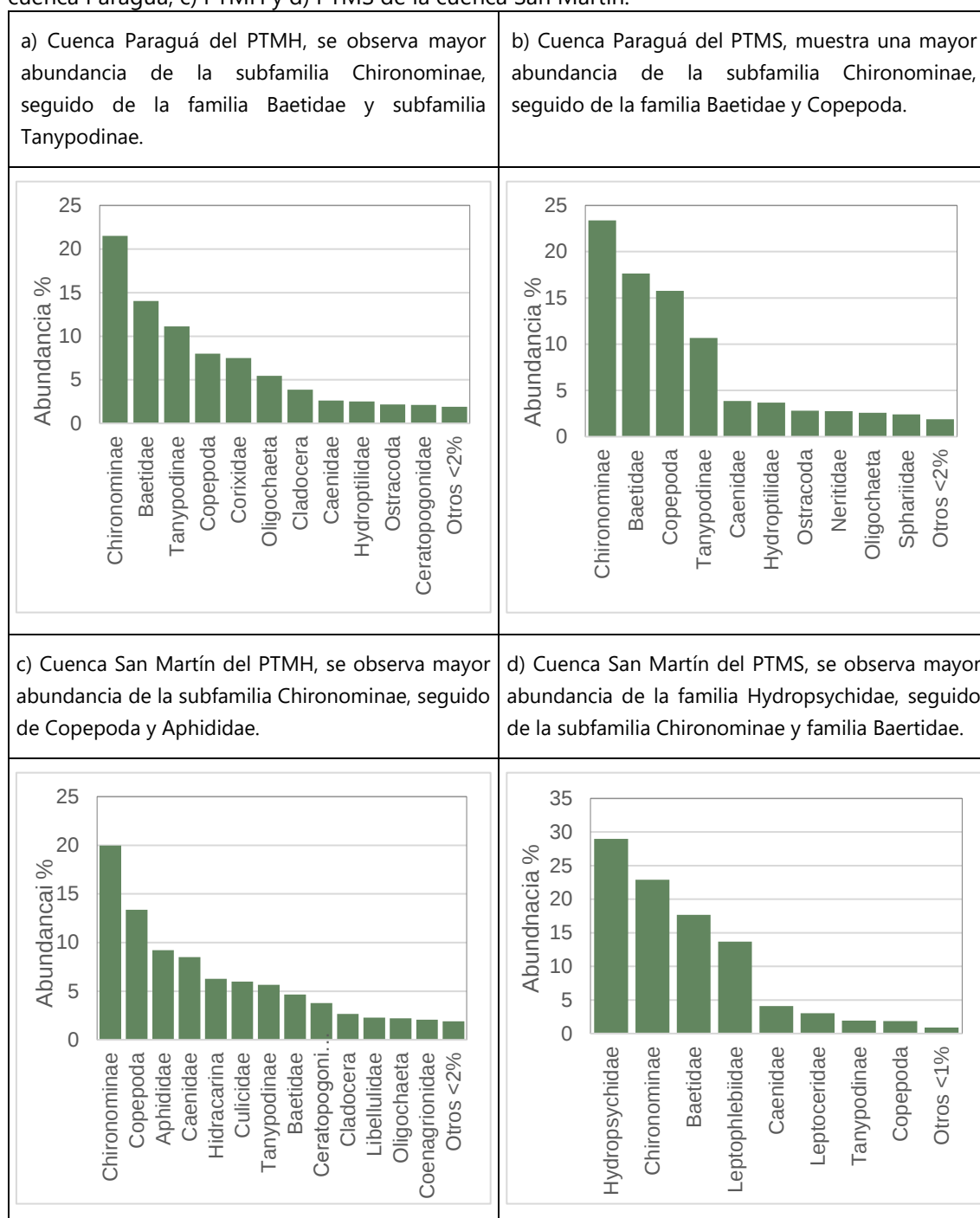
Tabla 11. Abundancia porcentual de los phylum de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos (MIA), en las cuencas Paraguá y San Martín.

Cuencas	Phylum	Abundancia (%) de MIA	
		PTMH	PTMS
Paraguá	Arthropoda	62.38	59.39
	Annelida	4.19	2.54
	Mollusca	2.50	4.30
	Platelminta	0.18	0.03
	Nematoda	0.05	0.09
San Martín	Arthropoda	29.59	33.09
	Annelida	0.70	0.30
	Mollusca	0.35	0.27
	Nematoda	0.08	0.00
Total		100	100

Fuente: Elaboración propia.

A nivel de órdenes, familias y subfamilias (Figura 33), el grupo con mayor abundancia en los ríos para los PTMH y PTMS, fue la subfamilia Chironominae (Diptera: Insecta), seguida de la familia Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) y el orden Copepoda (Crustacea). En el PTMS el patrón respecto a los grupos continúa, aunque la abundancia incrementa, posiblemente por efecto de la época donde las aguas están más tranquilas y permiten que los organismos se desarrollen de mejor manera.

Figura 33. Familias y subfamilias de MIA con mayor abundancia en: a) PTMH y b) PTMS de la cuenca Paraguá; c) PTMH y d) PTMS de la cuenca San Martín.



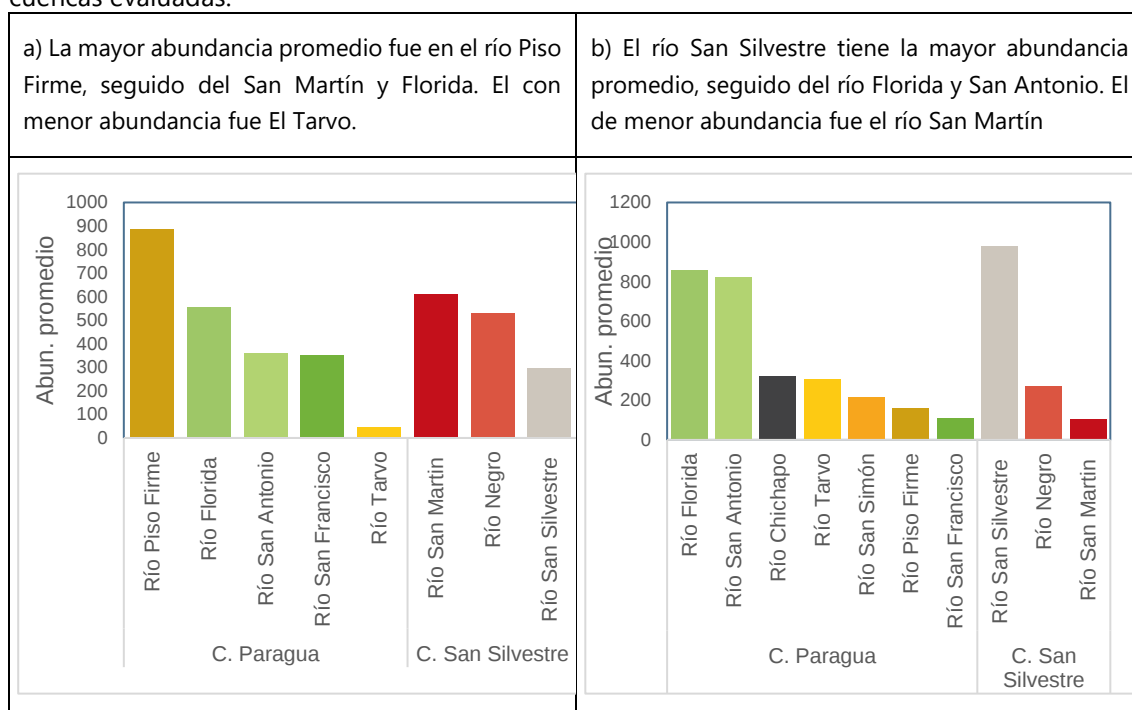
Fuente: Elaboración propia.

Considerando que los datos de abundancia de macroinvertebrados acuáticos (MIA), a lo largo del tiempo en un mismo río puede ayudar a identificar tendencias y cambios en la calidad del agua y en el estado del ecosistema. Esto es especialmente útil para evaluar el impacto de las acciones de restauración o de medidas de gestión ambiental. Por lo tanto, en base a las máximas abundancias relativas encontradas de MIA (Figura 33), en ambos periodos transicionales, en las cuencas Paraguá y San Martín, los grupos taxonómicos que podrían ser objetos de monitoreos futuros en ríos, son:

- i. Subfamilias Chironominae (Orden Diptera)
- ii. Familias Hydropsychidae (Orden Trichoptera)
- iii. Familia Baetidae (Orden Ephemeroptera)
- iv. Orden Copepoda (Clase Crustacea)
- v. Familia Tanypodinae (Orden Diptera)
- vi. Familia Aeshnidae (Orden Odonata)

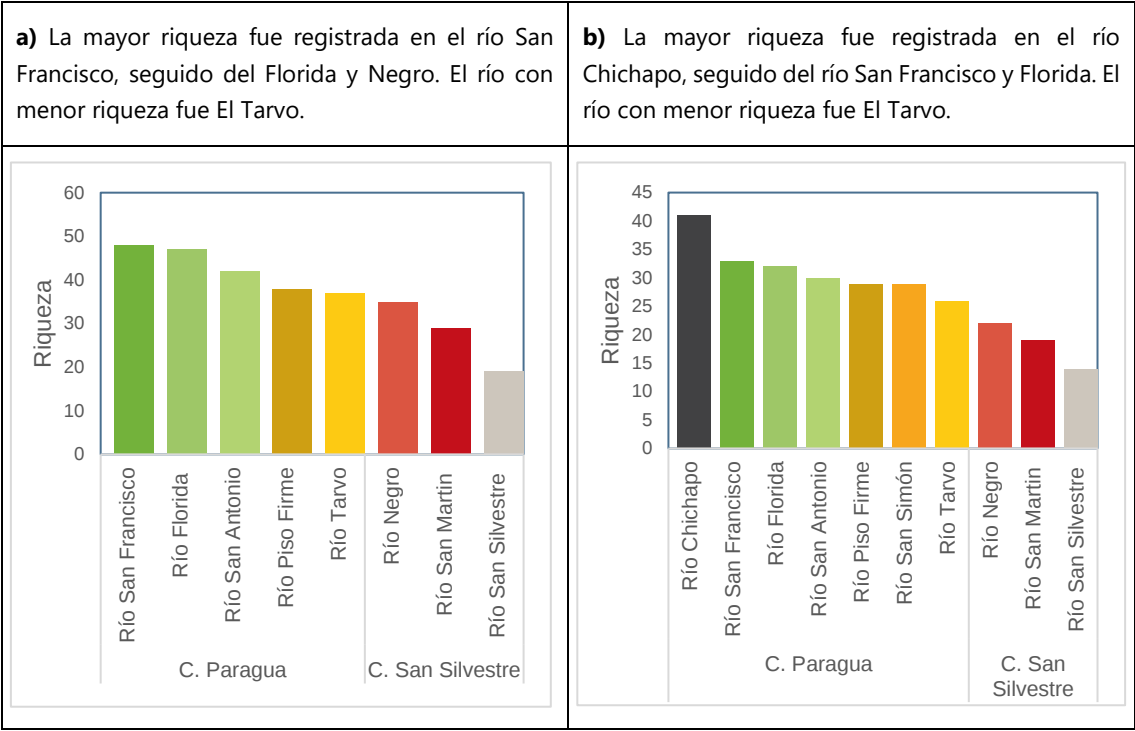
Por otro lado, en el PTMH el río con mayor abundancia de MIA fue Piso Firme (Cuenca Paraguá) y para el PTMS San Silvestre (Cuenca San Martín) (Figura 34). En el caso de la riqueza de MIA en ambos monitoreos, se evidencia alta riqueza en los ríos San Francisco (cuenca Paraguá), Florida (cuenca Paraguá) y Negro (San Silvestre) y sólo para el PTMS el río con mayor riqueza fue Chichapo (Cuenca Paraguá). En todos los casos el río Tarvo (cuenca Paraguá) muestra la menor riqueza (Figura 35).

Figura 34. Riqueza de familias y subfamilias de MIA en el a) PTMH y b) PTMS en ríos de las cuencas evaluadas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Riqueza de familias y subfamilias de MIA en: a) PTMH y b) PTMS en los ríos de las cuencas evaluadas.



Fuente: Elaboración propia.

Si bien los cambios de abundancias y riquezas de MIA pueden proporcionar información general asociada a las fuentes de perturbación en un río; donde, por ejemplo, la disminución de la abundancia de ciertos taxones sensibles (familias, especies, etc.) a la contaminación orgánica podría indicar que la contaminación orgánica es un problema en el área. Sin embargo, tal situación puede verse influenciada por 1) variaciones estacionales, 2) zonas de transición o límites de ecosistemas contiguos o 3) diferente tipo de hábitat (efecto borde o ecotonos). Por lo tanto, las mimas deben ser consideradas como variables exploratorias, tomadas con cautela y estar acompañada de análisis de mayor robustez, tal como índices de diversidad en base a los Número de Hill, mismos que se detallas en los siguientes párrafos.

