



INFORME ANUAL DE CALIDAD AMBIENTAL PARA LA MATRIZ AGUA 2022

Contratación de vinculación externa entre la Universidad Nacional
y la Municipalidad de Belén para el establecimiento del Programa
de Observatorio Ambiental en el cantón de Belén

Elaborado para la Municipalidad de Belén



Elaborado por:

Laboratorio de Análisis Ambiental
Escuela de Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Setiembre, 2023

Heredia, Costa Rica

Índice General

Índice General	1
Índice de Figuras	2
Índice de Cuadros	5
Presentación	6
1. Introducción	8
2. Marco Teórico	12
2.1. Contaminación de cuerpos de agua	13
2.2. Índices de calidad del agua (ICA)	13
3. Metodología	16
3.1. Ubicación de los sitios de muestreo	17
3.2. Frecuencia de muestreo	18
3.3. Muestreo de aguas superficiales	19
3.4. Análisis de muestras de aguas superficiales	20
4. Resultados	24
4.1. Análisis de tendencias de los principales parámetros para el río Quebrada Seca	29
4.2. Análisis de tendencias de los principales parámetros para el río Segundo	40
4.3. Análisis de tendencias de los principales parámetros para el Río Bermúdez	50
4.4. Metodología del Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Fisicoquímica del Agua	59
5. Conclusiones y recomendaciones	67
5.1. Conclusiones	68
5.2. Recomendaciones	69
6. Bibliografía	71

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de cuerpos de agua superficiales en el cantón de Belén, 2022.....	18
Figura 2. Valores promedio mensuales de pH, turbiedad, DBO, SST, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	29
Figura 3. Valores promedio mensuales de amonio, nitrito y aluminio en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	30
Figura 4. Valores promedio mensuales de temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato y % de saturación en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.....	30
Figura 5. Valores promedio mensuales de SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	31
Figura 6. Valores promedio mensuales de calcio, cobre, potasio y plomo en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	31
Figura 7. Valores promedio mensuales de manganeso, sodio y zinc en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	32
Figura 8. Valores promedio mensuales de fósforo total, cromo y níquel en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	32
Figura 9. Valores promedio anuales por sitio para pH, turbiedad, DBO, SST, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	34
Figura 10. Valores promedio anuales por sitio para amonio, nitrito y aluminio en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	34
Figura 11. Valores promedio anuales por sitio para temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato y porcentaje de saturación en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	35
Figura 12. Valores promedio anuales por sitio para SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	35
Figura 13. Valores promedio anuales por sitio para calcio, cobre, potasio y plomo en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	36
Figura 14. Valores promedio anuales por sitio para manganeso, sodio y zinc en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	36
Figura 15. Valores promedio anuales por sitio para fósforo total, cromo y níquel en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	37
Figura 16. Valores promedio mensuales de pH, turbiedad, DBO, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.....	40
Figura 17. Valores promedio mensuales de amonio, nitrito y aluminio en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	41
Figura 18. Valores promedio mensuales de temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	41
Figura 19. Valores promedio mensuales de SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	42
Figura 20. Valores promedio mensuales de calcio, cobre, potasio y plomo en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	42

Figura 21. Valores promedio mensuales de manganeso, sodio y zinc en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	43
Figura 22. Valores promedio mensuales de fósforo total, cromo y níquel en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	43
Figura 23. Valores promedio anuales por sitio para pH, turbiedad, DBO, SST, Oxígeno Disuelto e hidrocarburos en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	45
Figura 24. Valores promedio anuales por sitio para amonio, nitrito y aluminio en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	45
Figura 25. Valores promedio anuales por sitio para temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	46
Figura 26. Valores promedio anuales por sitio para SS, SAAM, Cadmio y Arsénico en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	46
Figura 27. Valores promedio anuales por sitio para calcio, cobre, potasio y plomo en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	47
Figura 28. Valores promedio anuales por sitio para manganeso, sodio y zinc en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	47
Figura 29. Valores promedio anuales por sitio para fósforo total, cromo y níquel en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	48
Figura 30. Valores promedio mensuales de pH, DBO, SST, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	50
Figura 31. Valores promedio mensuales de amonio, nitrito y aluminio en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	51
Figura 32. Valores promedio mensuales de temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación y turbiedad en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	51
Figura 33. Valores promedio mensuales de SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	52
Figura 34. Valores promedio mensuales de calcio, cobre, potasio y plomo en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	52
Figura 35. Valores promedio mensuales de manganeso, sodio y zinc en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	53
Figura 36. Valores promedio mensuales de fósforo total, cromo y níquel en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	53
Figura 37. Valores promedio anuales por sitio para pH, DBO, SST, oxígeno disuelto, turbiedad e hidrocarburos en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	54
Figura 38. Valores promedio anuales por sitio para amonio, nitrito y aluminio en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	54
Figura 39. Valores promedio anuales por sitio para temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	55
Figura 40. Valores promedio anuales por sitio para SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	55
Figura 41. Valores promedio anuales por sitio para calcio, cobre, potasio y plomo en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	56

Figura 42. Valores promedio anuales por sitio para manganeso, sodio y zinc en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	56
Figura 43. Valores promedio anuales por sitio para fósforo total, cromo y níquel en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.	57
Figura 44. Interpretación de la calidad del agua según el Sistema Holandés en la campaña de muestreo de marzo 2022 (época seca).	62
Figura 45. Interpretación de la calidad del agua según el Sistema Holandés en la campaña de muestreo de octubre 2022 (época lluviosa).	63
Figura 46. Porcentaje de sitios clasificados según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para cada campaña de muestreo en el río Quebrada Seca, 2022.	64
Figura 47. Cantidad de clasificaciones según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para las diferentes partes de la microcuenca en el río Quebrada Seca, 2022.	64
Figura 48. Porcentaje de sitios clasificados según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para cada campaña de muestreo en el río Segundo.	65
Figura 49. Cantidad de clasificaciones según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para las diferentes partes de la microcuenca en el río Segundo, 2022.	65
Figura 50. Porcentaje de sitios clasificados según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para cada campaña de muestreo en el río Bermúdez.	66
Figura 51. Cantidad de clasificaciones según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para las diferentes partes de la microcuenca en el río Bermúdez, 2022.	66

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Descripción y coordenadas de los sitios de muestreo del monitoreo de calidad de cuerpos de agua superficiales del cantón de Belén.	17
Cuadro 2 Fechas de los muestreos realizados en las diferentes microcuencas que atraviesan el cantón de Belén.....	18
Cuadro 3. Detalle de procedimientos de análisis de ensayo, incluyendo límites de detección, cuantificación y referencia del método de análisis.....	20
Cuadro 4. Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de las aguas de los cuerpos superficiales para las clases establecidas en el D.E. 33903-MINAE-S.	25
Cuadro 5. Valores promedio de los parámetros evaluados a lo largo de las cuencas del cantón de Belén en el año 2022.	27
Cuadro 6. Clasificación de los cuerpos de agua según el uso potencial y tratamiento que requiera de acuerdo con lo establecido en el D.E. 33903-MINAE-S.....	28
Cuadro 7. Comparación de resultados de los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida del cuerpo de agua al cantón de Belén en dos estaciones climáticas para el río Quebrada Seca, 2022.	39
Cuadro 8. Comparación de resultados de los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida del cuerpo de agua al cantón de Belén en dos estaciones climáticas para el río Segundo, 2022.....	49
Cuadro 9. Comparación de resultados de los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida del cuerpo de agua al cantón de Belén en dos estaciones climáticas para el río Segundo, 2022.....	58
Cuadro 10. Asignación de puntajes según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Fisicoquímica del Agua.....	59
Cuadro 11. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Fisicoquímica del Agua por codificación de colores.	59
Cuadro 12. Clasificación de los puntos muestreados según el Sistema Holandés.	61

Presentación

Ante las problemáticas que sufre el mundo como consecuencia del cambio climático y la acción humana sobre el ambiente y buscando mejorar la calidad de vida de los habitantes del cantón, la Municipalidad de Belén con el apoyo del Laboratorio de Análisis Ambiental cuenta con un Observatorio Ambiental desde el año 2007 que establece una serie de muestreos en cuerpos de agua superficiales y calidad del aire con el fin de contar con datos objetivos y científicos en diferentes puntos de interés del cantón para la adecuada toma de decisiones en esta materia.

De esta manera, en el marco del contrato 2021LA-000015-0002600001 sostenido entre la Municipalidad de Belén y el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) de la Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA) de la Universidad Nacional (UNA), se presenta el informe anual de calidad ambiental para la matriz agua 2022, donde se muestran los principales resultados y tendencias observadas en el monitoreo de la calidad de los cuerpos de agua superficiales que atraviesan el cantón, durante el año de análisis.

Para ello, se realizaron dos campañas de muestreo con el propósito de caracterizar dos épocas climáticas distintas (seca y lluviosa), donde se tomaron muestras simples de agua en diferentes partes de la microcuenca de los ríos Quebrada Seca, río Segundo y río Bermúdez de manera que se cuente con información de los ríos en su paso por el cantón a la entrada, parte media y salida de este. Las muestras fueron trasladadas en frío al Laboratorio de Análisis Ambiental, donde se llevaron a cabo los análisis de los parámetros requeridos para la obtención del Índice Holandés de Valoración de Calidad para los Cuerpos de Agua Superficiales, así como los parámetros complementarios.

De los resultados obtenidos en 2022 se concluye que el Río Bermúdez continúa siendo la cuenca más contaminada de los tres cuerpos de agua que atraviesan el cantón de Belén. En promedio el grado de contaminación es muy severo a lo largo de la cuenca durante la época seca mientras que para la época lluviosa la contaminación se reduce producto del aumento del caudal del río. Río Segundo es el cuerpo de agua menos contaminado seguido por Quebrada Seca; el primero presenta una contaminación de moderada a incipiente en época seca mientras que el segundo

presenta una contaminación moderada. Para la época lluviosa en estas dos cuencas la contaminación cambio su categoría a incipiente mejorando la calidad del agua significativamente.

Según las clasificaciones obtenidas para los cuerpos de agua en cuestión, con base en los parámetros complementarios, el uso que se puede hacer del recurso hídrico de acuerdo con lo establecido en el Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S es amplio pues la mayoría de las variables clasifican en tipo 1 o 2, aunque los parámetros asociados a la contaminación orgánica obtuvieron clasificaciones entre 3 y 5 que limitan significativamente su uso según el destino que se le vaya a dar al agua.

Finalmente se recomienda complementar el análisis con estudios del uso de suelo en las cercanías de las microcuencas con el objetivo de conocer las principales actividades económicas en los distintos sitios de monitoreo y cómo estas afectan las características de los vertidos que incrementan la carga contaminante de los cuerpos de agua.

Laboratorio de Análisis Ambiental

Escuela de Ciencias Ambientales

Universidad Nacional



1. Introducción

El mundo ha experimentado un crecimiento poblacional con tendencia exponencial en los últimos siglos que ha ocasionado un cambio importante en los hábitos de consumo, repercutiendo sobre la explotación de los recursos naturales y ocasionando problemas sociales, económicos y ambientales. Esta situación ha llevado el mundo a una crisis ambiental producto de los efectos de las actividades antropogénicas sobre los ecosistemas, los cuales no cuentan con la capacidad de regenerarse al mismo ritmo al que se extraen sus recursos, resultando en una degeneración o deterioro del medio (Perevochtchikova, 2009 & Mercado-Maldonado & Ruiz-González, 2006).