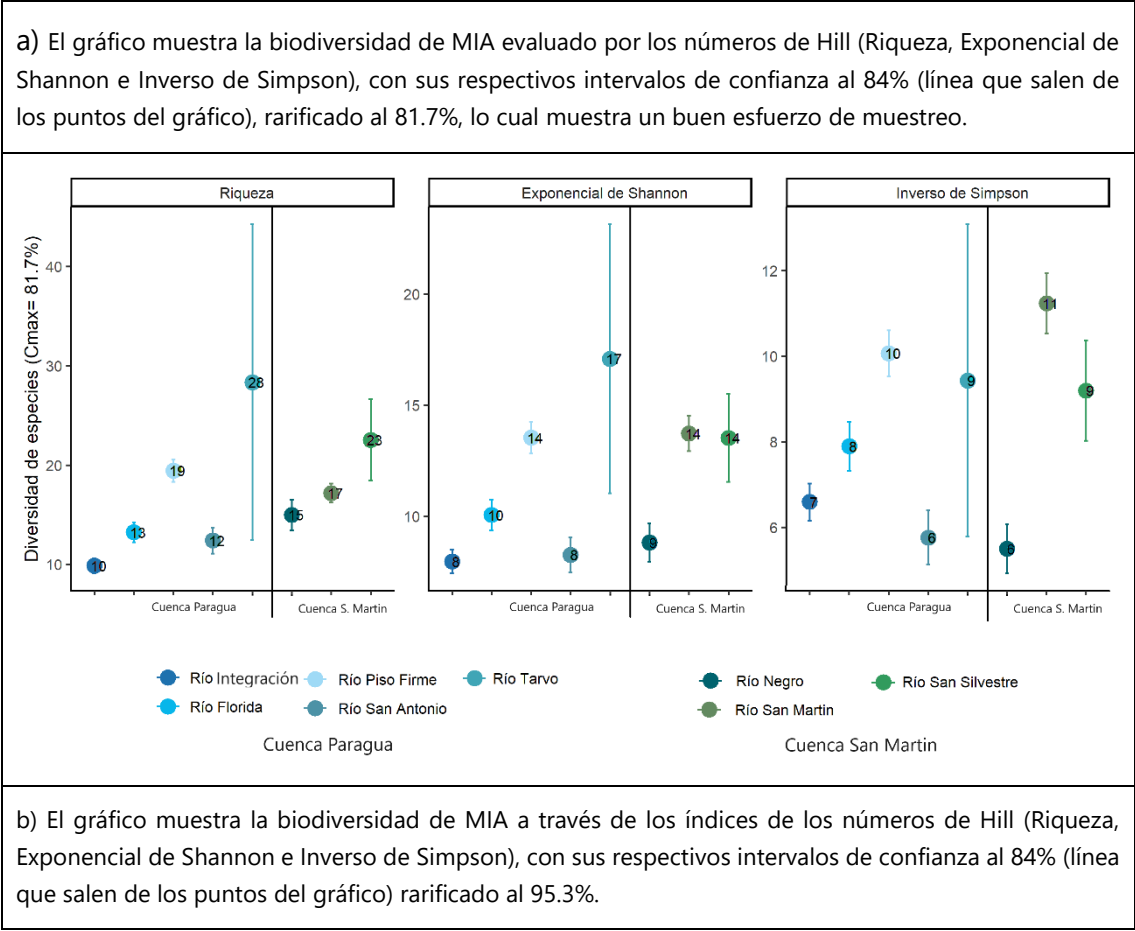
◦**Variación temporal de la biodiversidad (Número de Hill) y calidad del agua (BMWP-Bol)**

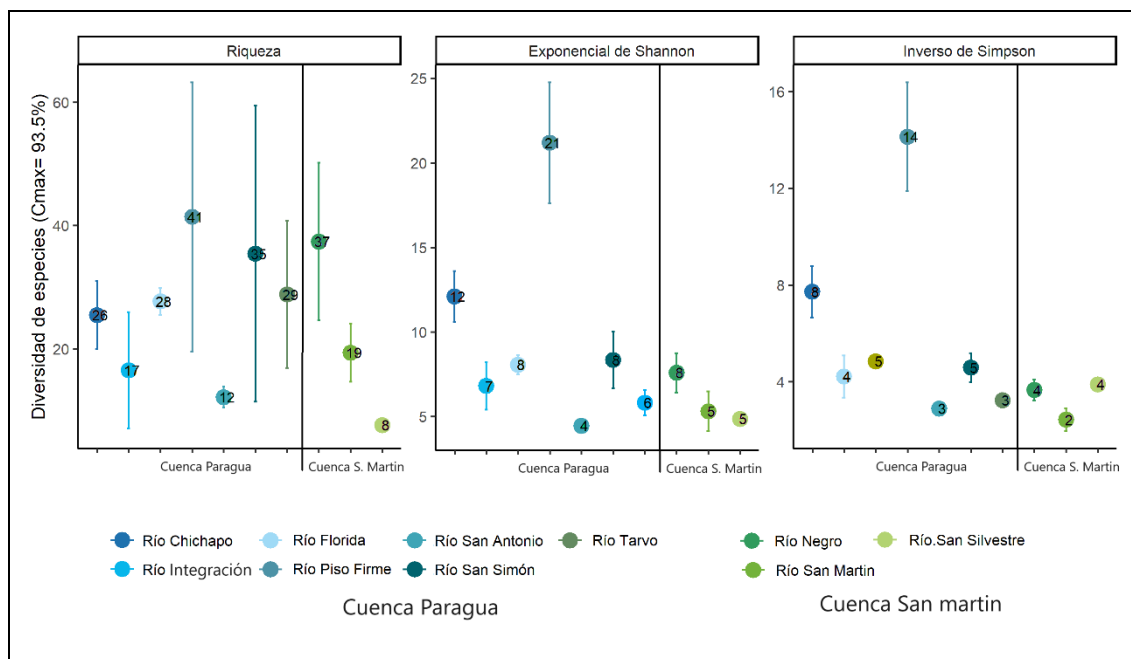
Para el PTMH, según los índices exponencial de Shannon e inverso de Simpson, los cuales podrían entenderse como estimadores del estado de salud ecosistema y/o la calidad del agua; los ríos con mayor biodiversidad fueron: el Tarvo, San Martín, San Silvestre y Piso Firme. El patrón se mantiene en el PTMS, aunque sobresale el río Piso Firme con más del triple del valor de biodiversidad (Exponencial de Shannon e inverso de Simpson) y el río Chichapó con más del doble de la biodiversidad respecto a otros ríos (Figura 36).

Asimismo, en la Figura 36, también se muestran los intervalos de confianza (líneas por encima y debajo de los puntos) de los índices de biodiversidad, los cuales nos indican

que en PTMH la biodiversidad de los ríos es similar entre el Tarvo (Cuenca Paraguá), San Silvestre (Cuenca San Martín), San Martín (Cuenca San Martín) y Piso Firme (Cuenca Paraguá), donde no se muestran diferencias entre cuencas. Estos ríos se diferencian de manera significativa de los ríos Integración (Cuenca Paraguá), Florida (Cuenca Paraguá), Negro (Cuenca San Martín) y San Antonio. En cambio, en el PTMS, este patrón deja de ser evidente, resaltando solamente el río Piso Firme (Cuenca Paraguá) que se diferencia de todos por tener la mayor biodiversidad.

Figura 36. Variación y comparación significativa de la diversidad evaluada a través de los números de Hills, en a) PTMH y b) PTMS.



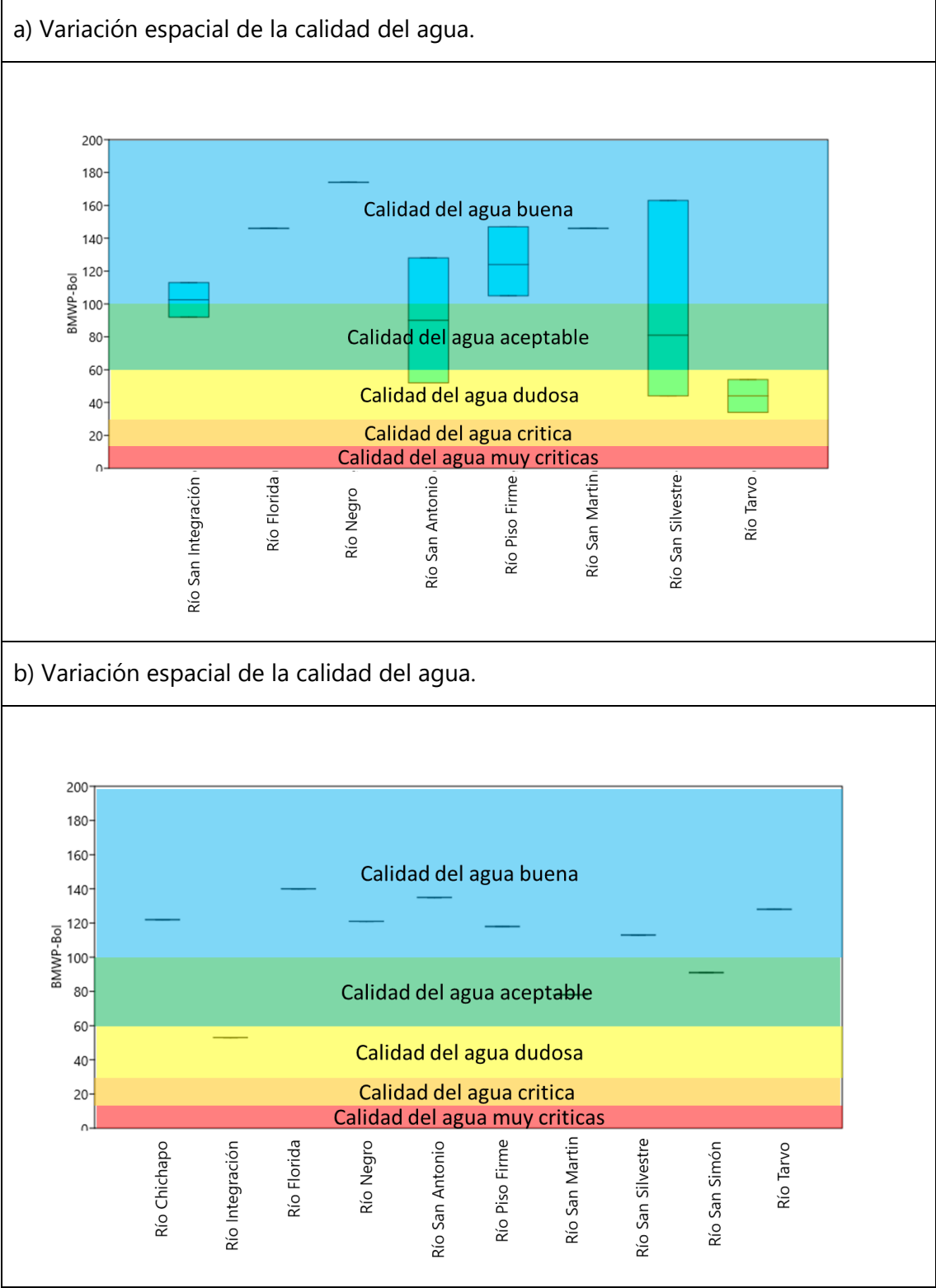


Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en los ríos muestreados, en ambos periodos de monitoreo, la calidad del agua según el índice biótico BMWP-Bol (Figura 37 a), muestra variabilidad y los puntos oscilan entre las Clases I y II (calidad el agua buena y aceptable). En el PTMH el río Tarvo (Cuenca Paraguá) tiene una calidad del agua Clase III (calidad el agua dudosa) en todos sus puntos. Los ríos San Antonio (Cuenca Paraguá), San Francisco (Cuenca Paraguá) y San Silvestre (Cuenca San Silvestre) presentan una calidad que varía entre Clase I, II y III, (Calidad del agua buena, aceptable y dudosa, respectivamente) en algunos de sus puntos, los restantes ríos tienen una calidad de agua Clase I (Calidad del agua buena).

En el PTMS, el río San Francisco (Cuenca Paraguá) muestra una calidad del agua Clase III (Calidad del agua dudosa) y los ríos San Martín (Cuenca San Martín) y San Simón (Cuenca Paraguá) una calidad Clase II (Calidad del agua aceptable) (Figura 37 b).

Figura 37. Variaciones de la calidad del agua en los diferentes ríos evaluados a través del índice biótico BMWP-Bol, en a) PTMH y b) PTMS.



Fuente: Elaboración propia.

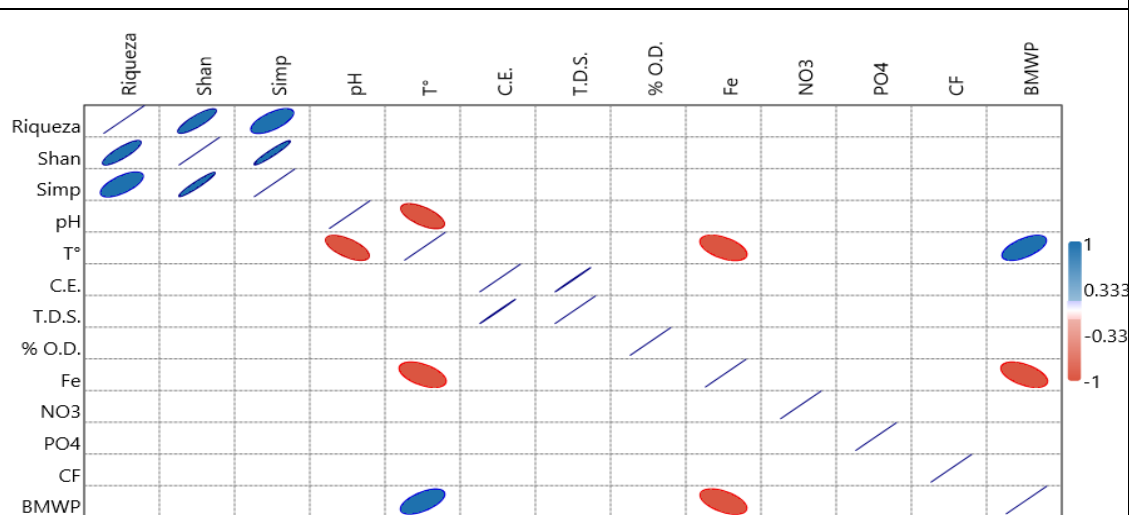
○ *Correlaciones de las variables dependientes (biológicas) e independientes (físicoquímicas)*

Las correlaciones de Spearman realizadas para ríos, entre las variables dependientes (biológicas) e independientes (físicoquímicas) presentaron variaciones temporales. En el PTMH solo el índice biótico BMWP-Bol se correlaciona significativa y positivamente con la temperatura y negativa con el hierro, es decir este elemento afecta la actividad metabólica de los MIA. En cambio, en el periodo transicional más seco (PTMS) se evidenciaron correlaciones positivas y significativas entre el exponencial de Shannon, inverso de Simpson y los fosfatos (PO₄) (Figura 38),

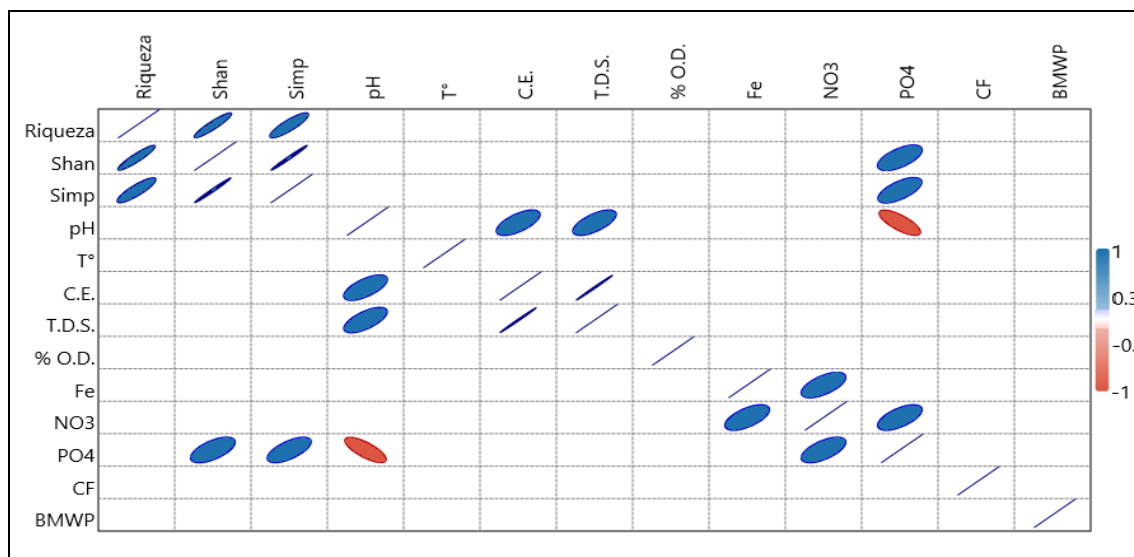
También fue posible identificar que, entre la riqueza, el exponencial de Shannon e inverso de Simpson se correlacionan entre sí de manera positiva y significativa, en ambos periodos de muestreo, lo que explica su asociación con cambios de la composición de MIA. Esto a su vez, no se encontró ninguna correlación significativa con el índice biótico BMWP-Bol, evidenciando que el mismo no cambia con relación de la composición de MIA o variables físicoquímicas. Asimismo, entre las variables independientes es posible notar que, en el PTMH, solo la temperatura muestra una correlación negativa y significativa con el pH y el hierro (Fe).

Figura 38. Matriz de correlaciones de Spearman. a) PTMH y b) PTMS. Las elipses de color azules muestran una correlación positiva y significativa; en cambio, las elipses de color rojo muestran una correlación negativa y significativa.

a) Correlaciones positiva y significativa entre el índice biótico BMWP-Bol con la temperatura (T°) y una correlación negativa y significativa con el hierro (Fe).



b) El índice de biodiversidad exponencial de Shannon (Shan) e inverso de Simpson se correlaciona positiva y significativamente con el fosfato (PO₄).



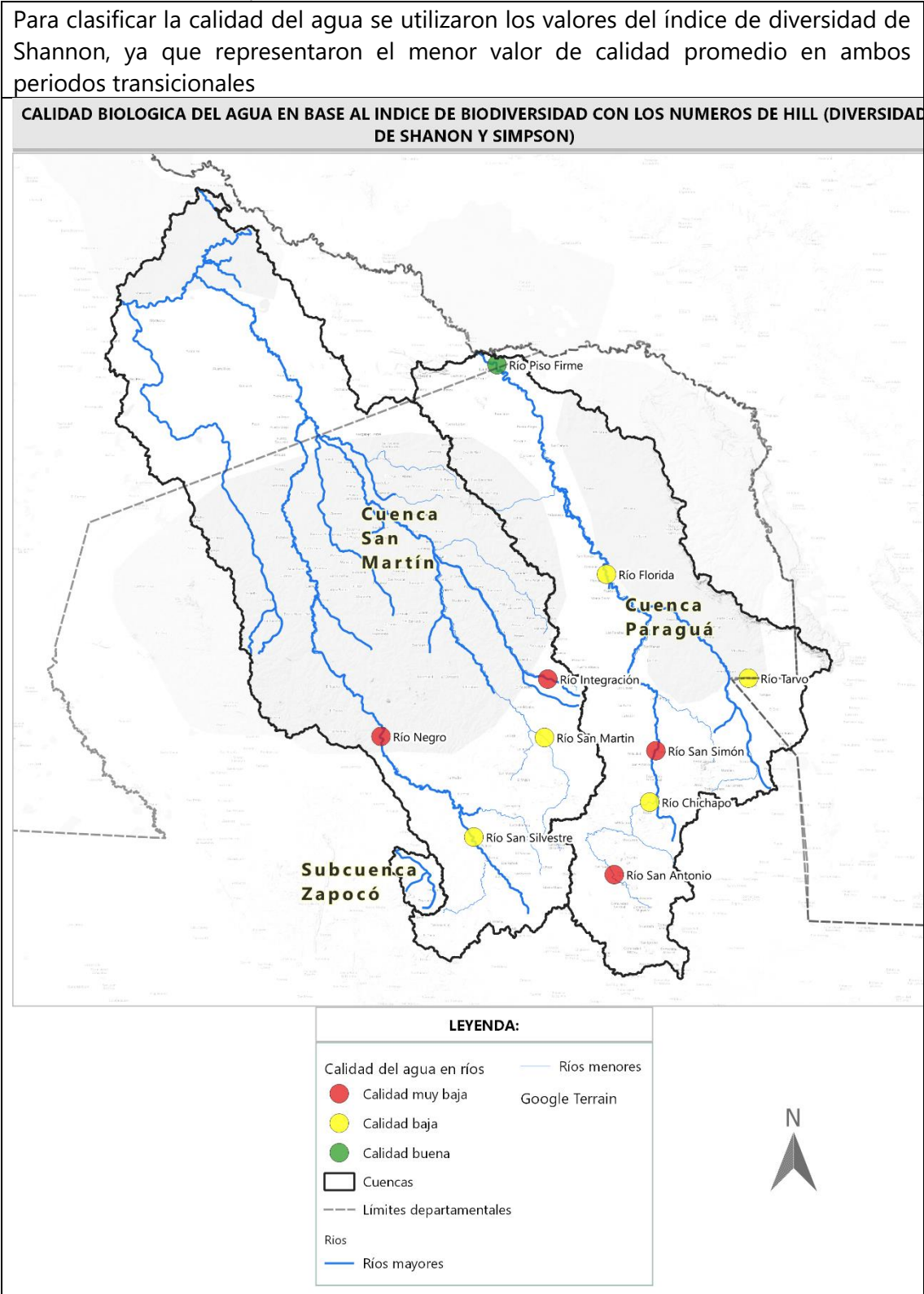
Fuente: Elaboración propia.

En base a las correlaciones antes descritas, que muestran indicios que el índice biótico BMWP-Bol, no evidencian correlaciones importantes y significativas con algunas variables fisicoquímicas, es posible que el mismo no representen las condiciones ambientales asociada a las actividades antrópicas, por lo que su uso, en la Chiquitania, deberá necesariamente ser acompañado de otros análisis de biodiversidad.

Por otro lado, considerando que el índice de diversidad exponencial de Shannon e inverso de Simpson, muestran una correlación positiva y significativa con variables asociadas a el enriquecimiento y eutrofización de las aguas superficiales, por el aumento de fosfatos, será necesario realizar nuevas observaciones para evidenciar si tal asociación es un fenómeno aislado o recurrente, previo a su uso.

En la Figura 39, se observa que los ríos Piso Firme (Cuenca Paraguá) presentaron una buena calidad del agua, los ríos Florida, Tarvo, San Martín, Chichapo y San Silvestre, presentan una baja calidad del agua y los ríos San Simón, Integración y Negro, tienen una muy baja calidad el agua.

Figura 39. Clasificación de la calidad del agua de ríos en función a al índice exponencial de Shannon e inverso de Simpson.



Fuente: Elaboración propia.

B Presas

i Calidad fisicoquímica

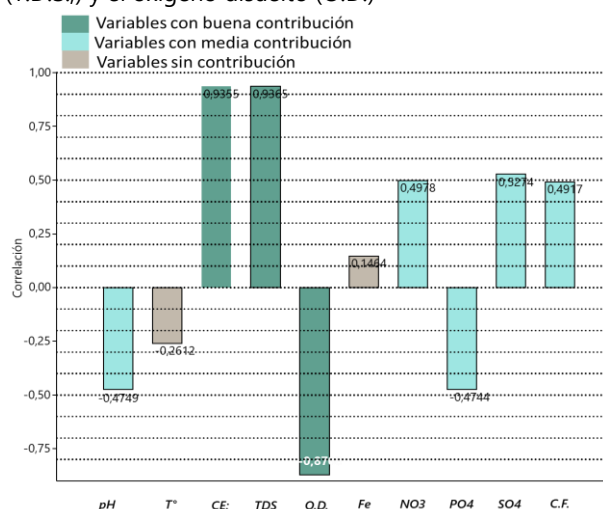
o Descripción general

En este punto se describe un patrón general del comportamiento de los puntos evaluados. De esta forma se conoce si existen algunas zonas críticas para aplicar alguna medida correctiva. Los sitios de ríos y represas se encuentran en la ficha diseñada para los municipios, ya que ellos se deben hacer cargo de estos puntos de monitoreo.

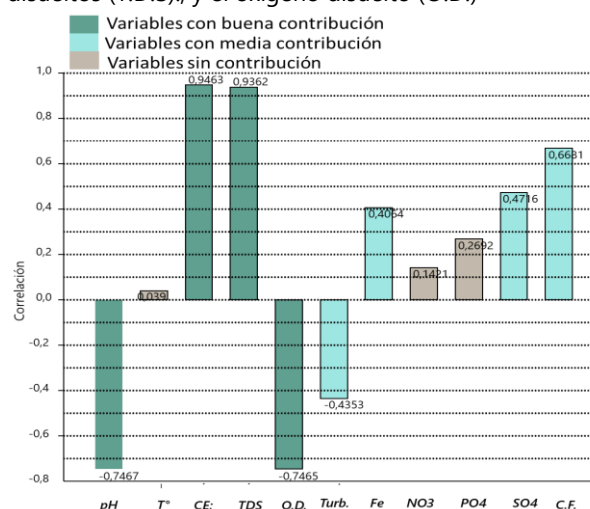
En ambos periodos de monitoreo, las variables que tuvieron las correlaciones más significativas fueron: el pH y el oxígeno (O.D.). Para el PTMS, el pH contribuyó altamente con la variabilidad, además del hierro (Fe) y los sulfatos (SO₄), fueron las variables que contribuyeron con una relación cercana a ($r=0,40$) (Figura 40).

Figura 40. Contribución de las variables de calidad de aguas en presas en las cuencas Paraguá y Subcuenca Zapocó en: a) PTMH y b) PTMS.

a) PTMH: Las variables que más contribuyeron fueron: la conductividad eléctrica (CE), los sólidos totales disueltos (T.D.S.) y el oxígeno disuelto (O.D.)



b) PTMS: Las variables que más contribuyeron fueron: el pH, la conductividad eléctrica (CE), los sólidos totales disueltos (T.D.S.) y el oxígeno disuelto (O.D.)



Fuente: Elaboración propia.

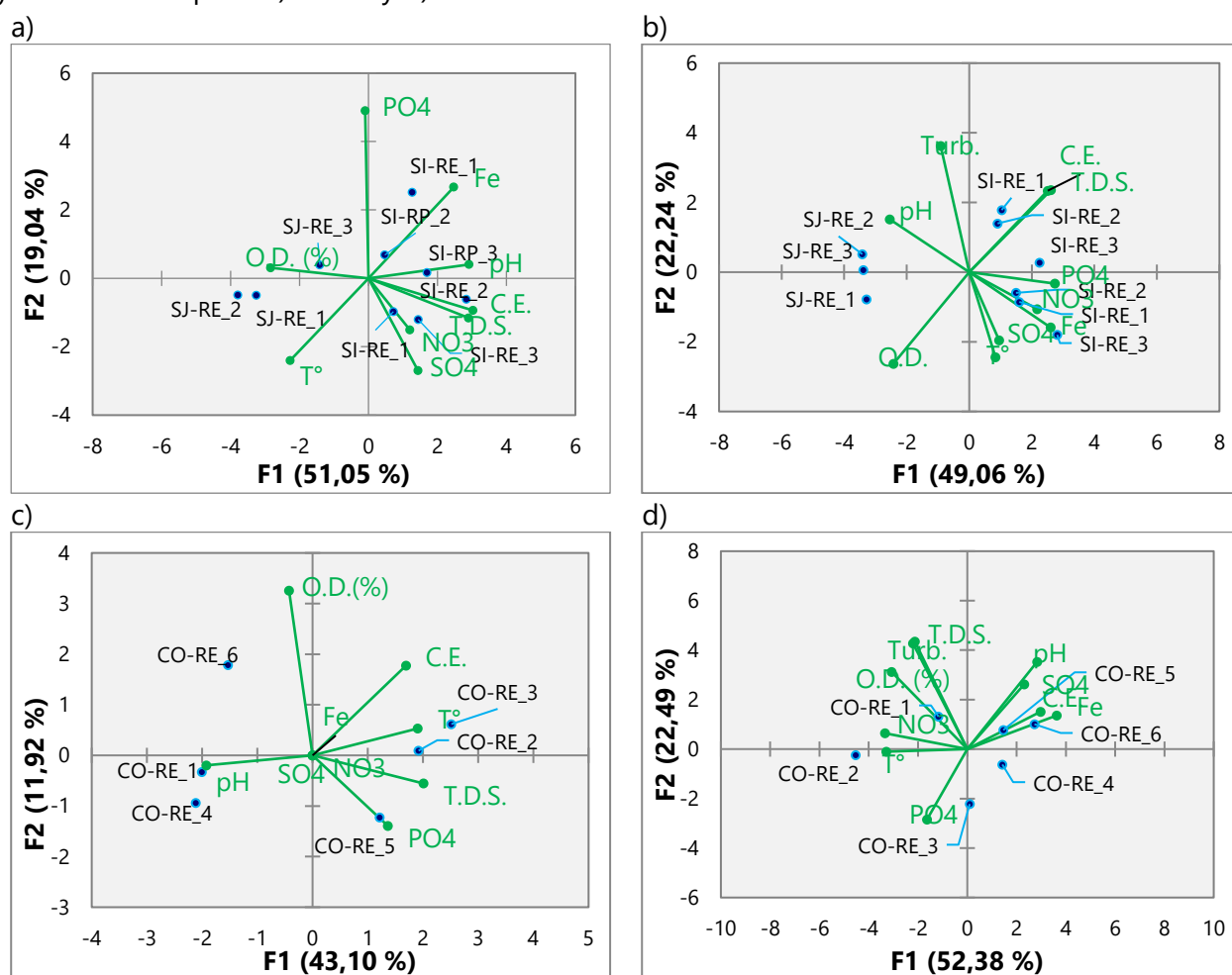
o Variación temporal de la calidad de aguas

El Análisis PCA, presenta las correlaciones entre variables ambientales y la similitud de calidad de aguas de puntos en presas analizadas para las cuencas, muestran que:

- En la represa Guapomó (cuenca Paraguá) (Figuras 41 a) y b)), en el PTMH, los puntos de muestreo S1-RE-1 al 3, tienen relación significativa con la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (C.E. y T.D.S.), los nitratos (NO₃) y sulfatos (SO₄); este patrón se mantiene para el PTMS.