El crecimiento económico acelerado y la globalización han sido factores que han propiciado la aparición de problemáticas a nivel social y ambiental, tanto a escala mundial como regional y local (Vargas-Marcos, 2005). Por tales motivos, tanto entes internacionales como nacionales en diferentes partes del mundo han identificado que la única forma sensata de desarrollo desde todos los puntos de vista es a través del desarrollo sostenible, ya que, los modelos que se han ejecutado durante décadas han conllevado no solo la pérdida de especies, sino un impacto directo sobre la salud de las personas (UNEP, 2017).

La contaminación ambiental continúa siendo una gran problemática que tiende a agravarse más como resultado de los cambios en los patrones de consumo de la población. Los contaminantes, especialmente los productos químicos sintéticos, las emisiones antropogénicas y la generación de residuos sólidos están degradando la calidad del aire, del recurso hídrico y del suelo. Este deterioro va limitando cada día más la disponibilidad de recursos para las generaciones actuales y futuras (UNEP, 2017).

Según Foladori (2001, citado por Mercado-Maldonado y Ruiz-González, 2006) las principales problemáticas ambientales que han sido enlistadas por los organismos internacionales son: la deforestación de bosques, la contaminación del recurso hídrico, la contaminación de costas y mares, la sobreexplotación de mantos acuíferos, la erosión de suelos, la destrucción de la capa de ozono, el calentamiento global, entre otros.

En el caso particular del recurso hídrico, la problemática socio ambiental desprendida de la escasez de agua potable, producto de su contaminación, es crítica, pues afecta la salud de las personas y su capacidad para cubrir las necesidades básicas. Aunado a esto, la carencia de sistemas de

alcantarillado sanitario, infraestructura adecuada y en buen estado para el manejo de las aguas residuales y la falta de mecanismos de control para asegurar el tratamiento de dichas aguas se suma a la problemática que ocasionan el deterioro de la calidad de los cuerpos de agua y afecta la utilidad de dicho recurso ya sea para consumo humano, riego, u otros usos (Solano-Arce, 2011).

Los problemas derivados de la mala calidad del agua no solo afectan a los usos de esta, sino que también causan impactos en los ecosistemas acuáticos, debido a la capacidad del agua para transportar agentes contaminantes, los cuales interactúan con biota acuática y limitan el desarrollo de múltiples especies. De igual manera, agentes contaminantes de naturaleza biológica introducidos al medio acuático pueden ser transportados por el agua y ocasionar enfermedades en los consumidores (Nivelo-Nivelo, 2015 & Romeu-Álvarez et al., 2015).

Ante la problemática expuesta anteriormente, la única manera de saber con certeza si existen cambios en la calidad ambiental de las diferentes matrices, es mediante la medición de los contaminantes a través del monitoreo ambiental (CEPIS, OPS y OMS, 1999). Este se define como una serie de mediciones de variables físicas, químicas y biológicas diseñadas para responder preguntas con respecto a los cambios que han existido en el ambiente (Lovett et al., 2007).

El monitoreo ambiental no solo proporciona la información base para formular políticas ambientales, sino que un monitoreo constante permite evaluar los resultados de la implementación de estas políticas. Por lo tanto, los gobiernos requieren los Planes de Monitoreo Ambiental para el diseño e implementación de medidas que busquen la mejora de la calidad ambiental (Lovett et al., 2007).

La reducción de la contaminación es fundamental para proteger los ecosistemas de los que dependen los seres humanos y toda forma de vida del planeta (UNEP, 2017). La responsabilidad de impulsar el cambio en un frente tan amplio debe repartirse entre todas las naciones, involucrando los diferentes sectores y a la población en general (UNEP, 2017). Para ello se debe contar con un monitoreo sistemático que contribuya a tomar medidas urgentes para prevenir y proteger la calidad de los recursos naturales (Romeu-Álvarez, y otros, 2015).

Ante dicho panorama, la Municipalidad de Belén como ente gubernamental del cantón, busca monitorear la calidad de los cuerpos de agua y de calidad del aire a través del Observatorio

Ambiental establecido en conjunto con el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) de la Universidad Nacional (UNA). Tal alianza establece un sistema de monitoreo ambiental que permite cuantificar el grado de contaminación con el fin de obtener insumos para la formulación de estrategias de mitigación y remediación ambiental.



2. Marco Teórico

2.1. Contaminación de cuerpos de agua

El agua es un elemento esencial para la vida de todos los seres vivos del planeta y el acceso a este recurso es considerado un derecho humano fundamental (Gómez-Duarte, 2018). El recurso hídrico se considera como el más vulnerable de los recursos naturales, siendo este un factor limitante en la realización de las diferentes actividades antrópicas a nivel domiciliario, comercial e industrial (Sánchez-Herrera, 2005).

Según Rand (1995 citado por Orta-Arrazcaeta, 2002) el ambiente acuático es complejo, este incluye diferentes tipos de ecosistemas, entre ellos: corrientes de agua, ríos, lagos, estuarios, costas marinas y aguas profundas en los océanos. Todos ellos tienen diferentes componentes bióticos y abióticos con características únicas. En la actualidad, los cuerpos de agua superficiales presentan una alteración en su calidad debido a los vertidos de las actividades domésticas e industriales, que impactan directa o indirectamente en la salud humana y en aspectos socioeconómicos de las poblaciones adyacentes (Rodríguez-Miranda et al., 2016).

Según Gómez-Duarte (2018) los principales contaminantes del recurso hídrico son bacterias, virus, hongos, parásitos, sustancias químicas simples y complejas. Dentro de las sustancias químicas de mayor riesgo se encuentran: los metales pesados, sustancias radiactivas, plaguicidas, fertilizantes, los derivados del petróleo (hidrocarburos), residuos tóxicos industriales, jabones, drogas lícitas e ilícitas, entre otros. Aunado a lo anterior, según Fernández-Labrada et al. (2015) los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en los cuerpos de agua son proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites. La descomposición de estos compuestos se desarrolla mientras que en el medio exista materia orgánica y oxígeno disuelto, degradando de lo más simple a lo más complejo.

2.2 Índices de calidad del agua (ICA)

Según Damo (2013, citado por Rodríguez-Miranda et al, 2016) debido a la variedad de agentes contaminantes que afectan la calidad del recurso hídrico es que existen amplias dificultades en la planificación del uso de los cuerpos receptores en las cuencas hidrográficas debido a la limitada aplicabilidad de los Índices de Calidad del Agua (ICA) en la toma de decisiones.

Los ICA fueron propuestos por Horton en 1965, sin embargo, no fueron aceptados sino hasta la década de los setenta cuando adquirieron relevancia para la evaluación del recurso hídrico. En los siguientes años se propusieron diferentes métodos para el cálculo de un ICA, entre ellos, el elaborado por la Fundación de Saneamiento Nacional de los Estados Unidos (NSF, por sus siglas en inglés), Water Quality Index (WQI), Biological Monitoring Working Party Score (BMWP), entre otros (García-Quevedo, 2012).

El ICA es un número adimensional que atribuye un valor cualitativo a un conjunto de parámetros medidos y que fueron agregados matemáticamente. En otras palabras, es un número que expresa la calidad de un cuerpo de agua considerando una serie de factores, permitiendo una rápida interpretación y análisis de la tendencia a lo largo del espacio y el tiempo (García-Quevedo, 2012). No obstante, a pesar de ser una herramienta para la toma de decisiones de las autoridades ambientales, la información que suministran no es muy detallada, dado que no se pueden evaluar todos los riesgos o niveles de contaminación de agua (Torres, Hernán-Cruz, & Patiño, 2009).

De esta manera, al existir una variedad de modelos de evaluación de la calidad del agua diseñados por diferentes organismos, cada país adapta un ICA según las necesidades específicas. En Costa Rica, el Decreto Ejecutivo N° 33903-MINAE-S (2007) Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales establece dos metodologías oficiales: el Índice Biológico (BMWP-CR) y el Índice Holandés de Valoración de la Calidad para los Cuerpos de Agua Superficiales.

El BMWP-CR es un índice de calidad de agua adaptado para el país que consiste en la sumatoria de puntuaciones asignadas a partir de los diferentes taxones en muestras de macroinvertebrados, estas puntuaciones se establecen según el grado de sensibilidad a la contaminación que va de 1 a 9. A partir de los valores obtenidos, se clasifican las aguas en seis niveles de calidad para el recurso hídrico que va desde “aguas de calidad excelente” hasta “aguas de calidad muy mala extremadamente contaminadas” (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007).

Por otra parte, el Índice Holandés de Valoración de Calidad para los cuerpos de agua superficiales contempla una serie de parámetros físicos-químicos para la clasificación de un cuerpo receptor. De esta manera, este índice considera el porcentaje de saturación de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el nitrógeno amoniacal (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007).

El oxígeno disuelto (OD) es expresado por medio del porcentaje de saturación, el cual es un indicador que determina el grado de contaminación del cuerpo de agua. Generalmente un nivel alto de OD indica un mejor nivel de calidad, permitiendo un mejor grado de supervivencia de la flora y fauna; y un nivel bajo provoca que muchos organismos de fauna acuática no pueden sobrevivir por las condiciones en las que se presentan (Peña, 2007).

La DBO es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica bioquímicamente degradable, esta se define por la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos presentes en el agua para oxidar la materia orgánica (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007).

Asimismo, el nitrógeno amoniacal proviene de la degradación natural de la materia orgánica presente en el ambiente. De esta manera, determinar su valor es de alta importancia dado que el resultado obtenido permite verificar la eficiencia de las plantas de tratamiento que vierten sus aguas a los cuerpos de agua superficiales (González, 2016).

Aunado a lo anterior, se establecen parámetros físicos, químicos y biológicos de análisis complementarios, siendo estos: turbiedad, temperatura, potencial de hidrógeno (pH), nitratos, demanda química de oxígeno, cloruros, fluoruros, color, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno, arsénico, boro, cadmio, cianuro, cobre, cromo total, magnesio, mercurio, níquel, plomo, selenio, sulfatos, compuestos organoclorados, compuestos organofosforados y coliformes fecales (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007).

Por lo tanto, para determinar el grado de contaminación del cuerpo receptor, es necesario sumar los puntos correspondientes en los ámbitos de concentración para cada uno de los parámetros fisicoquímicos medidos. De esta manera, una vez determinado los valores, se traslada estos puntajes a una categoría de colores de acuerdo con el grado de contaminación, siendo la escala de 1 a 5, en donde 1 es “sin contaminación” y 5 “contaminación muy severa (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007).



3. Metodología

En esta sección se describen los aspectos relacionados con los sitios de muestreo de cada microcuenca, coordenadas de referencias geográficas, mapas de distribución de los puntos de muestreos, parámetros monitoreados en las campañas realizadas, técnicas de muestreo y métodos de análisis utilizados.