- En la represa de Zapocó (subcuenca del mismo nombre) (Figuras 41 c) y d)), para el PTMH, la mayor parte de los sitios tienen similares comportamientos y tienen valores bajos en todas las variables; sólo los fosfatos (PO4), los sólidos totales disueltos T.D.S. y la temperatura (T°) fueron elevados en los puntos de muestreo CO-RE_3, 2 y 5. Para el PTMS, CO-RE_5 y 6 tuvieron altos valores de sulfatos (SO4) y hierro (Fe).

Figura 41. Variables fisicoquímicas para presas en: cuenca Paraguá a) PTMH y b) PTMS y subcuenca Zapocó c) PTMH y d) PTMS.



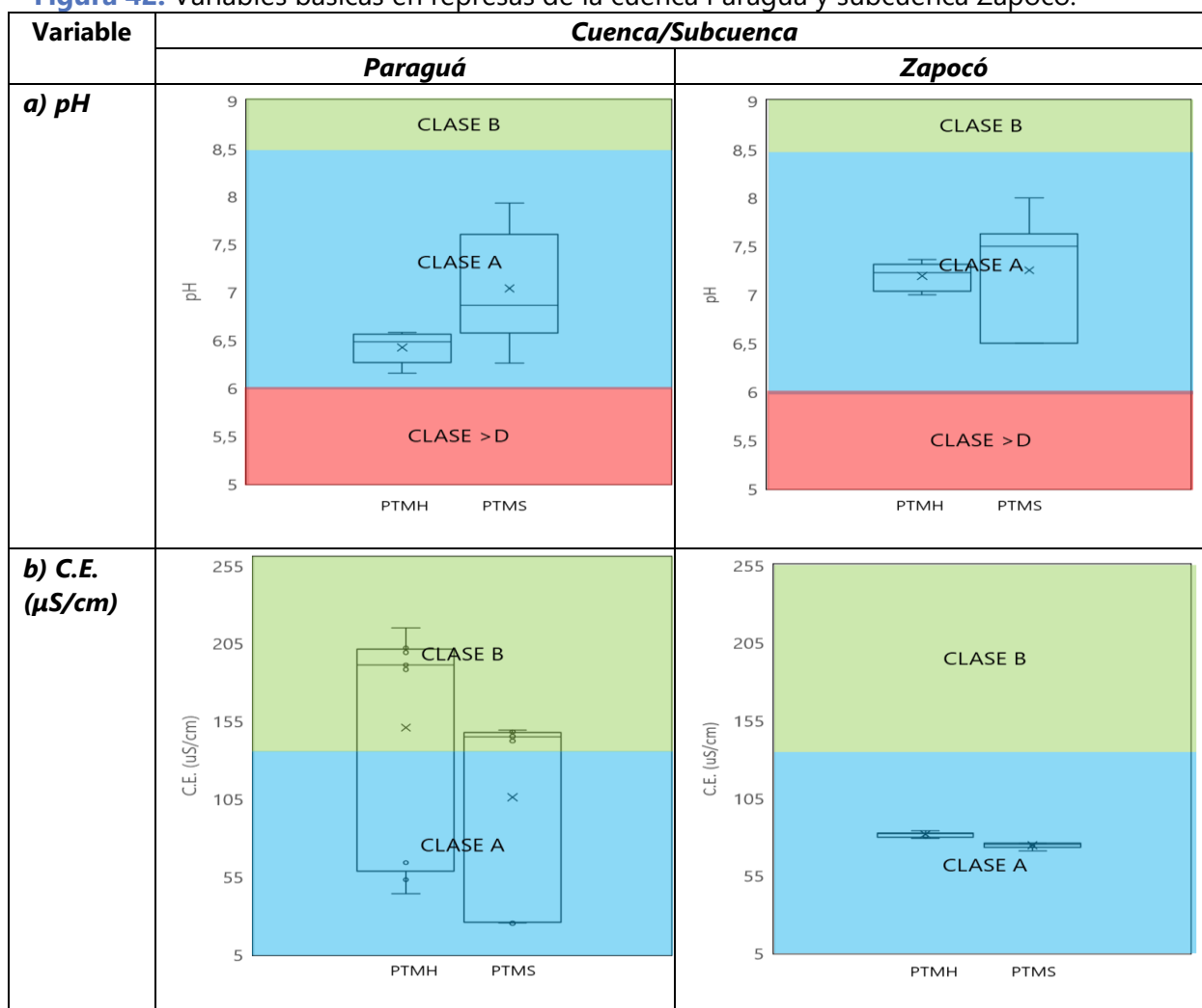
Fuente: Elaboración propia.

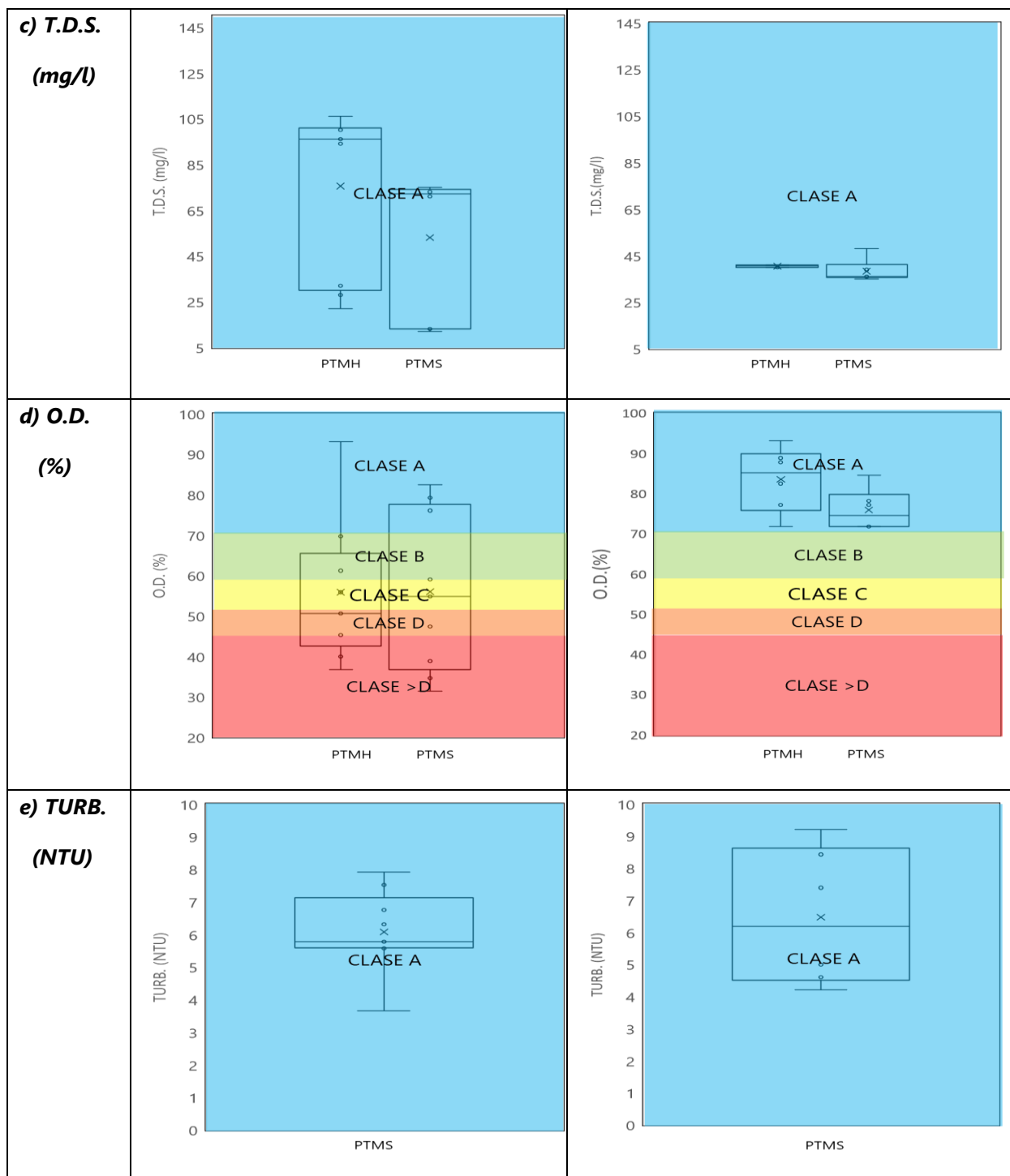
Respecto a la clasificación de calidad de aguas y los límites permisibles, las siguientes gráficas comparan los dos periodos de monitoreo (PTMH y PTMS). Las variables evaluadas fueron comparadas para las diferentes cuencas y subcuencas, mostrando las siguientes características:

- El pH (Figura 42 a), en ambas cuencas y periodos de monitoreo se situó en la categoría de aguas "A".
- La conductividad eléctrica (C.E.) (Figura 42 b) y los sólidos totales disueltos (T.D.S.) (Figura 42 c) varían entre las categorías "A" y "B".

- En el caso del oxígeno disuelto (O.D.) (Figura 42 d), para el Paraguará se tiene puntos de evaluación que alcanzan la categoría "D", esto debido a que en la zona la película de agua es delgada y fácilmente pierde el oxígeno por efecto del incremento en la temperatura. Además, indica la presencia de lodos anóxicos producidos por la alta acumulación de materia orgánica.
- La turbidez (Figura 42 e) medida sólo para el PTMS en todos los casos se encuentra en la categoría "A" para la Ley 1333; sin embargo, para la NB 512 todos los puntos analizados muestran que son aguas no aptas para consumo humano.

Figura 42. Variables básicas en represas de la cuenca Paraguará y subcuenca Zapocó.



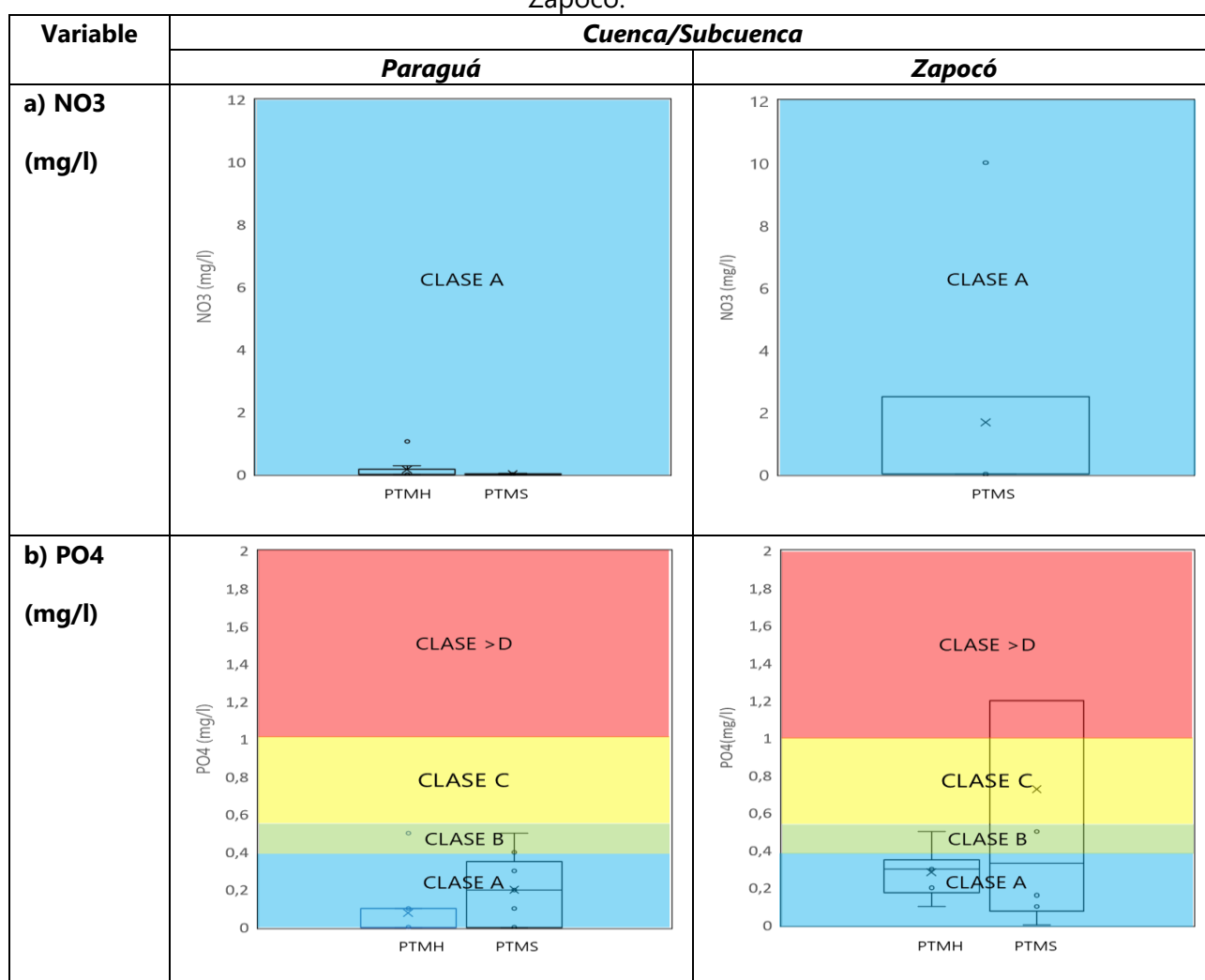


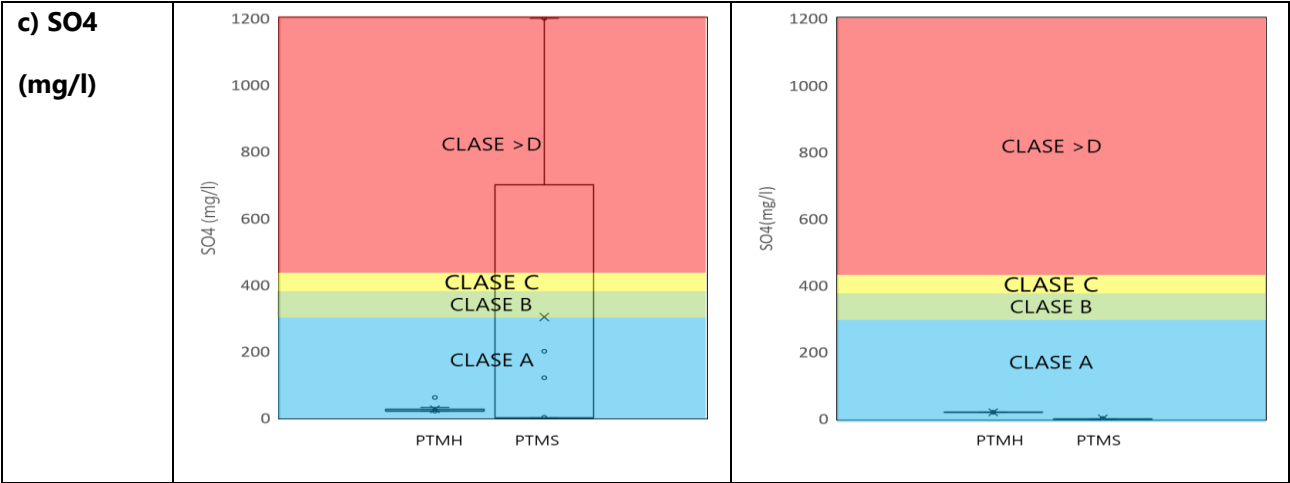
Fuente: Elaboración propia.

- Los nitratos (Figura 43 a) en todos los casos y periodos de monitoreo están dentro de la categoría "A". Para Zapocó, se tuvieron los valores más altos registrados, si bien esto no alcanza a una categoría de mala calidad, los valores altos sugieren alguna perturbación, posiblemente derivada de ingresos de aguas servidas. En el caso de la presa de Guapomó para el PTMH muestra los valores más altos, posiblemente por la remoción de aguas de este periodo.

- Los fosfatos (PO₄) (Figura 43b), para el PTMH alcanzan niveles de categoría "D", debido posiblemente al hecho de que las personas van a bañarse en la zona y dejan rastros de detergentes fosfatados.
- Los sulfatos (Figura 43 c) muestran un comportamiento bajo en general, y sólo para el PTMS en la represa de Guapomó se encontraron altos valores de esta variable, lo que coincide con el incremento de macrófitas en la película de agua, reteniendo el sedimento cargado de materia orgánica. Esto produce sulfuros, igualmente asociados a las bajas cantidades de oxígeno.

Figura 43. Variables no metálicas en represas de la cuenca Paraguá y subcuenca Zapocó.

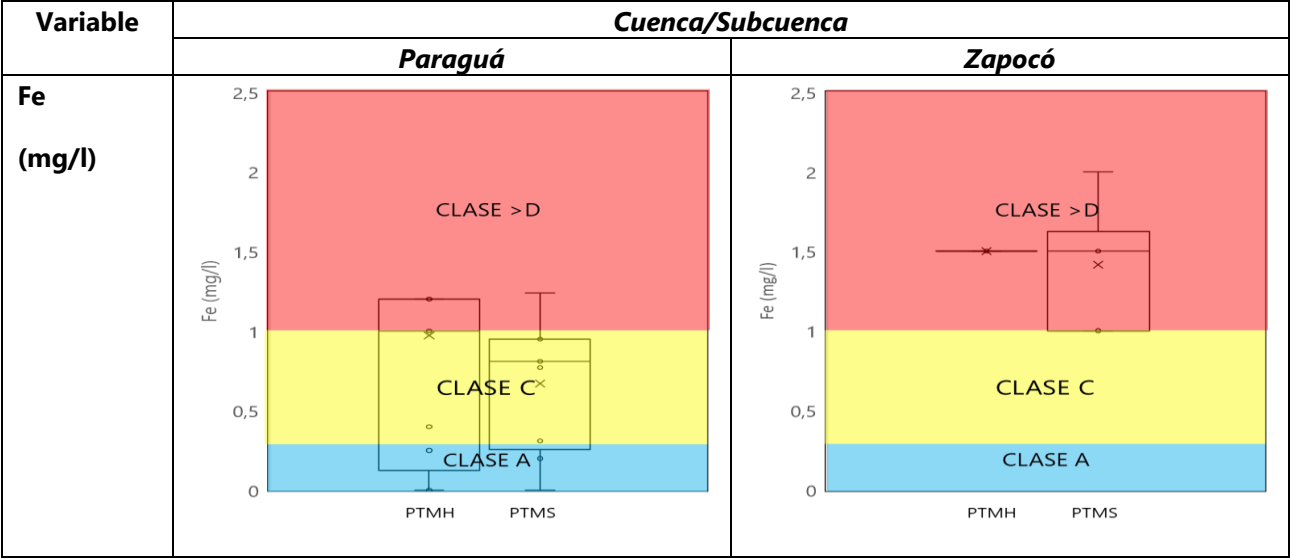




Fuente: Elaboración propia.

- En el caso del hierro (Fe) (Figura 44), los valores para la represa de Guapomó en el PTMH sobrepasan y llegan a la categoría "D". En el caso de Zapocó, en todos los casos y periodos de monitoreo llegan a una categoría "D". Posiblemente este comportamiento está asociado con ingreso de partículas de tierra con alto contenido de este metal, lo que se debe a la deforestación de la zona mientras que las otras represas, en especial San Juancito tiene valores bajos de este parámetro.

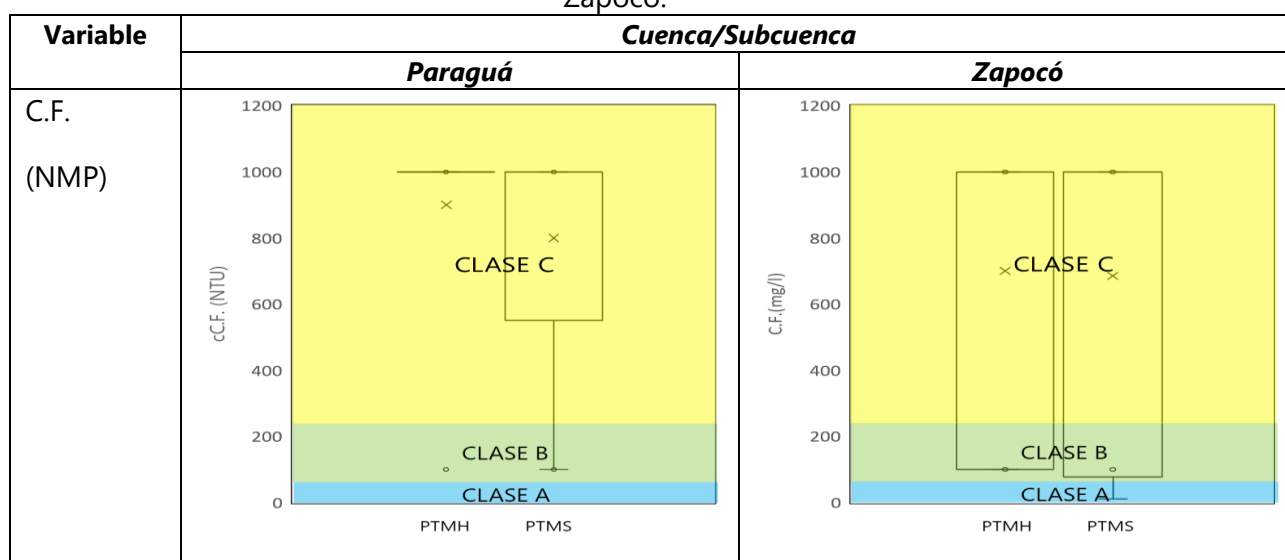
Figura 44. Variables metálicas en represas del Paraguará y Zapocó.



Fuente: Elaboración propia.

- En la Figura 45 se observa el comportamiento de coliformes fecales en el agua, las altas cantidades de las bacterias se deben a un ingreso de residuos ganaderos a diferentes áreas de las represas. El hecho de que en algunas zonas como las de San Juancito se registraron bajos valores de bacterias, sugieren que la cantidad de bacterias fecales tiene fuentes contaminantes externas.

Figura 45. Descripción de las variables microbiológicas en represas en Paragará y Zapocó.



Fuente: Elaboración basada en la información del proyecto de Paisajes Resilientes en la Chiquitanía.

ii Calidad biológica

o Descripción general

La comunidad de macroinvertebrados acuáticos (MIA) registrada en las represas Guapomó, San Juancito y Zapocó en el periodo de transición más húmedo (PTMH) y periodo de transición más seco (PTMS), está compuesta por 72 familias diferentes, distribuidas en 29 órdenes, 13 clases y 6 phylum (Anexo2). El phylum más abundante fue Arthropoda con el 94.9%, seguido de Annelida con 2.6% y Mollusca con un 2.5%, en el PTMH. En el PTMS, la abundancia del phylum Arthropoda fue similar, con un leve aumento del phylum Annelida y una reducción del phylum Mollusca (Tabla 12).

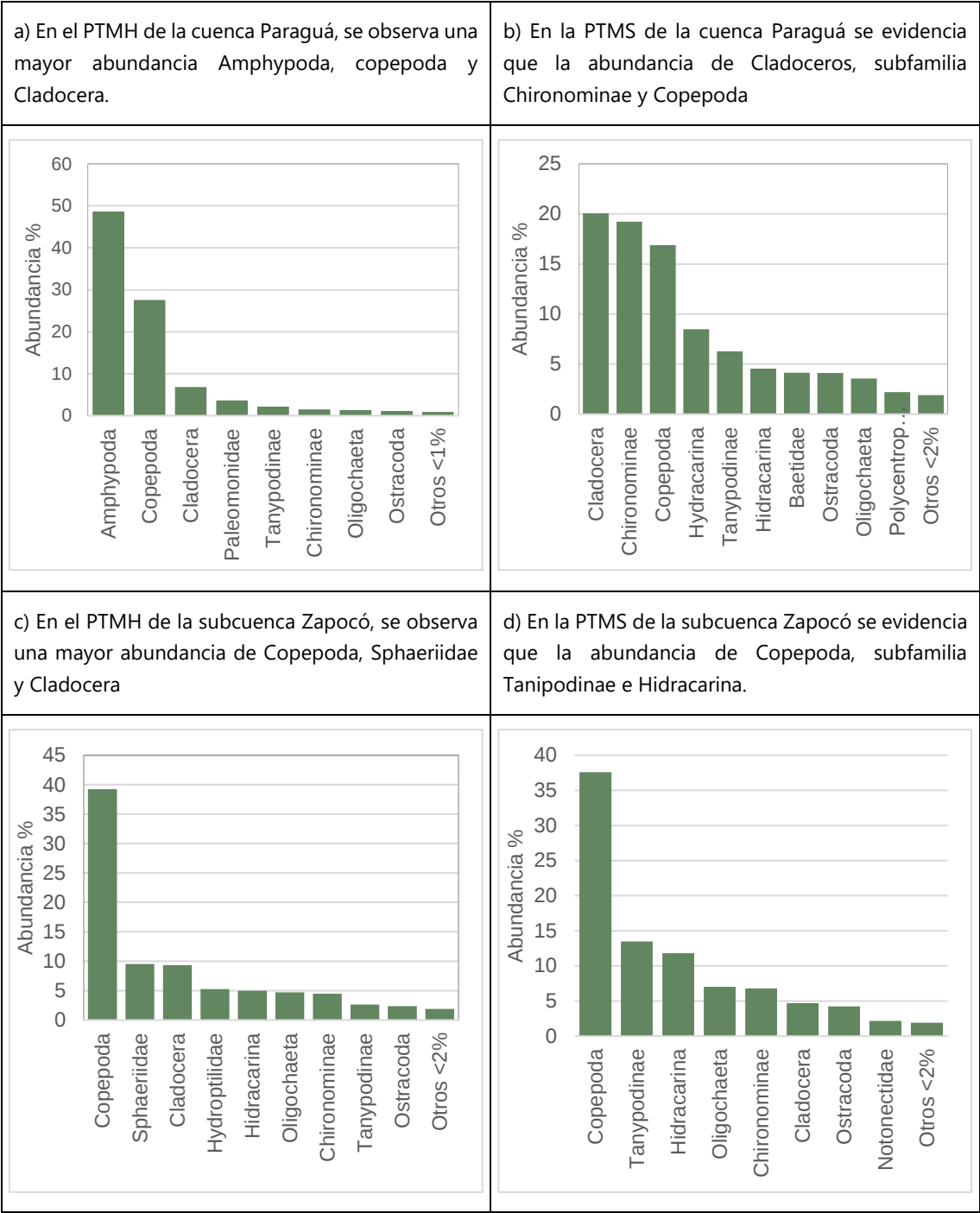
Tabla 12. Distribución porcentual de la abundancia los Phylum de macroinvertebrados acuáticos (MIA), registrados en a) PTMH y b) PTMS en las cuencas Paragará, San Martín y Subcuenca Zapocó.

Cuencas	Phylum	Abundancia (%) de MIA	
		PTMH	PTMS
Paragará	Annelida	1.97	2.97
	Arthropoda	89.67	65.35
	Cnidaria	0.00	0.06
	Mollusca	1.60	0.14
	Nematoda	0.00	0.01
	Platelminta	0.01	0.00
Zapoco	Annelida	0.61	2.37
	Arthropoda	5.22	28.52
	Cnidaria	0.00	0.03
	Mollusca	0.89	0.56
	Platelminta	0.03	0.00
Total		100	100

Fuente: Elaboración propia.

La mayor abundancia de familias y subfamilias de MIA en el PTMH y PTMS, fueron del orden Copepoda (Crustáceo). Resaltan por su abundancia en el PTMH el orden Amphypoda (Crustáceo) y Paleomonidae (Crustáceo). En PTMS fueron también abundantes la subfamilia Chironominae (Diptera) y Cladocera (Crustaceo) (Figura 46).

Figura 46. Familias y subfamilias de MIA con mayor abundancia en represas del Paraguá a) PTMH y b) PTMS y subcuenca Zapocó c) PTMH y d) PTMS.

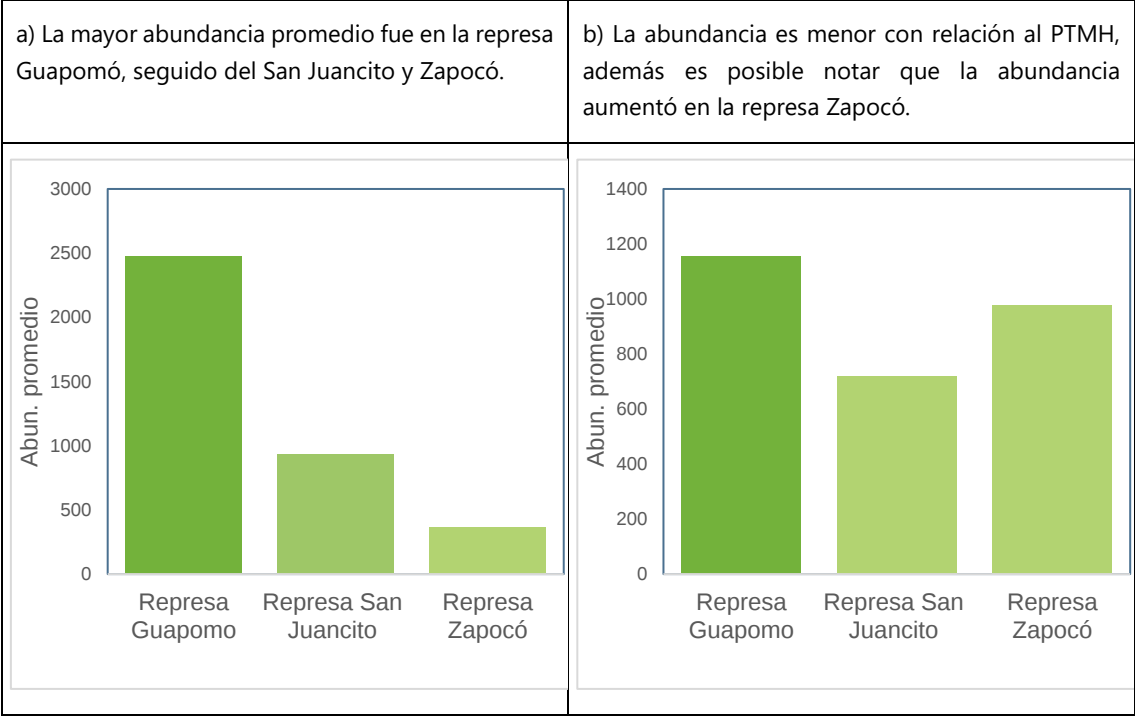


Fuente: Elaboración propia.