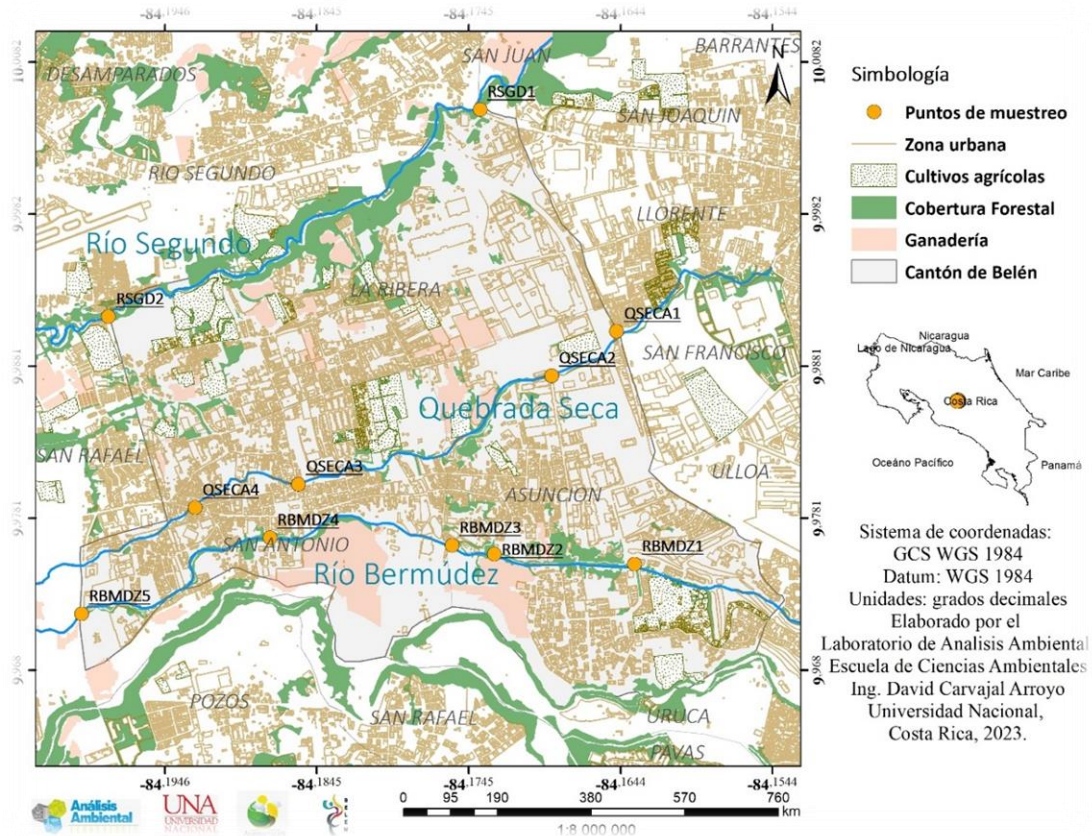
3.1. Ubicación de los sitios de muestreo

El monitoreo ambiental de la calidad de los cuerpos de agua superficiales que atraviesan el cantón de Belén está compuesto por once puntos, los cuales se encuentran ubicados en la entrada, la parte media y la salida del cantón sobre los ríos Quebrada Seca, Río Segundo y Río Bermúdez, los cuales forma parte de la sección media de la cuenca del Río Grande de Tácoles. En el **Cuadro 1** se describe la ubicación de cada uno de los puntos con sus respectivas coordenadas geográficas y en la **Figura 1** se muestran el mapa con la ubicación espacial de los sitios de muestreo.

Cuadro 1. Descripción y coordenadas de los sitios de muestreo del monitoreo de calidad de cuerpos de agua superficiales del cantón de Belén.

Microcuenca	Código	Parte	Coordenadas		Descripción del sitio
			Latitud	Longitud	
Quebrada Seca	QSECA1	Entrada	-84,16469413	9,990440689	Puente frente a empresa HP
	QSECA3	Medio 1	-84,18572363	9,980314995	Puente contiguo a Industria Rodillos Industriales
	QSECA2	Medio 2			Puente contiguo a empresa Unilever
	QSECA4	Salida	-84,19256249	9,978772434	Puente La Amistad (Puente Tribu) carretera Belén-Santa Ana
Río Segundo	RSGD1	Entrada	-84,17371269	10,00509032	Puente contiguo a Cervecería de Costa Rica
	RSGD2	Salida			Puente Casona del Pollo (entre Aeropuerto Juan Santamaría y Ojo de Agua)
			-84,19829752	9,991399597	
Río Bermúdez	RBMDZ1	Entrada	-84,16351396	9,975024725	Puente Los Golfistas
	RBMDZ2	Media 1	-84,17278416	9,975702244	Calle Tilianos
	RBMDZ3	Media 2	-84,1755617	9,9762655	Calle Chompipe
	RBMDZ4	Media 3	-84,18761329	9,976779307	Puente Pekis
	RBMDZ5	Salida	-84,20007198	9,971753118	Puente Radial

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de cuerpos de agua superficiales en el cantón de Belén, 2022.

3.2. Frecuencia de muestreo

En este informe se contempla un total de dos campañas de muestreo efectuadas en marzo y octubre del 2022. Lo anterior con el objetivo de caracterizar la variabilidad temporal de cada microcuenca según la época del año. En el **Cuadro 2** se muestran las fechas de los muestreos ejecutados.

Cuadro 2. Fechas de los muestreos realizados en las diferentes microcuencas que atraviesan el cantón de Belén

Campaña	Fecha de muestreo
1	23 de marzo, 2022
2	12 de octubre, 2022

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Muestreo de aguas superficiales

La toma de muestras de aguas superficiales sigue los procedimientos establecidos en el PRT-012 modificado por el laboratorio y que se basa en lo establecido para la recolección de muestras en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

La recolección de las muestras responde a las características del sitio de muestreo. En todos los casos, las muestras son recolectadas y transportadas en frío, a una temperatura menor a 6 °C sin llegar al congelamiento. Cada una es identificada adecuadamente con una etiqueta donde se le asigna un número de consecutivo asociado al plan de muestreo correspondiente.

Las botellas utilizadas para la toma de las muestras corresponden a botellas de polietileno de alta densidad. En el caso de las muestras para análisis de metales, el envase fue previamente tratado con ácido nítrico al 10 %. Así mismo las muestras de grasas y aceites se recolectaron en frascos de vidrio.

Las consideraciones que se deben tomar en cuenta para el muestreo de aguas superficiales son las siguientes:

- Se debe sumergir la botella en el agua con el cuello hacia abajo hasta una profundidad de 15 cm a 30 cm, destapar y girar ligeramente el frasco permitiendo el llenado. Realizar al menos tres lavados del recipiente con pequeñas porciones del agua a muestrear.
- Debe evitarse tomar la muestra de la capa superficial o del fondo ya que puede haber natas o sedimentos, tampoco se recomienda muy cerca de la orilla o muy distantes del punto de extracción.
- Si existe corriente en el cuerpo de agua, la toma de muestra debe efectuarse con la boca del frasco a contracorriente.
- Efectuada la toma de la muestra se coloca la tapa y se saca el recipiente del agua. Se almacena en frío y se envía al laboratorio para su análisis.

3.4. Análisis de muestras de aguas superficiales

Los procedimientos para análisis de factores fisicoquímicos se muestran en el **Cuadro 3**. Los ensayos acreditados ante el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) se encuentran señalados con un asterisco (*) y aquellos que no se encuentran acreditados se identifican con un doble asterisco (**).

Cuadro 3. Detalle de procedimientos de análisis de ensayo, incluyendo límites de detección, cuantificación y referencia del método de análisis

Matriz	Procedimiento	Límite de detección (LD) y cuantificación (LC)	Referencia
Aguas	*PMA-012: Nitrito	LD: 3,6 µg/L LC: 10,3 µg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500 NO ₂ -B (2017)/Espectrofotometría UV-Vis
Aguas	*PMA-007: Cloruro	LD: 0,57 mg/L LC: 0,73 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4110 B (2017) /Cromatografía de iones
Aguas	*PMA-007: Nitrato	LD: 0,48 mg/L LC: 0,92 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4110 B (2017) /Cromatografía de iones
Aguas	*PMA-007: Sulfato	LD: 0,25 mg/L LC: 0,49 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4110 B (2017) /Cromatografía de iones
Aguas	*PMA-030: Amonio	LD: 0,1 µg/L LC: 14,3 µg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-NH ₃ A (2017) / Espectrofotometría UV-Vis
Aguas	*PMA-014: DQO Total	LD: 6,3 mg/L LC: 19,4 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 5220 D (2017) / Espectrofotometría UV-Vis
Aguas	*PMA-005: DBO	LD: 0,010 mg/l LC: 2 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 5210 D (2017) Y 5510 B (2017), HACH 10360 (2015) Y OXITOP BA31107DE02/ 11-04/AS/OxiTop IS-6_IS-12, conforme al reglamento para vertido y reuso de aguas residuales N° 33601-MINAE-S / Electrodo
Aguas	*PMA-013: Fósforo Total	LD: 0,19 mg/L LC: 0,72 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-P C (2017), conforme al reglamento para vertido y reuso de aguas residuales N° 33601-MINAE-S/ Espectrofotometría UV-Vis

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3 (Continuación). Detalle de procedimientos de análisis de ensayo, incluyendo límites de detección, cuantificación y referencia del método de análisis

Matriz	Procedimiento	Límite de detección (LD) y cuantificación (LC)	Referencia
Aguas	*PMA-019: Sólidos Suspendidos	LD: 3,4 mg/L LC: 6,0 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 2540 D (2017) / Gravimétrico
Aguas	*PMA-021: Grasas y Aceites	LD: 2,9 mg/L LC: 5,0 mg/L	Método modificado a partir de SMEWW-APHA-AWWA-WEF 5520 A (2017) y 5520 B (2017) / Gravimétrico
Aguas	*PMA-028: SAAM	LD: 0,2 mg/L LC: 0,4 mg/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 5540 A (2017) y 5540 C (2017) / Espectrofotometría UV-Vis
Aguas	*PMA-054: Hidrocarburos totales	LD: 2,9 mg/L LC: 5,0 mg/L	Método modificado a partir de SMEWW-APHA-AWWA-WEF 5520 B (2017) / Gravimetría
Aguas	*PMA-055: Nitrógeno Total	LD: 4,0 mg/L LC: 11,3 mg/L	Método basado en: HACH 10072 (2015)/ Espectrofotometría UV-Vis
Aguas	*PMA-010: pH	(0-14) Unidades de pH	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 4500-H+ B (2017), conforme al reglamento para calidad de agua potable N° 38924-S, vertido y resuo de aguas residuales N° 33601-MINAE-S y manejo de piscinas N° 35309-S / Electrométrico
Aguas	*PMA-016: Turbiedad	(1 1 000) NTU	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 2130 B (2017), conforme al reglamento para calidad de agua potable N° 38924-S y manejo de piscinas N° 35309-S / Nefelométrico
Aguas	*PMA-020: Sólidos sedimentables	LD: NA LC: 0,1 mL/L	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 2540 F (2017)
Aguas	*PMA-018: Temperatura	(15 °C a 50 °C)	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 2550 (2017)
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Aluminio	LD: 1,60 µg/L LC: 2,00 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3 (Continuación). Detalle de procedimientos de análisis de ensayo, incluyendo límites de detección, cuantificación y referencia del método de análisis.