En ambos periodos de monitoreo la represa con mayor abundancia de MIA fue Guapomó (Cuenca Paraguá). Asimismo, en la represa Guapomó y en PTMS en Zapocó (Subcuenca

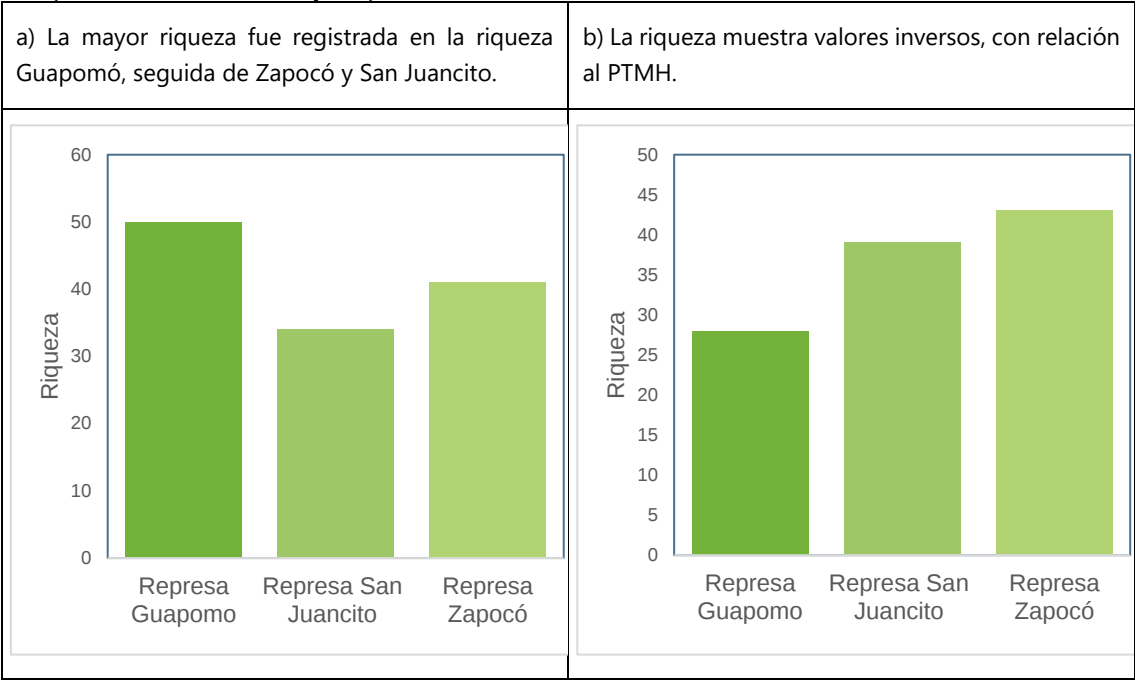
Zapocó) la riqueza fue mayor en PTMH (Figura 47) Respecto a la riqueza, se observan patrones diferentes, en Guapomó durante en el PTMH se registra la mayor cantidad de grupos taxonómicos, sin embargo, este patrón cambia en PTMS cuando es la represa de Zapocó, la que tiene mejor calidad de aguas (Figura 47).

Figura 47. Abundancia de familias y subfamilias de MIA en a) PTMH y b) PTMS en las represas Guapomó, San Juancito y Zapocó.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 48. Riqueza de familias y subfamilias de MIA en a) PTMH y b) PTMS las represa Guapomó, San Juancito y Zapocó.



Fuente: Elaboración propia.

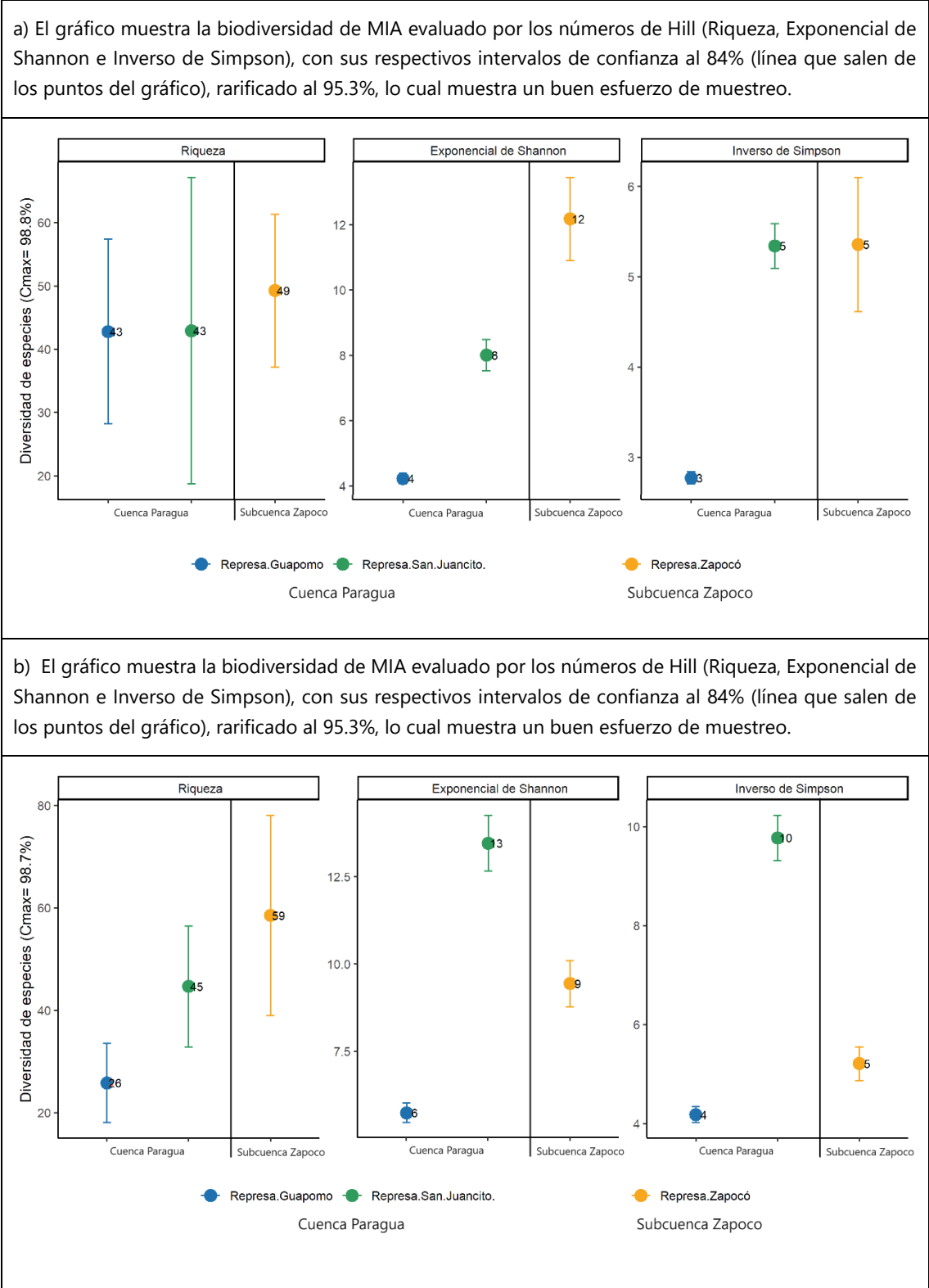
Los datos de abundancia y riqueza nos indican una mayor productividad en la represa Guapomó (Cuenca Paraguá), a excepción de la del PTMS, lo que nos permite indicar que es el cuerpo de agua con mayor productividad situación que puede estar relacionada al aumento de nutrientes en el agua, probablemente asociada a las actividades agrícolas en cuenca alta del río Paraguá.

○ **Variación temporal de la biodiversidad y calidad del agua (BMW-P-Bol)**

La diversidad evaluada por los números de Hills (Figuras 49 a y b), muestra que, para el PTMH, según la riqueza y los índices de exponencial de Shannon e inverso de Simpson, la represa con mayor biodiversidad es Zapocó (Subcuenca Zapocó), seguida de San Juancito y Guapomó (Cuenca Paraguá). En el PTMS, la situación cambió, registrando la mayor biodiversidad en la represa San Juancito, seguida de la represa Zapocó y Guapomó.

En el gráfico de la Figura 49 b), se muestran los intervalos de confianza (líneas por encima y debajo de los puntos) de los índices de biodiversidad (Números de Hill), lo que permite identificar que en PTMH la biodiversidad de las represas es similar entre San Juancito y Zapocó (Según el índice Inverso de Simpson); logrando diferenciarse de manera significativa ($p<0.84$), estos últimos con la represa Guapomó. En cambio, en el PTMS, según el índice de exponencial de Shannon e inverso de Simpson, la biodiversidad muestra diferencias significativas ($p<0.84$) entre las represas.

Figura 49. Variación y comparación significativa de la diversidad evaluada a través de los números de Hills, en a) PTMH y b) PTMS.



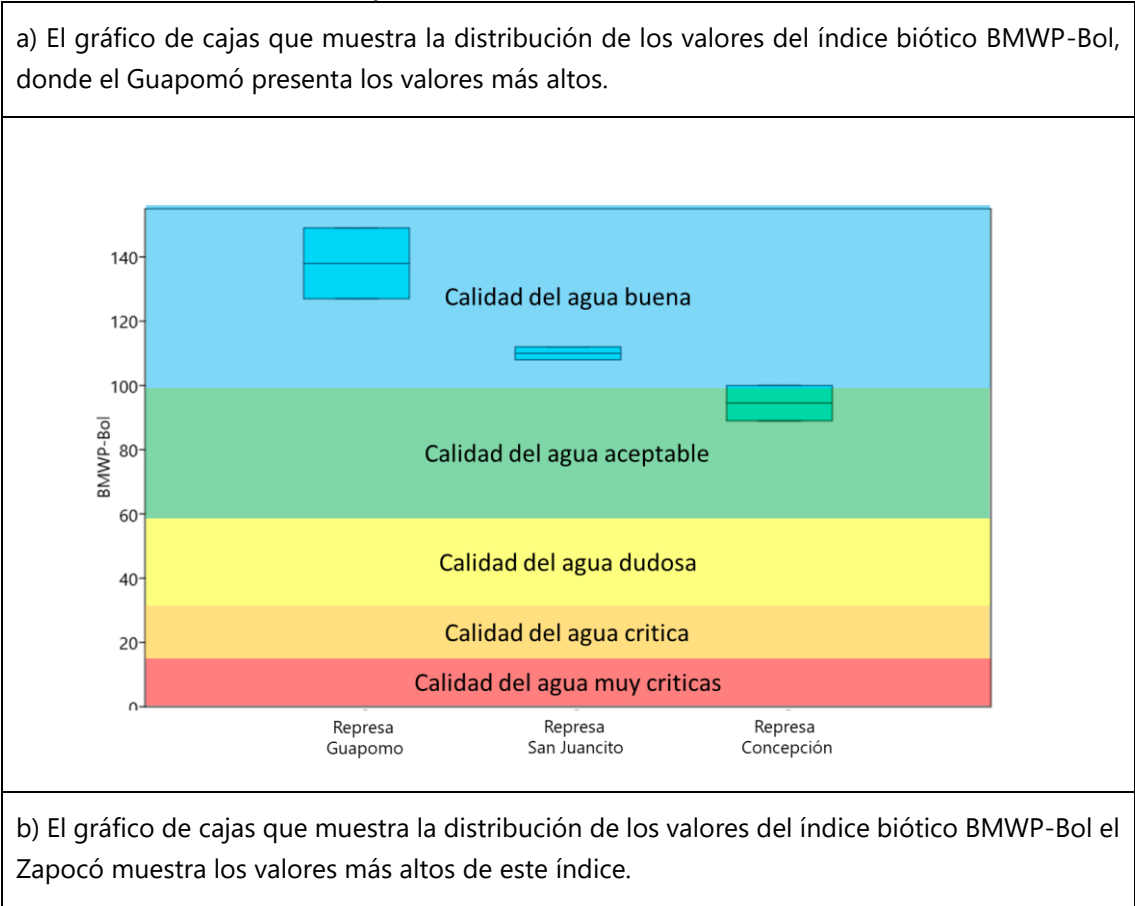
Fuente: Elaboración propia.

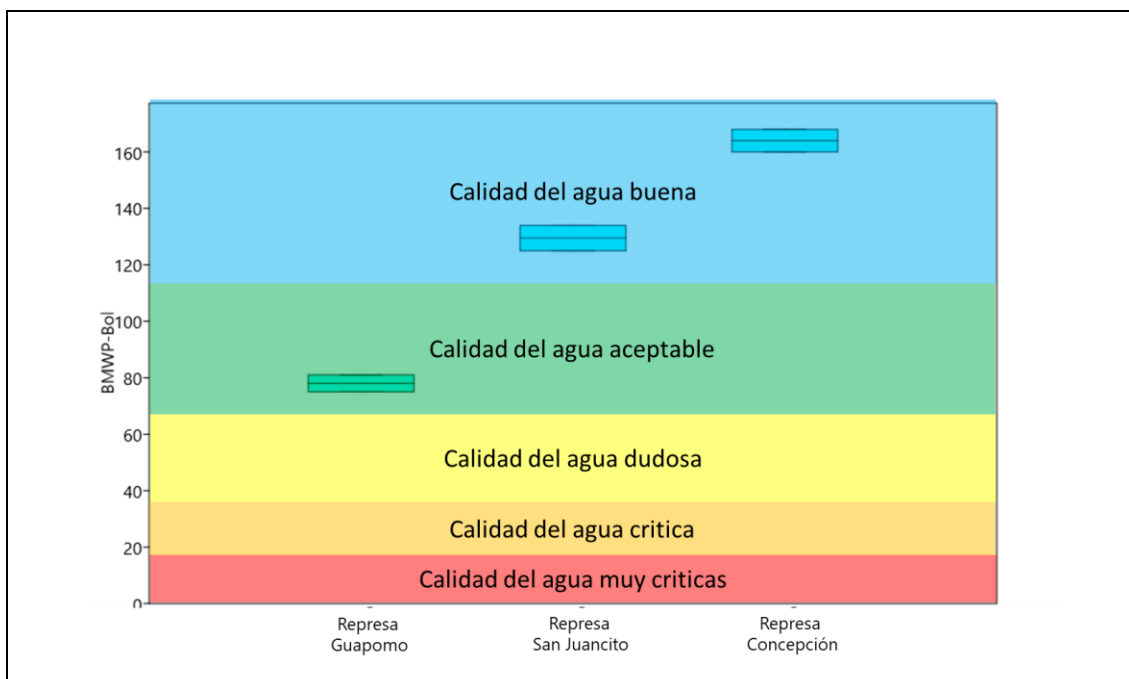
La baja biodiversidad registrada en la represa Guapomó (Cuenca Paraguá), podría estar asociada una mayor actividad antrópica y perdida de cobertura vegetal en la cuenca alta

aportante, así como también, la alta biodiversidad de la represa San Jacinto y Concepción, a un mayor estado de conservación de las cuencas aportantes.

En ambos periodos de monitoreo, la calidad del agua según el índice biótico BMWP-Bol, muestro calidades variables en todas las represas evaluadas, oscilando entre las Clases I y II. En el PTMH la represa Guapomó y San Juancito tiene una calidad del agua Clase II (calidad el agua aceptable, lo que denota algunos efectos de contaminación orgánica en el agua) en todos sus puntos. En el PTMS, la represa Concepción y San Juancito mejoran la calidad del agua a Clase I (Calidad del agua buena, con pocos efectos por la contaminación orgánica en el agua) y la represa Guapomó tiene una calidad de agua II (Calidad del agua aceptable; Figura 50).

Figura 50. Variaciones de la calidad del agua en los diferentes ríos evaluados a través del índice biótico BMWP-Bol, en a) PTMH y b) PTMS.





Fuente: Elaboración propia.

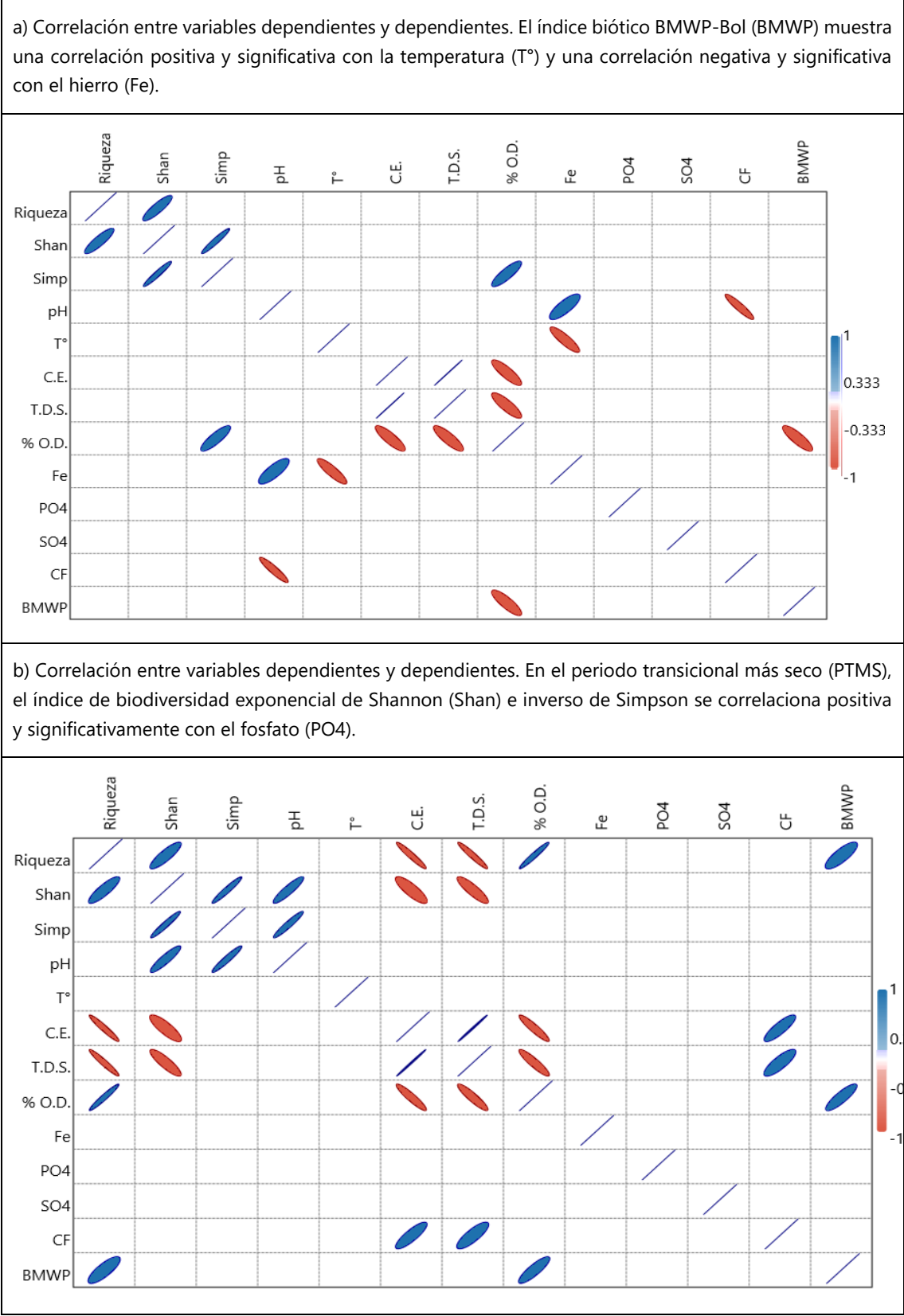
○ **Correlaciones de las variables dependientes (biológicas) e independientes (físicoquímica)**

Las correlaciones de Spearman realizadas para represas (Figura 51), entre variables dependientes (biológicas) e independientes (Físicoquímica) presentaron variaciones temporales. En el PTMH el índice biótico BMWP-Bol evidencio correlaciones negativas significativas, con el porcentaje de acumulación de oxígeno. El índice inverso de Simpson se correlacionó positiva y significativamente con el porcentaje de acumulación de oxígeno. En cambio, en el periodo transicional más seco (PTMS) se evidenciaron correlaciones positivas entre el exponencial de Shannon, inverso de Simpson con el porcentaje de acumulación de oxígeno y conductividad eléctrica (Figura 51).

También, es posible identificar que, la riqueza, el exponencial de Shannon e inverso de Simpson se correlacionan entre sí de manera positiva y significativa, en la mayoría de los periodos de monitoreo. Esto a su vez, no se correlaciona a ningún nivel ni significancia con el índice biótico BMWP-Bol.

Considerando la evidencia antes mencionada, es posible notar que los índices de diversidad exponencial de Shannon e Inverso de Simpson, a diferencia del índice biótico BMWP-Bol, presentan una mayor relación con variables ambiental asociadas a cambios en la calidad físicoquímica, las cuales pueden ser atribuibles a los vertidos de aguas residuales o actividades agropecuarias cuenca arriba de las represas.

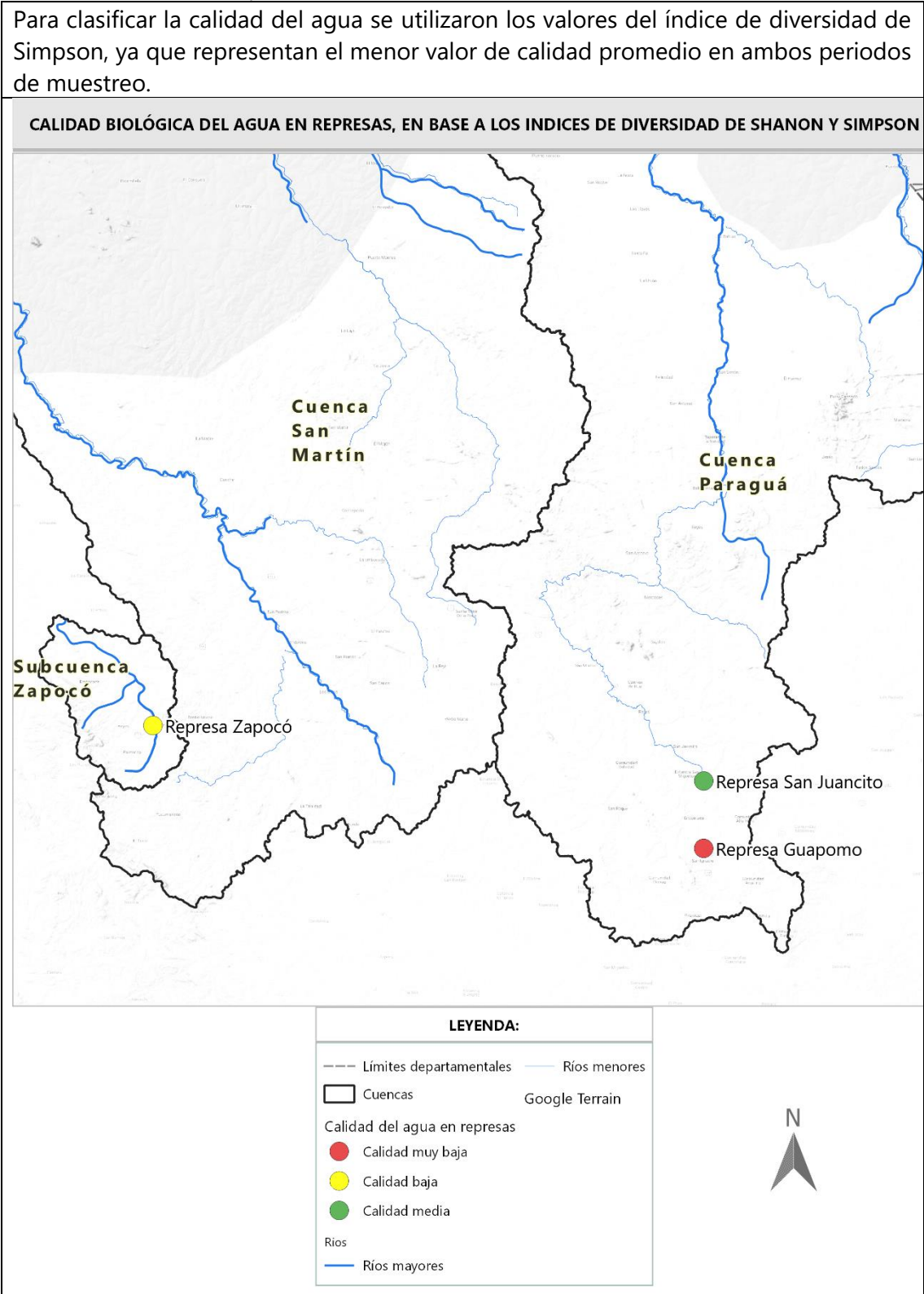
Figura 51. Matriz de correlaciones de Sperman. Las elipses de color azules muestran una correlación positiva y significativa; en cambio, las elipses de color rojo muestran una correlación negativa y significativa.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 52, se observa que la represa San Juancito (Cuenca Paraguá) presenta una regular calidad del agua, la represa Zapocó, presenta una baja calidad del agua y la represa Guapomó, evidencio una muy baja calidad el agua.

Figura 52. Clasificación de la calidad del agua de represas en función a al índice exponencial de Shannon e inverso de Simpson.



Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones en base a los resultados de las etapas de campo en los PTMH y PTMS dentro del proyecto de Paisajes Resilientes en la Chiquitania, deben ser tomados como una línea base, ya que los datos deben ser analizados al menos durante 5 años para definir con precisión el comportamiento en los niveles freáticos y de aguas superficiales; además, un monitoreo continuo muestra con exactitud el tipo de calidad de agua tanto para aguas subterráneas como superficiales.

6.1 CANTIDAD DE AGUA

6.1.1 Aguas subterráneas

- Los acuíferos en la zona de estudio están fuertemente limitados a la geología que es muy variable y funciona como límites naturales de los acuíferos, por otro lado, las rocas del escudo brasileiro están a una profundidad baja. Por este motivo, la mayoría de los pozos no tienen profundidades mayores a 80 m, por lo que se deduce que los acuíferos monitoreados no son extensos, son someros y localizados. Sin embargo, no existen estudios hidrogeológicos específicos para definir con más precisión los acuíferos.
- Como resultado del análisis de las variaciones del nivel estático de los pozos monitoreados en las cuencas de estudio se ha planteado como hipótesis que la época de recarga en los acuíferos de la cuenca varía y están más relacionadas con su ubicación geográfica que a con los periodos de lluvia, debido a:
 - La variación temporal de los niveles estáticos no muestra patrones o tendencias claras, un número similar de pozos experimentaron incrementos y descensos del nivel estático durante el periodo de PTMH a PTMS.
 - En cuanto a la variación espacial de los niveles estáticos, en general los pozos ubicados en las partes altas de las cuencas y/o en las divisiones entre cuencas incrementaron en el nivel estático, lo que significa que hubo recarga del acuífero. En contraste, los pozos situados en las zonas medias o bajas de la cuenca, más alejados de la divisoria, registraron un descenso en el nivel estático.
- La producción de agua estimada en los pozos de monitoreo no presenta patrones espaciales reconocibles. Esto puede deberse a la geología variable de la zona de estudio, que determina los tipos de acuíferos existentes en la zona. Se han inferido dos tipos de acuíferos: (1) Acuíferos de sedimentos consolidados (laterita) con baja a media producción de agua (1500 a 4000 lt/hr) y (2) Acuíferos en medio fracturado o fisurado, que se desarrollan en la roca madre y tienen producción relativamente alta (> 4000 l/hr).