Matriz	Procedimiento	Límite de detección (LD) y cuantificación (LC)	Referencia
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Calcio	LD: 0,31 mg/L LC: 0,48 mg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Cobre	LD: 0,48 µg/L LC: 0,60 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Manganeso	LD: 0,24 µg/L LC: 0,69 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Potasio	LD: 0,47 mg/L LC: 0,55 mg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Plomo	LD: 0,47 µg/L LC: 0,66 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Sodio	LD: 0,48 mg/L LC: 0,81 mg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Zinc	LD: 0,27 µg/L LC: 0,44 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3 (Continuación). Detalle de procedimientos de análisis de ensayo, incluyendo límites de detección, cuantificación y referencia del método de análisis

Matriz	Procedimiento	Límite de detección (LD) y cuantificación (LC)	Referencia
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Arsénico	LD: 0,50 µg/L LC: 0,58 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	**Oxígeno Disuelto y Porcentaje de Saturación	NA	Método modificado a partir de: SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500 O-C, O-G (2017)
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Cadmio	LD: 0,53 µg/L LC: 0,58 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Cromo	LD: 0,40 µg/L LC: 0,56 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas
Aguas	*PMA-091: Determinación de la concentración de metales: Níquel	LD: 0,49 µg/L LC: 0,53 µg/L	Método modificado a partir de: APHA-AWWA-WEF 3125 A y B Espectrofotometría de masas por acoplado inductivamente. Tratamiento de muestra: digestión en microondas

Fuente: Elaboración propia.



4. Resultados

Los valores promedio de los parámetros evaluados durante el 2022 indican que las tres cuencas, en su mayoría de parámetros, categorizan los cuerpos de agua como clase I y II según la clasificación de parámetros complementarios descrita en los artículos 5 y 7 del Decreto Ejecutivo N° 33903-MINAE-S (2007) (**Cuadro 4**). No obstante, existen algunos parámetros que presentan muy altas concentraciones que limitan el uso del cuerpo de agua en algunas de las microcuencas que atraviesan el cantón de Belén. Estos parámetros son las SAAM, la DQO y los SST.

Cuadro 4. Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de las aguas de los cuerpos superficiales para las clases establecidas en el D.E. 33903-MINAE-S

Parámetros complementarios	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
Turbiedad (NTU)	< 25	25 a < 100	100 a 300	(1)	(1)
Temperatura (°C)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
pH	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,0 a 9,0	5,5 a 9,5	5,5 a 9,5
Nitratos (mg N/L)	< 5	5 a < 10	10 a < 15	15 a < 20	> 20
DQO (mg/L)	< 20	20 a < 25	25 a < 50	50 a < 100	100 a 300
Cloruros (como Cl) (mg/L)	< 100	100 a 200	NA	NA	NA
Fluoruros (como F) (mg/L)	< 1,0	1,0 a 1,5	NA	NA	NA
Color (Pt-Co)	2,5 a 10	10 a 100	(1)	(1)	(1)
SST (mg/L)	< 10	10 a 25	25 a 100	100 a 300	> 300
Sólidos disueltos (mg/L)	< 250	250 a < 500	500 a 1000	> 1000	> 1000
Grasas y aceites (mg/L)	ND	ND	ND	ND	15 a 20
SAAM (mg/L)	ND	ND	ND a 1	1 a 2	2 a 5
Arsénico (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,01 a 0,05	> 0,05	> 0,05
Boro (mg/L)	0,1	0,2	0,5	1	1
Cadmio (mg/L)	< 0,005	0,005	0,01	0,02	0,02
Cianuro (mg CN/L)	< 0,1	0,1 a < 0,2	0,2	> 0,2	> 0,2
Cobre (mg/L)	< 0,5	0,5 a < 1	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 2,5
Cromo total (mg/L)	< 0,05	0,05	0,20	0,50	> 0,5

*ND: no detectable, NA: no aplica, (1): natural o que no afecta el uso indicado

Fuente: (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007)

Cuadro 4 (Continuación). Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de las aguas de los cuerpos superficiales para las clases establecidas en el D.E. 33903-MINAE-S.

Parámetros complementarios	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
Magnesio (como mg MgCO_3/L)	< 30	30 a 50	> 50	> 50	> 50
Mercurio (mg/L)	< 0,001	0,001	0,002	0,004	0,005
Níquel (mg/L)	< 0,05	0,05	0,1	0,2	0,3
Plomo (mg/L)	< 0,03	0,03 a < 0,05	0,05 a < 0,10	0,10 a < 0,20	0,20
Selenio (mg/L)	< 0,005	0,005 a < 0,010	0,010 a < 0,020	0,020 a < 0,050	0,050
Sulfatos (mg/L)	< 150	150 a 250	> 250	> 250	> 250
Orgánicos					
Sumatoria de compuestos organoclorados (mg/L)	ND	ND	ND	0,01	0,01
Sumatoria de compuestos organofosforados (mg/L)	ND	ND	ND	0,01	0,01
Biológicos					
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	ND	ND	ND	0,01	0,01

*ND: no detectable, NA: no aplica, (1): natural o que no afecta el uso indicado

Fuente: (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007)

Para el río Quebrada Seca las concentraciones de parámetros complementarios más altas registradas fueron las de las SAAM y la DQO; en promedio estos valores alcanzaron los 0,56 y los 28,12 mg L^{-1} lo cual cataloga el río en clase III. En la cuenca del río Bermúdez estas mismas variables también son las de mayor problemática que reducen la calidad del agua con valores promedio de SAAM de 1,28 mg L^{-1} y de DQO de 89,19 mg L^{-1} ; la clase según estos parámetros es IV (**Cuadro 6**). Además, en el río Bermúdez hay altas concentraciones de SST que clasifican el río en clase III. Por su parte, en río Segundo entre los valores complementarios evaluados se observó que las SAAM clasifican el río en clase III. Estos resultados señalan la presencia de aguas jabonosas y con alta carga orgánica que limitan el uso de recurso hídrico, requiriendo tratamientos avanzados y en algunos ni siquiera se admite su uso aún con tratamiento.

Cuadro 5. Valores promedio de los parámetros evaluados a lo largo de las cuencas del cantón de Belén en el año 2022.

Parámetro	Quebrada Seca	Río Bermúdez	Río Segundo
pH	7,76 (0,14)	7,58 (0,29)	7,64 (0,18)
Temperatura (°C)	23,2 (2,72)	27,18 (1,88)	22,83 (2,48)
Turbiedad (NTU)	9,84 (5,22)	13,57 (5,61)	7,51 (2,59)
DBO (mg/l)	6,26 (5,11)	39,16 (30,96)	4,75 (1,69)
SST (mg/l)	12,13 (10,17)	32,04 (26,55)	15,63 (6,66)
Amonio (µg/l)	1179,75(995,13)	4984,88 (4763,03)	558,43 (490,99)
Oxígeno Disuelto (mg/l)	7,53 (1,9)	4,72 (2,45)	7,33 (2,08)
% Saturación	72,16 (9,57)	47,48 (17,56)	70,73 (10,22)
DQO (mg/l)	28,12 (11,18)	86,19 (68,04)	19,4 (0)
SS (ml/l)	0,16 (0,17)	0,31 (0,57)	0,1 (0)
SAAM (mg/l)	0,56 (0,34)	1,28 (0,95)	0,3 (0,1)
Fósforo Total (mg/l)	0,83 (0,23)	1,07 (0,44)	0,58 (0,42)
Nitrógeno Total (mg/l)	7,65 (3,65)	10,86 (3,76)	5,83 (3,16)
Nitrito (µg/l)	532,8 (181,42)	2141,86 (1655,37)	76,6 (64)
Cloruro (µg/l)	17,07 (5,63)	20,44 (9,22)	11,08 (6,97)
Nitrato (µg/l)	16,28 (5,94)	3,55 (6,77)	9,67 (1,27)
Sulfato (µg/l)	21,81 (4,43)	27,88 (10,42)	15,83 (4,16)
Hidrocarburos (mg/l)	3,95 (1,05)	3,95 (1,05)	3,95 (1,05)
Aluminio (µg/l)	682,38 (160,65)	2440,6 (2902,15)	1430 (758,17)
Calcio (mg/l)	16,83 (3,7)	16,7 (3,05)	12,35 (0,72)
Cobre (mg/l)	3,68 (2,11)	7,24 (4,54)	3,48 (0,4)
Manganeso (µg/l)	33,44 (15,63)	207,64 (134,53)	35,15 (10,91)
Potasio (mg/l)	5,72 (2,09)	7,79 (3,25)	3,92 (2,05)
Níquel (µg/l)	1,98 (0,56)	20,5 (37,97)	1,69 (0,59)
Plomo (µg/l)	1,28 (0,73)	1,73 (1,39)	3,54 (3,65)
Sodio (mg/l)	24,36 (7,88)	33,98 (17,22)	15,5 (8,04)
Zinc (mg/l)	0,05 (0,02)	0,04 (0,01)	0,04 (0,03)
Cadmio (µg/l)	0,13 (0,1)	0,07 (0,02)	0,46 (0,41)
Cromo (µg/l)	1,38 (0,54)	2,66 (1,89)	1,01 (0,18)
Arsénico (µg/l)	0,54 (0,05)	0,78 (0,31)	0,58 (0,13)

Los valores entre paréntesis significan la desviación estándar de los datos.

Los usos según la clase de clasificación de los cuerpos de agua según el uso potencial y tratamiento que requiera de acuerdo con lo establecido en el D.E. 33903-MINAE-S se muestran en el **Cuadro 6**. Es importante acompañar este análisis con el tipo de uso que se le pretenda dar al agua, ya que, según este, se puede determinar cuáles son las variables de mayor interés para definir si la calidad del agua es apta para dicho uso o no.

Cuadro 6. Clasificación de los cuerpos de agua según el uso potencial y tratamiento que requiera de acuerdo con lo establecido en el D.E. 33903-MINAE-S

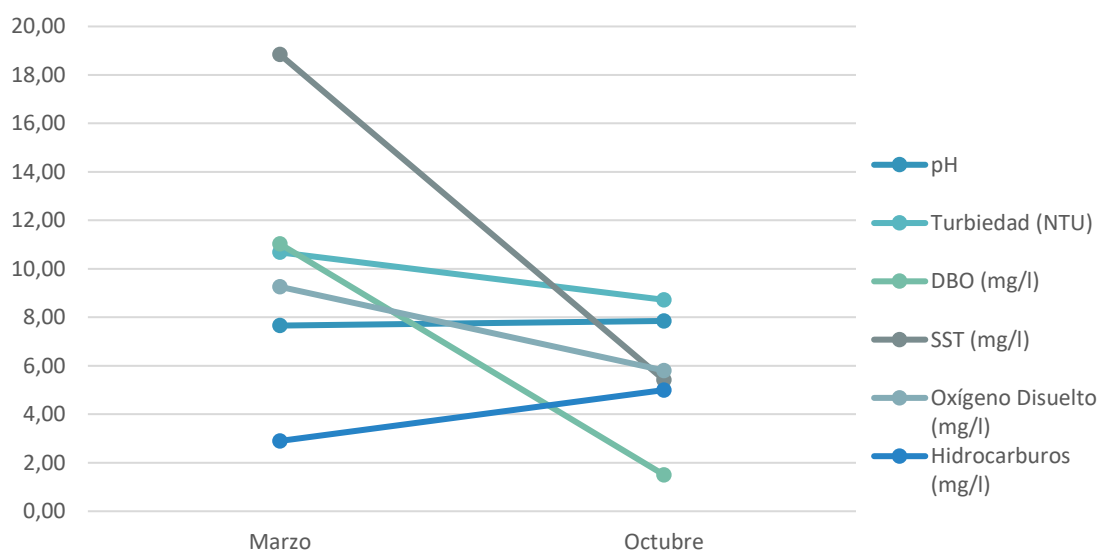
Usos	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
Abastecimiento de agua para uso y consumo humano	Tratamiento simple con desinfección	Tratamiento convencional	Tratamiento avanzado	No utilizable	No utilizable
Abastecimiento de agua para actividades destinadas a la producción de algunos alimentos de consumo humano	Sin tratamiento previo o con tratamiento simple de desinfección	Tratamiento convencional	Tratamiento avanzado	No utilizable	No utilizable
Abastecimiento de agua para abrevadero y actividades pecuarias	Sin limitaciones	Sin limitaciones	Sin limitaciones	Sin limitaciones	No utilizable
Actividades recreativas de contacto primario	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Acuicultura	Utilizable	Utilizable	No Utilizable	No Utilizable	No Utilizable
Fuente para la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas	Utilizable	No Utilizable	No Utilizable	No Utilizable	No Utilizable
Fuente para la protección de las comunidades acuáticas	Utilizable	Utilizable	No Utilizable	No Utilizable	No Utilizable
Generación hidroeléctrica	Utilizable	Utilizable	Utilizable	Utilizable con limitaciones	Utilizable con limitaciones
Navegación	No Utilizable	No Utilizable	Utilizable	Utilizable	Utilizable
Riego de especies arbóreas, cereales y plantas forrajeras	Utilizable	Utilizable	Utilizable	No Utilizable	No Utilizable
Riego de plantas sin limitación, irrigación de hortalizas que se consumen crudas o de frutas que son ingeridas sin eliminación de cáscara	Utilizable	Utilizable	No Utilizable	No Utilizable	No Utilizable

Fuente: (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007)

4.1. Análisis de tendencias de los principales parámetros para el río Quebrada Seca

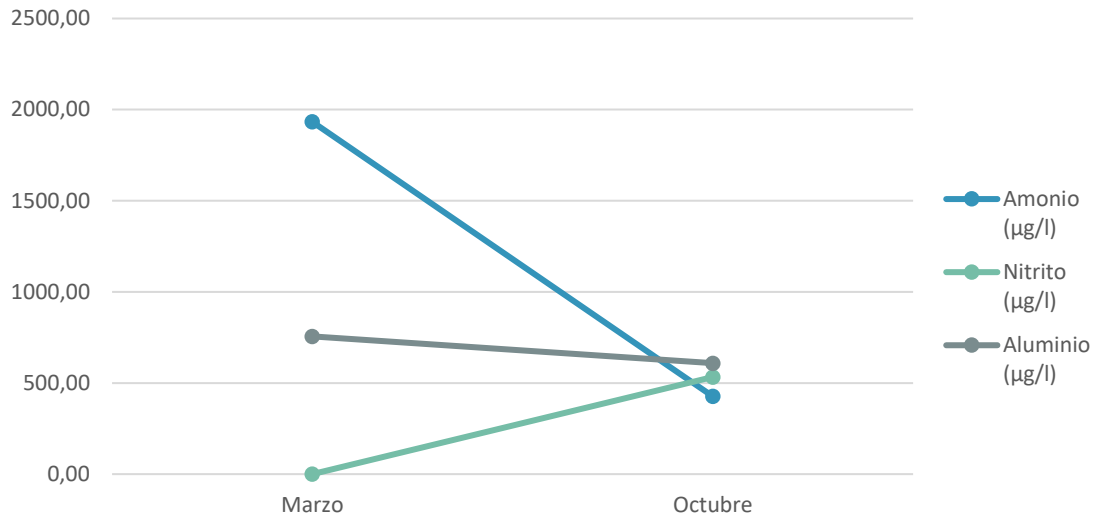
Es importante señalar que los valores presentados anteriormente son promedios de todas las mediciones realizadas en el 2022 sin diferenciación alguna entre los puntos de monitoreo ni las épocas en las cuales se realizó el muestreo, por lo que representan solo un comportamiento general. Para conocer la influencia, tanto de la ubicación espacial de algunos puntos en las cuencas, así como el impacto de la estacionalidad, es necesario un análisis de tendencias en cada río.

La **Figura 2**, **Figura 3**, **Figura 4**, **Figura 5**, **Figura 6**, **Figura 7** y **Figura 8** muestran de manera gráfica los valores promedio mensuales para cada parámetro analizado durante el año de estudio en el río Quebrada Seca, con la intención de observar el comportamiento estacional y temporal de las variables.



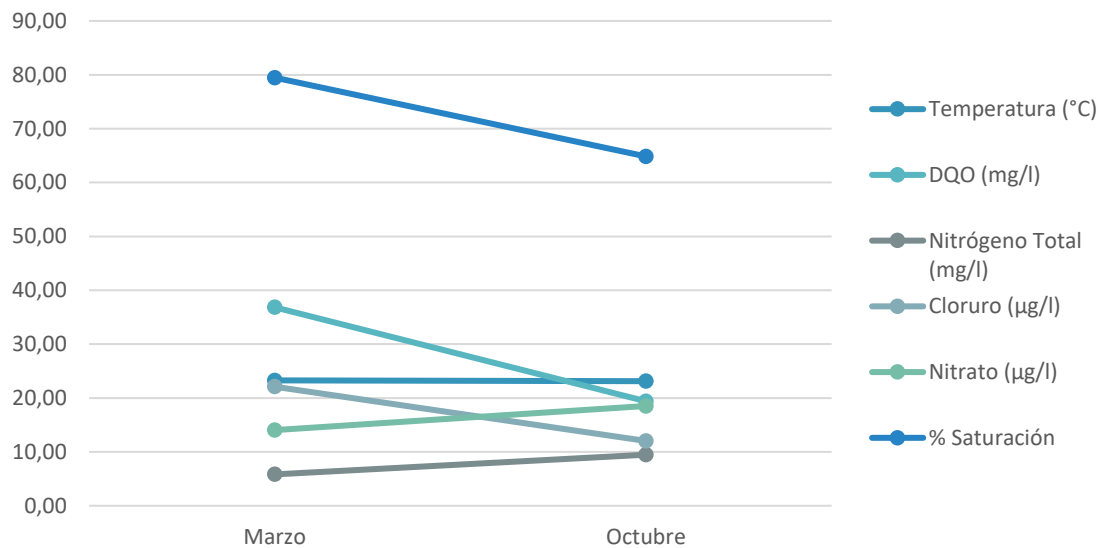
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Valores promedio mensuales de pH, turbiedad, DBO, SST, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



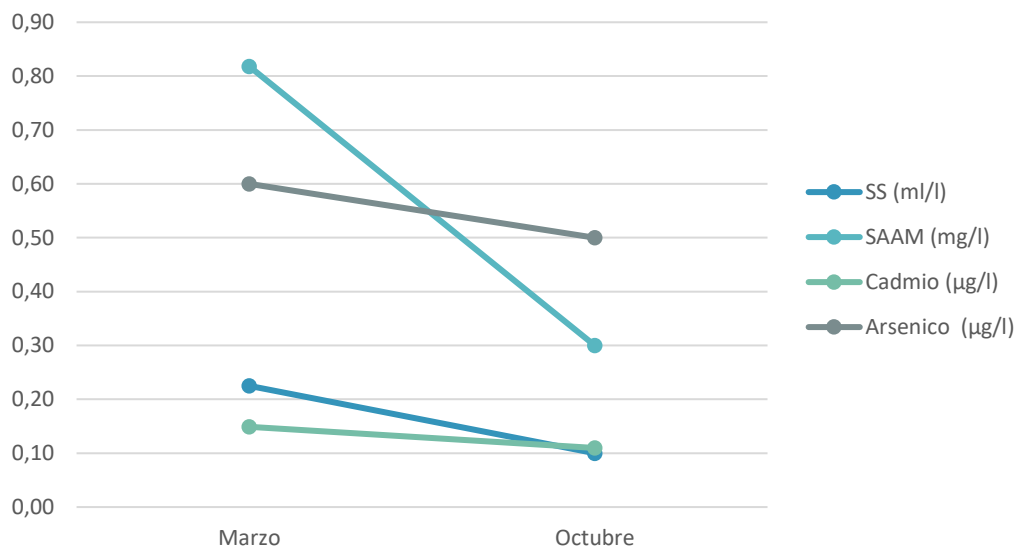
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Valores promedio mensuales de amonio, nitrito y aluminio en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



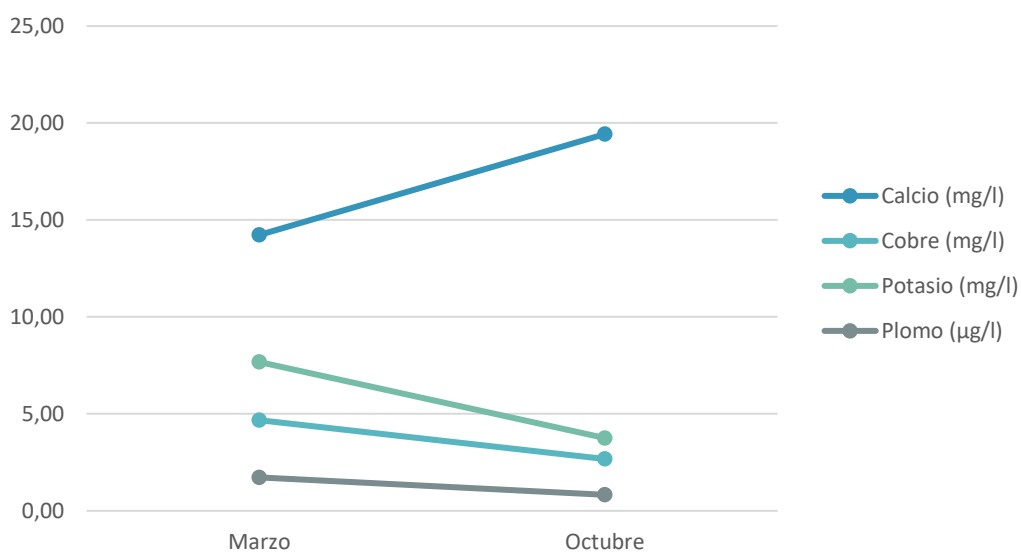
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Valores promedio mensuales de temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato y % de saturación en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



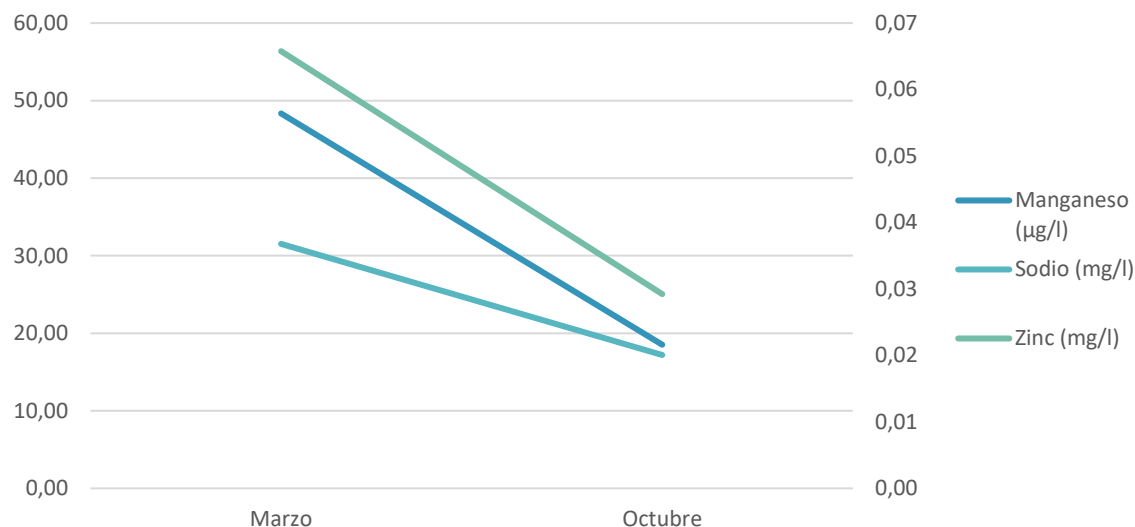
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Valores promedio mensuales de SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