- La red de monitoreo propuesta permitirá el monitoreo sistemático de los niveles estáticos, sus variaciones y la producción de agua en la zona, lo que permite mejorar el conocimiento hidrogeológico de la zona, mediante la confirmación, complementación o replantear las inferencias o hipótesis señaladas en el presente documento.
- Los periodos monitoreo deben ajustarse a medida que la red genere información suficiente para identificar los periodos de monitoreo donde los niveles estáticos sean los más elevados y existan los mayores descensos de nivel, para estimar la recarga de los acuíferos y determinar su comportamiento, de ese modo es posible evaluar cambios atípicos e identificar riesgos en la producción de agua.
- Se recomienda realizar ensayos de bombeo para determinar la producción de los pozos y las características hidráulicas de los substratos, aportando con ello información valiosa para el conocimiento sobre la situación hidrogeológica.
- Se ha evidenciado que la mayoría de los pozos monitoreados tienen riesgo de contaminación principalmente por el fácil acceso a los mismos y las actividades humanas cercanas (< 50 m del pozo) que son potencialmente contaminantes. Se debe implementar o mejorar la protección de boca de pozo controlando el acceso a los pozos, evitando la existencia de actividades humanas cercanos a los pozos y mejorando las condiciones de la boca y base del pozo.
- Las comunidades juegan un rol importante y activo en la protección, control, desarrollo, manejo y planificación del agua subterránea sobre todo en las medidas preventivas como: el cercado de los pozos y tableros electrónicos, la limpieza continua de los alrededores de las pozas, evitar el ingreso de animales y el crecimiento de hierba en los alrededores de los pozos.

6.1.2 Aguas superficiales

- En general, la variación temporal y espacial de los niveles de agua superficial en los ríos monitoreados en las cuencas de estudio, es bastante consistente a las épocas de medición, es decir, que se espera que los niveles descendan debido a que el monitoreo en la época seca se considera más seco que el monitoreo en la época húmeda.
- Se estimó el volumen de agua en la presa Guapomó gracias al monitoreo de niveles de agua y la curva altura volumen de agua obtenida en base a información secundaria. Los volúmenes de agua fueron:
 - Para PTMH, con altura del nivel de agua desde el vertedero de 2.48 m, se tiene un volumen de agua estimado de 2.6 millones de m³
 - Para PTMS, con altura del nivel de agua desde el vertedero de 0.03 m se tiene un volumen de agua estimado de 7.3 millones de m³

Por lo que en el tiempo del monitoreo PTMH, el volumen de agua actual llega a sus niveles mínimos y posiblemente deje de ser la principal fuente de agua para San Ignacio de Velasco.

- Es importante evaluar la influencia del consumo humano y de las actividades agropecuarias ubicadas en la cuenca de aporte de las represas en su capacidad de almacenamiento, con el fin de llevar a cabo una planificación sostenible del recurso hídrico almacenado.
- Los caudales medidos en los puntos de monitoreo son consistentes con la red hidrológica de las cuencas Paraguá y San Martín. Esto significa que los caudales se incrementan a medida que los cursos de agua fluyen hacia la parte baja de las cuencas, esto se debe a que las áreas de aporte también se incrementan hacia las zonas bajas de las cuencas.
- El monitoreo sistemático de los niveles de agua en los ríos y presas, sus variaciones y los caudales en los ríos permite determinar variables hidrológicas como: curvas de gasto, estimación de flujos base, elaborar y calibrar modelos de precipitación y escurrimiento, determinar la producción de agua en las cuencas, entre otras aplicaciones hidrológicas. Esta información es muy valiosa para la planificación y manejo de los recursos hídricos en la zona.
- Se recomienda a las empresas prestadoras de servicios EPSAS realizar campañas periódicas de monitoreo y registro de los niveles.

6.2 CALIDAD DE AGUAS

6.2.1 Aguas subterráneas

- En los puntos de muestreos de agua subterránea evaluados en los PTMH y PTMS, la calidad varía de mala a crítica, esto se asocia a problemas relacionados al sistema de distribución y almacenamiento del agua, esto puede verificarse en la existencia de coliformes fecales en los tanques de almacenamiento y no así en boca de pozo.
- En el caso del pH, los valores reportados por PROASU, son similares a las encontradas en este trabajo y otros trabajos en aguas subterráneas que no superan los 80 m (Gonzales *et al.*, 2019), es decir la acidez de las aguas se debe aparentemente al poco tiempo de permanencia que las aguas en el substrato y no a una fuente de influencia minera tal como reportan otros trabajos en aguas subterráneas.
- Así también, en ambos periodos de muestreo, se consultó a la población si existían problemas de huesos y dientes y no hubo reporte al respecto. Por ello se deduce, que el pH corresponde a la línea base natural. Sin embargo, esta

afirmación es sólo una aproximación inicial que debe ser monitoreada al menos 5 años para tener la certeza sobre este dato.

- En el caso del hierro, este podría deberse al proceso de oxidación de las tuberías del sistema de distribución y en el caso de las norias se debe al ingreso de partículas de polvo hacia el agua, que es más frecuente en el PTMH. La presencia de este metal, sin embargo, fue mínimo para el PTMS, por lo que por el momento no se observa alteración antrópica en zonas cercanas a los pozos.
- A lo largo de la cuencas analizadas los valores de fosfatos alcanzan la clase "C" (dudosa) y ">D" (crítica) en la mayor parte de los pozos evaluados, lo cual podría estar relacionado a la actividad pecuaria de las cuencas y el uso de fertilizantes fosforados, además la baja profundidad en los pozos posibilitaría el ingreso de estos elementos, por lo cual además del monitoreo constante de esta variable, es necesario realizar pruebas isotópicas para identificar con precisión las fuentes de este compuesto.
- Es posible que la presencia elevada de fosfatos permita la proliferación de algas en los tanques de almacenamiento de agua y causan mal sabor y olor en el agua.
- Para el PTMH, la presencia de nitratos, fosfatos y coliformes fecales se detectaron con valores más elevados en norias y tanques; en este último caso, indica la falta de mantenimiento y limpieza en los tanques. En el caso del PTMS, estos datos en general disminuyeron.
- Los nitratos en algunos pozos de las comunidades de Campamento (cuenca Paraguá) y San Martín (cuenca del mismo nombre) tienen relativamente elevadas concentraciones de nitrógeno (> 10). Ambas comunidades están ubicadas muy cerca de humedales permanentes, y posiblemente ingresó agua del humedal por presión transversal, esto también se reflejó en los niveles de agua que estuvieron muy cercanos a la superficie. La permanencia de humedales en la zona garantiza que tengan agua de buena calidad durante todo el año.

6.2.2 Aguas superficiales

A Calidad fisicoquímica

- En ríos, para ambos periodos de monitoreo, no se pudieron identificar sitios de control o referencia con excelente calidad de agua, ya que en todos los casos se tiene al menos una variable que alcanza los valores de calidad de aguas contaminadas, por lo cual por el momento se tienen ríos con contaminación intermedia a lo largo de las cuencas estudiadas. Además, se encontró que:
 - El hierro fue el parámetro causante de que la mayor parte de los puntos entren en una calidad de aguas crítica o muy crítica (Clase D o mayor que

- "D"), este es un fenómeno natural que podría estar relacionado a condiciones de arrastre de la ribera.
- El oxígeno disuelto entra en las clases entre "C" y "D", esto podría estar relacionado a las altas temperatura del agua, pero también está relacionado a la cantidad de nutrientes en las aguas, como nitratos y fosfatos.
 - En ríos con baja velocidad y pendiente las tasas de depuración son menores, por lo tanto, pequeñas proporciones de nutrientes podrían causar eutrofización, sin embargo, el cuidado y protección de las riberas evitaría el ingreso de contaminantes al cauce del río.
 - En el caso de la turbidez está dentro de la clase "A", esto refleja el patrón de ríos de aguas negras donde las aguas cuentan con gran cantidad de materia orgánica que les da un color café oscuro, pero que no tienen partículas en suspensión como arcillas.
- En el caso de las presas se encontró que la zona de San Juancito tiene la menor alteración antrópica, lo cual muestra que la baja perturbación de la zona permite que las aguas permanezcan en una clase de agua con mínima contaminación, incluso en el parámetro de coliformes fecales.
 - La presa de Guapomó muestra la mayor alteración antrópica, en especial para las variables de oxígeno disuelto, a la vez esto se reflejó en las altas concentraciones de sulfatos que son el principio de la eutrofización de las aguas. A futuro este compuesto podría cambiar a sulfuros y causar la mortandad de animales acuáticos. Además, esto fue corroborado por el incremento masivo de macrófitas que tapizaron las aguas para el PTMS.
 - Dentro del sistema Guapomó se requiere una evaluación adicional de los tanques de almacenamiento de COOSIV Ltda. San Ignacio de Velasco cuenta con un sistema sofisticado de purificación de aguas, aun así, se percibe el olor de agua estancada, esto indica que el problema del sistema involucra la falta de mantenimiento en el tanque de agua. Además, el personal de la empresa menciona que la planta de purificación necesita una mejora en los filtros para retener las arcillas y algas en el agua, ya que la empresa capta el agua de la parte baja de la columna de agua, en esta zona el agua tiene alta cantidad de arcillas y materia orgánica en descomposición, tal como se esperaría de un fondo lacustre.
 - En el caso de la represa Zapocó, sólo el hierro muestra alteración en las aguas, esto posiblemente sea consecuencia del punto de la toma de muestras, ya que fue muy cercano a los ductos de transporte de agua, que están hechos de hierro.

B Calidad biológica

- Los números de Hill, específicamente valor del exponencial de Shannon (q_1) y del inverso de Simpson (q_2), sirvieron de herramienta para describir la biodiversidad de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos (MIA), ambos índices fueron capaces de diferenciar impactos sobre los ecosistemas acuáticos superficiales en las cuencas San Martín, Paraguá y Zapocó, en épocas húmeda y seca.
- Si bien el índice biótico BMWP-Bol es una herramienta ampliamente utilizada en nuestro país, se evidenció que no es lo suficientemente sensible para clasificar la calidad biológica de las aguas superficiales en las cuencas San Martín, Paraguá y Zapocó.
- En base a los resultados con los números de Hill, se logró evidenciar qué cuerpos de agua requieren acciones de manejo, dado que presenta los menores valores de biodiversidad. Estos fueron: la represa Guapomó de COOSIV Ltda (Cuenca Paraguá), río San Silvestre (Cuenca San Martín) y el río Tarvo (Cuenca Paraguá).
- La comunidad de macroinvertebrados acuáticos (MIA) evidencia asociaciones ligadas a las características de los ecosistemas acuáticos corrientes y lénticos, así como también con variables ambientales, como el fósforo (sólo en ríos), conductividad y oxígeno (para represas).
- De manera preliminar los grupos taxonómicos: Ephemeroptera, Odonata y Hemiptera, son indicadores de buena calidad de agua, aunque es necesario realizar una mayor cantidad de muestreos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- (AAPs), A. de F. y C. S. de A. P. y S. B. (2021). Indicadores de desempeño de las EPSA reguladas categorías A,B,C y D. In *Analysis*.
- Angeles Torres, L. B. (2021). "CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO Y SU RELACIÓN CON LA ENFERMEDAD DIARREICA AGUDA DE LA POBLACIÓN INFANTIL DE CERRO DE PASCO – PERÚ 2019" (Vol. 1) [UNIVERSIDAD DE HUANUCO ESCUELA].
- Ayuda en Acción, (2020). "Diagnóstico: sistemas de acceso y gestión del agua, en comunidades indígenas de Beni- Bolivia".
- Beck, S., Meneses, R., Moya, I., Jimenez, I., Cuba, E., & Palabral, A. (2022). *INFORME FINAL BIODIVERSIDAD DE LAS CUENCAS Paraguá*.
- Chao, A., and L. Jost. 2012. Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology* 93:2533–2547.
- FCBC, F. para la conservación de B. C. (2014). *Elaboración Plan de Manejo de la Reserva Municipal del Patrimonio Natural y Cultural del Copaibo de Concepción AXINA KOPAIBO AIBURU TYOPIKI NENAXINA SIBORIKIX AUNA POSOPATAX CONCEPCION CONTRATANTE: GOBIERNO AUTÓNOMO DEPARTAMENTAL DE SANTA CRUZ SECRETARIA*.
- GAM, S. I. (2011). Plan de Desarrollo Municipal de San Ignacio de Velasco. In *Gobierno Autónomo de San Ignacio de Velasco* (Issue clic).
- Gonzales R. K., Flores A, & Ayala O. (2021) Monitoreo de la calidad de aguas de las Serranías de Paramarani y Altuncama, Asociación para la Conservación de Ecosistemas Altoandino-Amazónicos.
- Gotelli, N. J., & Colwell, R. K. (2001). Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology letters*, 4(4), 379-391.
- Ibisch, P. L., & Mérida, G. (2003). *Biodiversidad: la riqueza de Bolivia: estado de conocimiento y conservación*. Editorial FAN.
- Jost, L. 2006. Entropy and diversity. *Oikos* 113:363–375.
- Mautner, M., & Escobar, M. (2022). Abastecimiento de agua rural en Chiquitania. In *Stockholm Environment Institute*.
- McCafferty, W. P. (1981). *Aquatic Entomology: The Fishermen's and Ecologist's Illustrated Guide to Insects and Their Relatives* (M. SBI: Boston (ed.); 1st ed.).
- Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M&T-Manuales y Tesis SEA (Primera Ed).
- Ortiz, R., Salazar, I., Guerra, A., & Saucedo, R. (2012). *Plan de Manejo Integral de Cuencas Provincia Velasco*.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D. & Wagner, H. (2020). Vegan community ecology package version 2.5-7 November 2020. R Project for Statistical Computing: Vienna, Austria.
- PROAGRO. (2010). Inventario Nacional de Presas Bolivia 2010. In *Programa de Desarrollo*

Agropecuario Sustentable, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.

- RCoreTeam. (2021). R: A language and environment for statistical computing (4.1.0). R Foundation for Statistical Computing.
- RAISG. (2021). *Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada*. Datos Cartografiados. <https://www.raisg.org/es/mapas/#descargas>
- Riss, W., Ospina, R., & Gutiérrez, J. D. (2002). Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la sabana de Bogotá. *Caldasia*, 1(24), 135–156.
- Rocabado, G., & Goitia, E. (2011). Guía para Evaluar la Calidad Acuática Mediante el Índice BMWP/Bol. In MMAyA (Ed.), *Ministerio de Medio Ambiente y Agua MMAYA*.
- Roldán, G. P. (1996). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia.
- Rust, B. (1977). A Classification of Alluvial Channel Systems. *CSPG Special Publications*, 187–198.
- SDSyMA. (2011). *Delimitación y Codificación Unidades Hidrográficas Dpto.Santa Cruz* (Preliminar).
- Van der Weijst, J. (2014). *La Capacidad de Abastecimiento de la Represa Guapomó, una mirada amplia a la actualidad y el futuro del agua potable de la ciudad de San Ignacio de Velasco*.