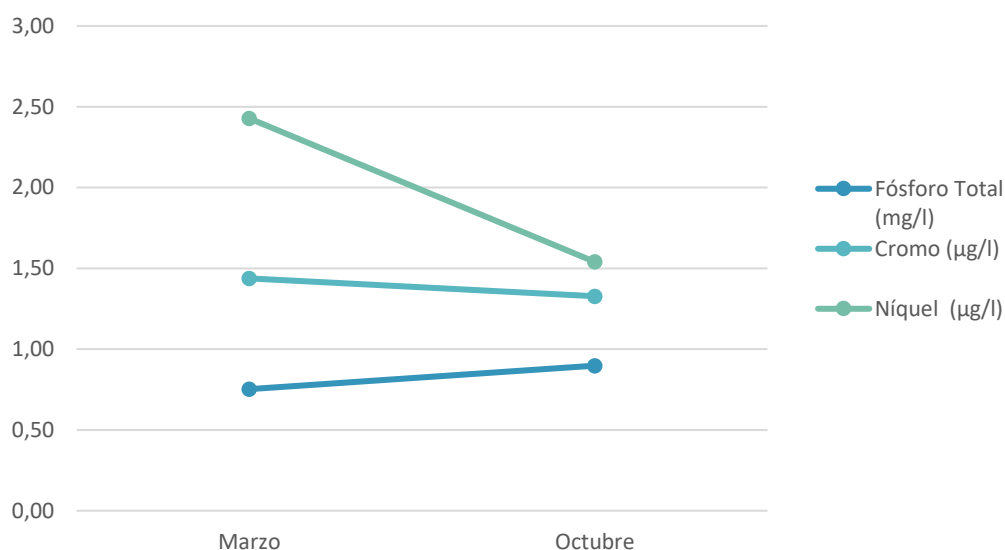
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Valores promedio mensuales de calcio, cobre, potasio y plomo en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Valores promedio mensuales de manganeso, sodio y zinc en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Valores promedio mensuales de fósforo total, cromo y níquel en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.

En general se puede identificar en las figuras anteriores, que para el río Quebrada Seca en la mayoría de los parámetros se observan concentraciones más elevadas en la época seca (marzo), y disminuyen para la época lluviosa (octubre), lo que marca una tendencia decreciente en el comportamiento de los parámetros analizados. Sin embargo, algunos parámetros como el fósforo total, los nitratos, nitritos, el nitrógeno total, calcio y los

hidrocarburos presentan un comportamiento ascendente de la época seca hacia la época lluviosa.

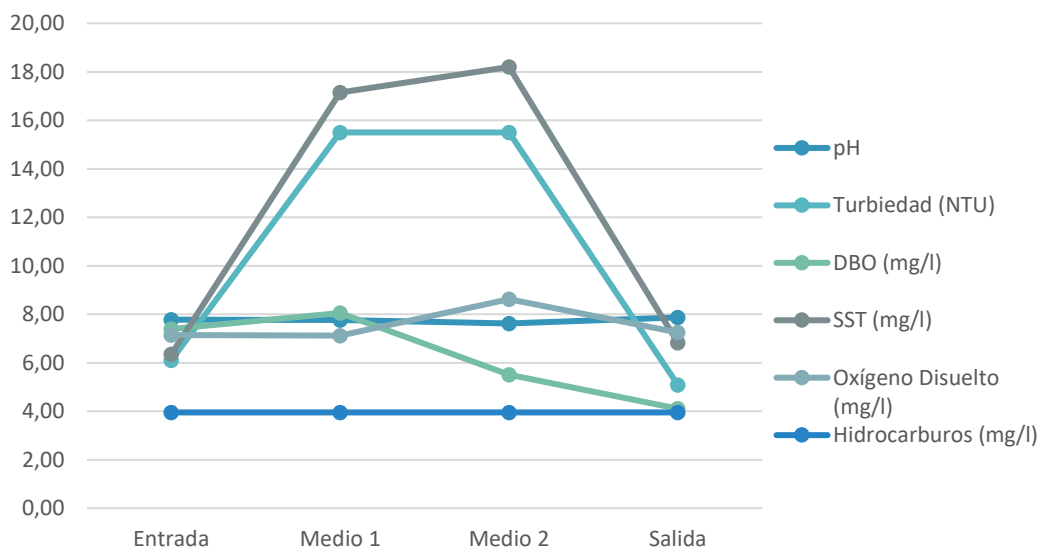
El comportamiento de reducción puede responder al hecho de que, durante la época lluviosa, el incremento en la frecuencia e intensidad de las lluvias, si bien ocasiona un mayor arrastre de contaminantes y una mayor inestabilidad del sistema, produce también un aumento en el caudal del río y por ende en su nivel. Esto puede ocasionar un efecto de dilución de los contaminantes vertidos o arrastrados, de manera que la concentración aparente de estos disminuye debido a la mayor cantidad de agua que circula por el cauce.

Por otra parte, el incremento de las concentraciones de nitrógeno total, los nitritos y nitratos en la época lluviosa pueden ser producto del arrastre de materia orgánica por un incremento en el caudal de las aguas producto de la época lluviosa. Este arrastre asociado a que en la parte media del río existen 15,6 ha de cultivos agrícolas y en la parte alta 3,4 ha (**Figura 1**), influyen el aumento de estos parámetros. Esto debido a que los fertilizantes frecuentemente utilizados en la agricultura para enriquecer el suelo y aumentar la productividad de los cultivos, son el nitrato de amonio o el nitrato de potasio. Cuando estos fertilizantes son aplicados en exceso o en momentos inapropiados, como antes de una lluvia intensa, el exceso de nitrógeno puede lavarse hacia los cuerpos de agua cercanos (Fonseca-Sánchez, y otros, 2019).

El origen del aumento del fósforo también es debido a las actividades agrícolas cercanas al río y a la influencia de aguas sin tratamientos adecuados con altos contenidos de este elemento. Además, es común que, en áreas urbanas el agua de lluvia que fluye sobre superficies impermeables, como carreteras y estacionamientos, se arrastre fósforo de las áreas urbanas hacia los ríos.

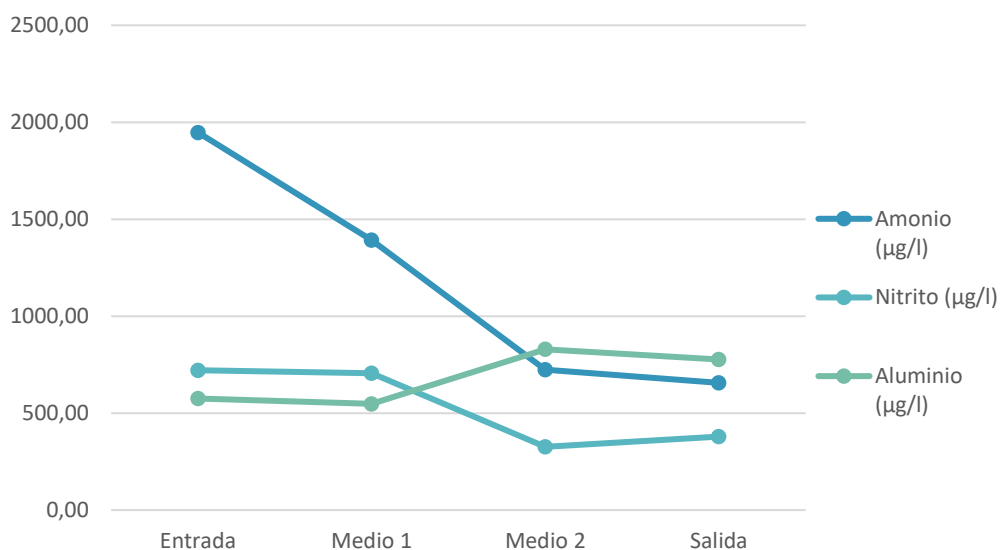
Otro análisis de tendencia que arroja información útil es en el que se compara el comportamiento de las variables en las distintas partes de la microcuenca en las que se llevan a cabo las mediciones (entrada, medio y salida del cantón) recordando que el cantón de Belén se ubica en la parte media de la cuenca. En este caso, las aguas entran al cantón por la parte alta de este y salen por la parte baja siguiendo el curso de las aguas en la

microcuenca. La **Figura 9**, **Figura 10**, **Figura 11**, **Figura 12**, **Figura 13**, **Figura 14** y **Figura 15** muestran los promedios anuales por sitio dentro de la microcuenca observados para cada una de las variables analizadas.



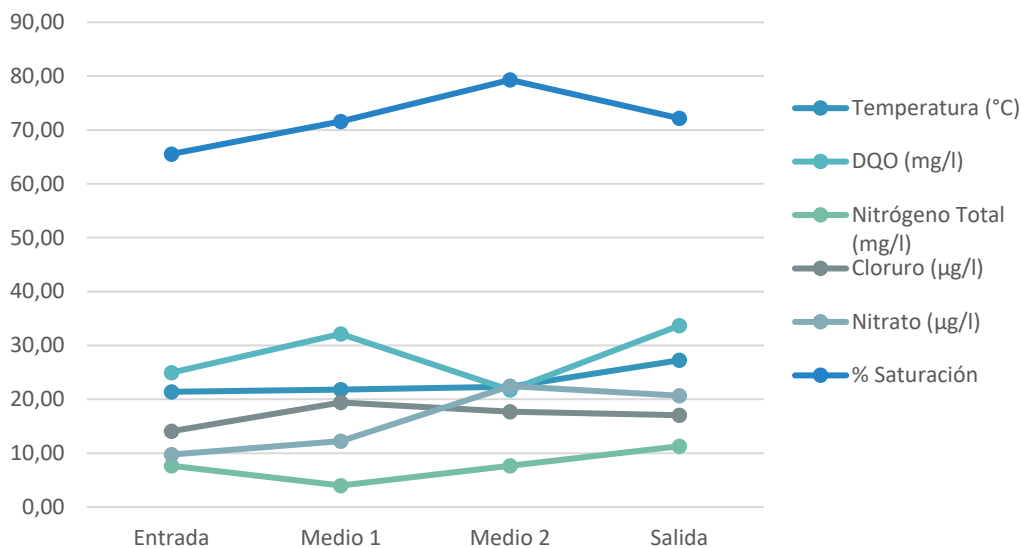
Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Valores promedio anuales por sitio para pH, turbiedad, DBO, SST, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



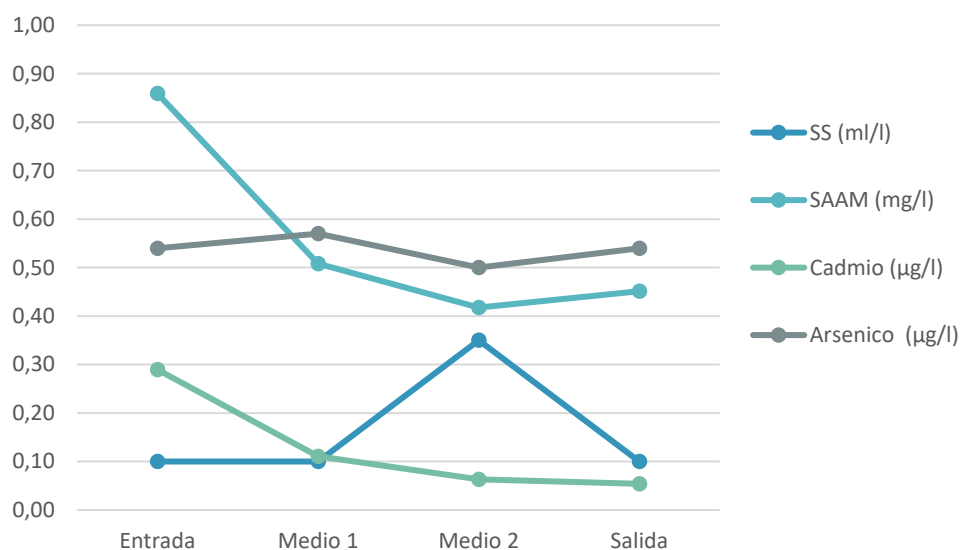
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Valores promedio anuales por sitio para amonio, nitrito y aluminio en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



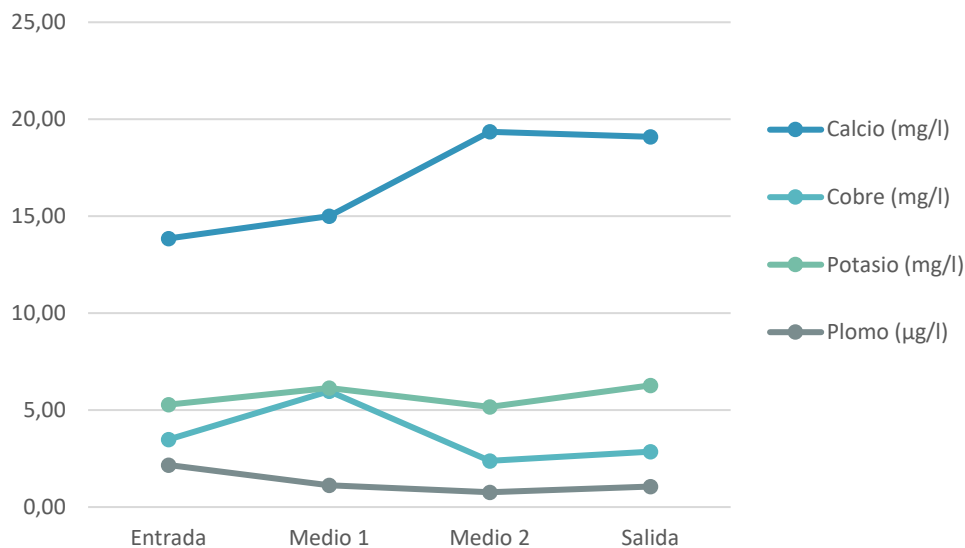
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Valores promedio anuales por sitio para temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato y porcentaje de saturación en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



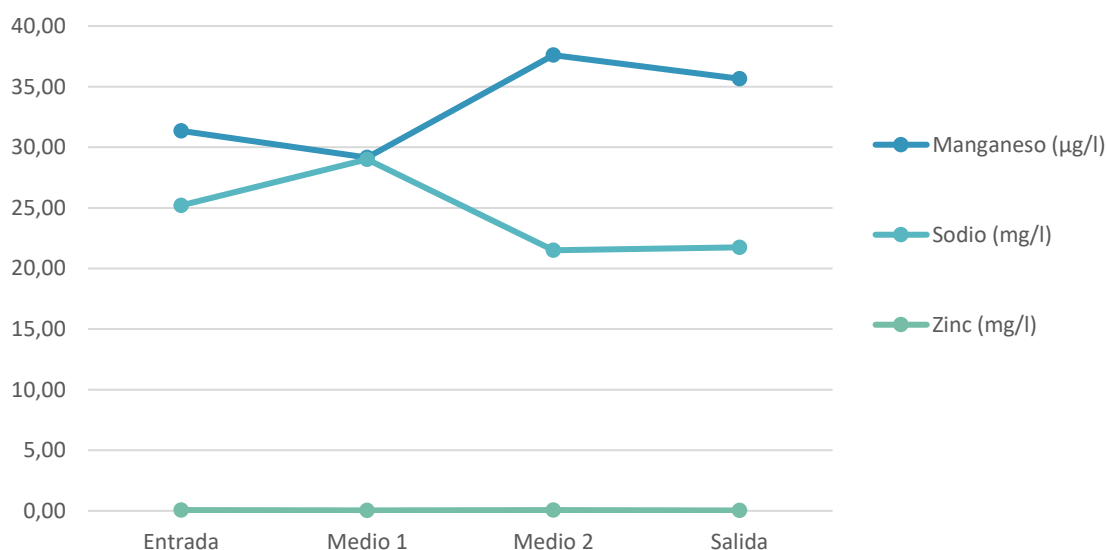
Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Valores promedio anuales por sitio para SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



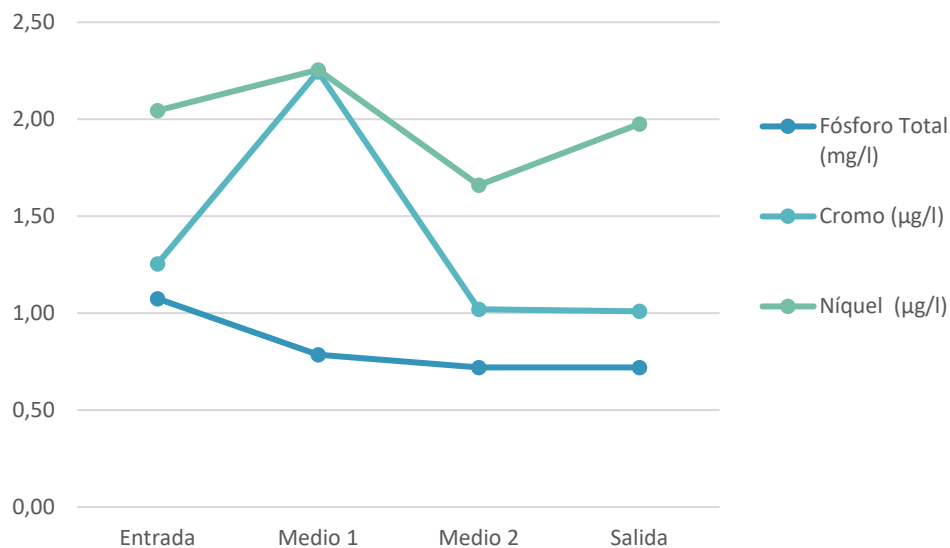
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Valores promedio anuales por sitio para calcio, cobre, potasio y plomo en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Valores promedio anuales por sitio para manganeso, sodio y zinc en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Valores promedio anuales por sitio para fósforo total, cromo y níquel en el río Quebrada Seca, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.

A diferencia del análisis por época climática, el comportamiento de los parámetros por ubicación de sitios es más variable y resulta más difícil definir o establecer un patrón claro de comportamiento, aun así, la tendencia más generalizada para el río Quebrada Seca muestra valores que se mantienen constantes o estables en todos los sitios. Esta estabilidad es observable en parámetros como la DBO, la DQO, temperatura, fósforo, nitratos, nitritos, OD, % de saturación y la mayoría de los metales.

Los parámetros que mostraron un aumento en puntos específicos de la cuenca Quebrada Seca fueron los SST, la turbiedad, el amonio, los SAAM y el cromo. En este sentido, en los puntos medio 1 (Qseca1) y medio 2 (QSECA2) la concentración de SST se triplicó alcanzando valores de hasta 18 mg L^{-1} con respecto a los otros dos puntos (**Figura 9**). Lo mismo sucede con la turbiedad que en la entrada y salida del río al cantón los valores son cercanos a los 6 NTU mientras que para los puntos medios 1 y 2 los valores son cercanos a los 15 NTU. Tal y como se mencionó anteriormente, estos puntos son influenciados principalmente por actividades agrícolas y ganaderas cercanas al río, así como al efecto de los residuos generados en un cantón altamente urbanizado (**Figura 1**).

Con respecto al amonio el incremento se observó en la entrada mientras que las SAAM fue en la salida del río. Es importante rescatar, para el río Quebrada Seca, que desde las partes altas de la microcuenca en el cantón de Barva, dicho río discurre por algunas zonas altamente pobladas tanto de Barva (48 190 habitantes) como del cantón de Heredia (146020 habitantes), así como por algunas zonas altamente industrializadas en el distrito de San Francisco antes de ingresar al cantón de Belén, lo que podría explicar las concentraciones de contaminantes a la entrada del cantón, tanto de parámetros ordinarios como especiales.

Con el propósito de evaluar la capacidad de autodepuración del río Quebrada Seca en el **Cuadro 7** que muestran los valores de los parámetros a la entrada y salida del cantón para cada una de las épocas climáticas, señalando en rojo cuando el valor a la salida es mayor que en la entrada, indicativo del aporte de contaminación antrópico.

Cuadro 7. Comparación de resultados de los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida del cuerpo de agua al cantón de Belén en dos estaciones climáticas para el río Quebrada Seca, 2022.

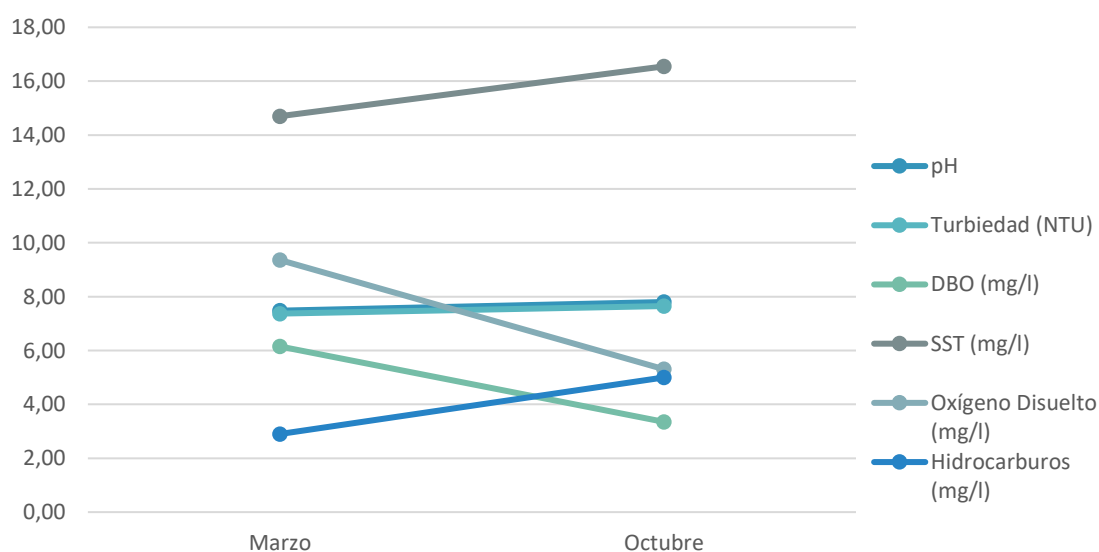
Época	Sitio	Código	pH	Turbiedad (NTU)	DBO (mg/L)	SS (mg/L)	Amonio (µg/L)	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	% Saturación	DQO (mg/L)	SS (ml/l)
Seca	Entrada	QSECA1	7,64	7,51	12,8	9,3	3240	21,5	9,09	76,7	30,49	0,1
	Salida	QSECA4	7,74	6,71	8,2	7,36	1024	25,3	9,45	83	47,95	0,1
Lluviosa	Entrada	QSECA1	7,9	4,7	2	3,4	655	21,3	5,2	54,4	19,4	0,1
	Salida	QSECA4	8	3,47	0,01	6,28	288,6	29,2	5,05	61,4	19,4	0,1
Época	Sitio	Código	SAAM (mg/L)	P total (mg/L)	Nitrito (µg/L)	N total (mg/L)	Cloruro (µg/L)	Nitrato (µg/l)	Sulfato (µg/l)	Hidrocarburos (mg/l)	Aluminio (µg/l)	Calcio (mg/l)
Seca	Entrada	QSECA1	1,32	0,72	-	4	17,89	8,50	26,10	2,90	542,00	12,60
	Salida	QSECA4	0,7	0,72	-	11,3	20,8	16,69	25,70	2,90	929,00	15,50
Lluviosa	Entrada	QSECA1	0,4	1,43	721,2	11,3	10,27	11	19,2	5	610	15,1
	Salida	QSECA4	0,2	0,72	378,4	11,3	13,28	24,7	16,56	5	624	22,7
Época	Sitio	Código	Cobre (mg/L)	Manganeso (µg/L)	Potasio (mg/L)	Plomo (µg/L)	Sodio (mg/L)	Zinc (mg/L)	Cadmio (µg/L)	Cromo (µg/L)	Níquel (µg/L)	Arsénico (µg/L)
Seca	Entrada	QSECA1	3,68	45,00	6,74	2,88	31,70	0,0979	0,363	1,36	2,24	0,58
	Salida	QSECA4	3,35	53,10	8,90	1,61	28,50	0,0427	0,049	1,32	2,85	0,58
Lluviosa	Entrada	QSECA1	3,28	17,7	3,81	1,46	18,7	0,0333	0,216	1,15	1,85	0,5
	Salida	QSECA4	2,37	18,2	3,65	0,49	15	0,0208	0,059	0,699	1,1	0,5

Fuente: Elaboración propia

En la mayoría de las variables se observa una reducción de los parámetros evaluados con incrementos en unos pocos casos. Los incrementos más importantes observados en la salida del río del cantón de Belén se presentaron en el porcentaje de saturación, la DQO, los SS, el cloruro y metales como el Al, el Ca y el Mn. También se registraron aumentos en la temperatura y el pH tanto en la época seca como en la lluviosa. Este comportamiento es prueba del impacto de las actividades humanas que generan un efecto en el río con residuos, al realizar actividades agrícolas y ganaderas lo cual se refleja en el aumento de estos parámetros a la salida de la cuenca.

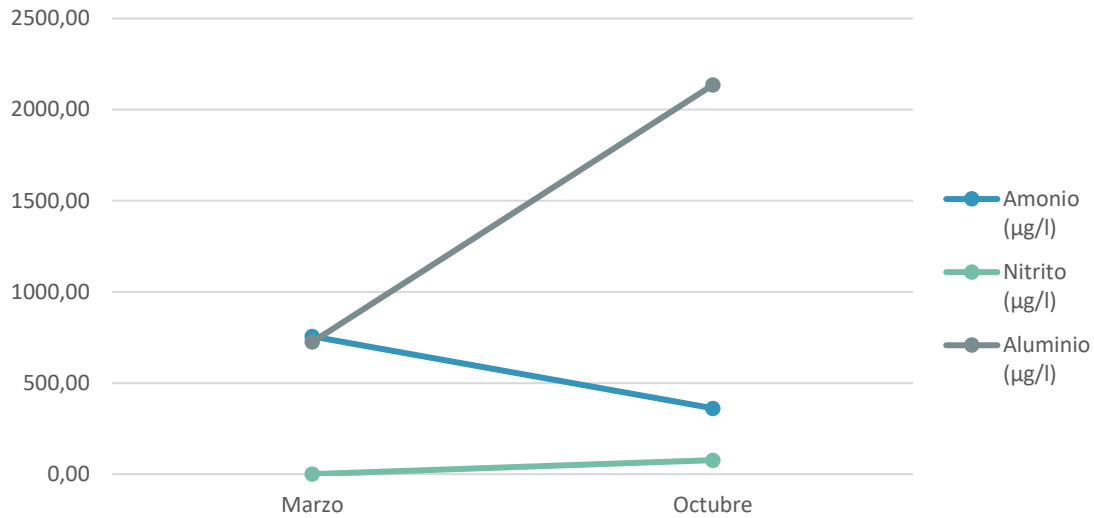
4.2. Análisis de tendencias de los principales parámetros para el río Segundo

La **Figura 16**, **Figura 17**, **Figura 18**, **Figura 19**, **Figura 20**, **Figura 21** y **Figura 22** muestran de manera gráfica los valores promedio mensuales para cada parámetro analizado durante el año de estudio en el río Segundo, con la intención de observar el comportamiento estacional y temporal de las variables.



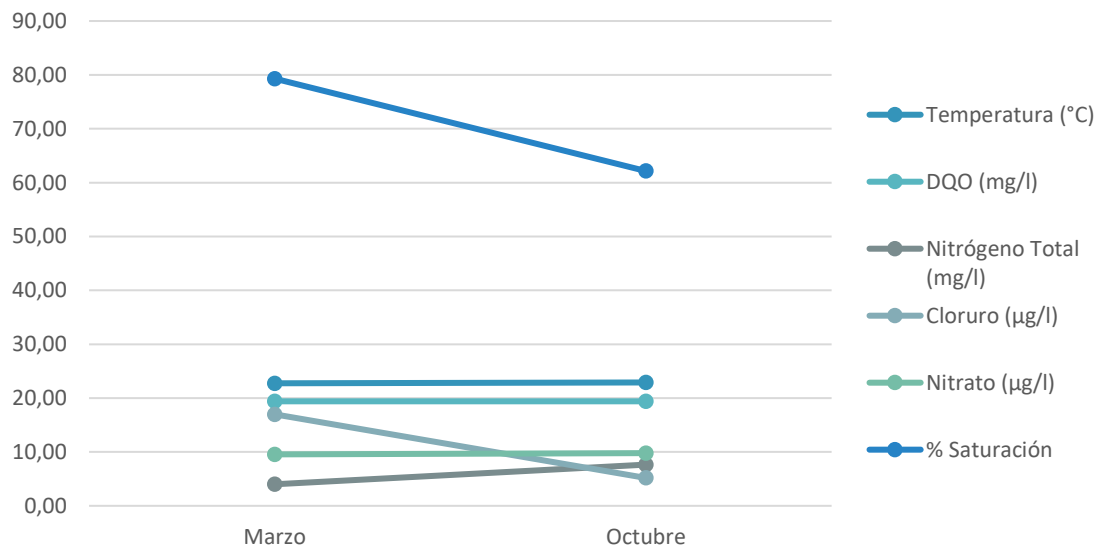
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Valores promedio mensuales de pH, turbiedad, DBO, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



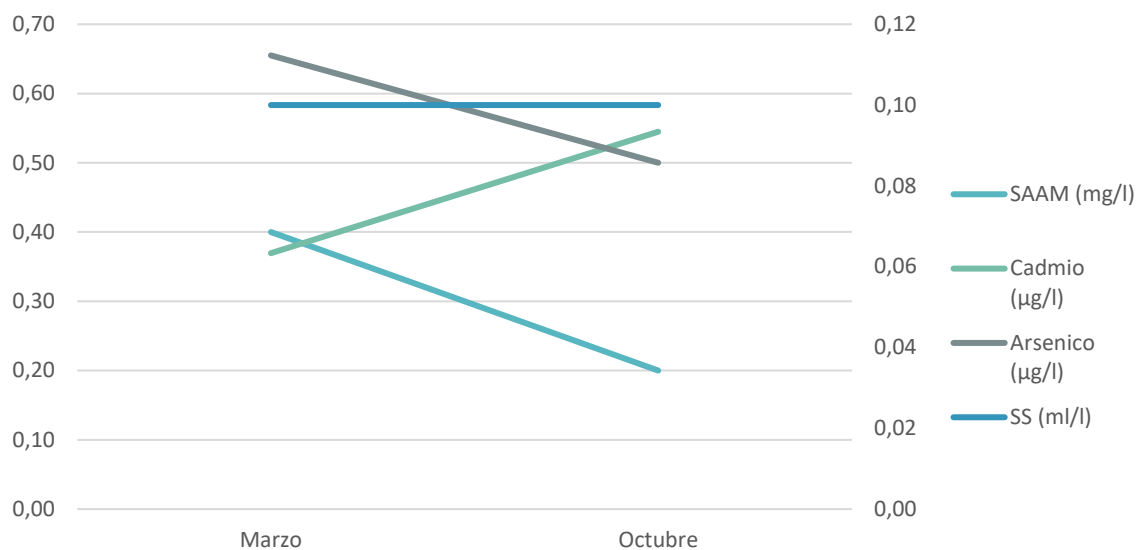
Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Valores promedio mensuales de amonio, nitrito y aluminio en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



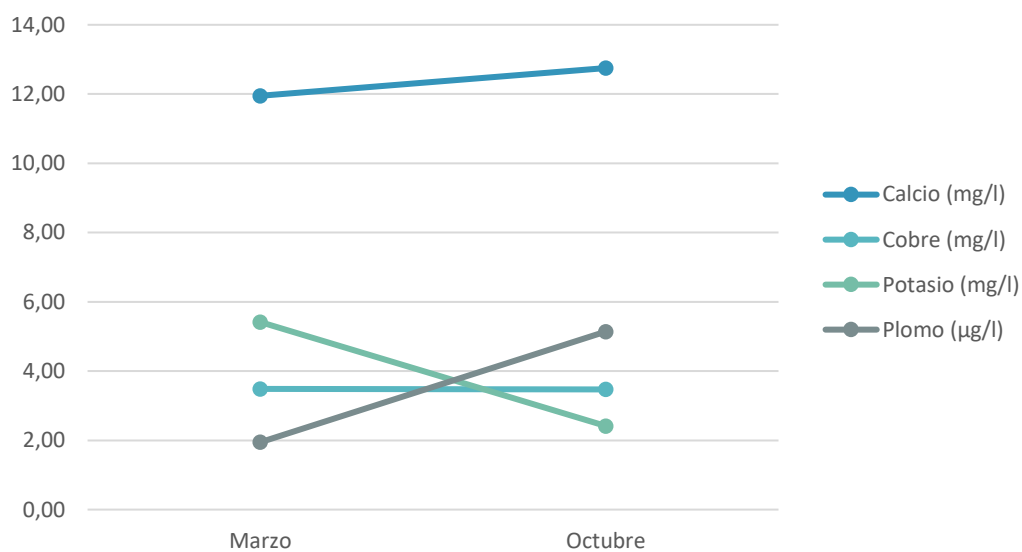
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Valores promedio mensuales de temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



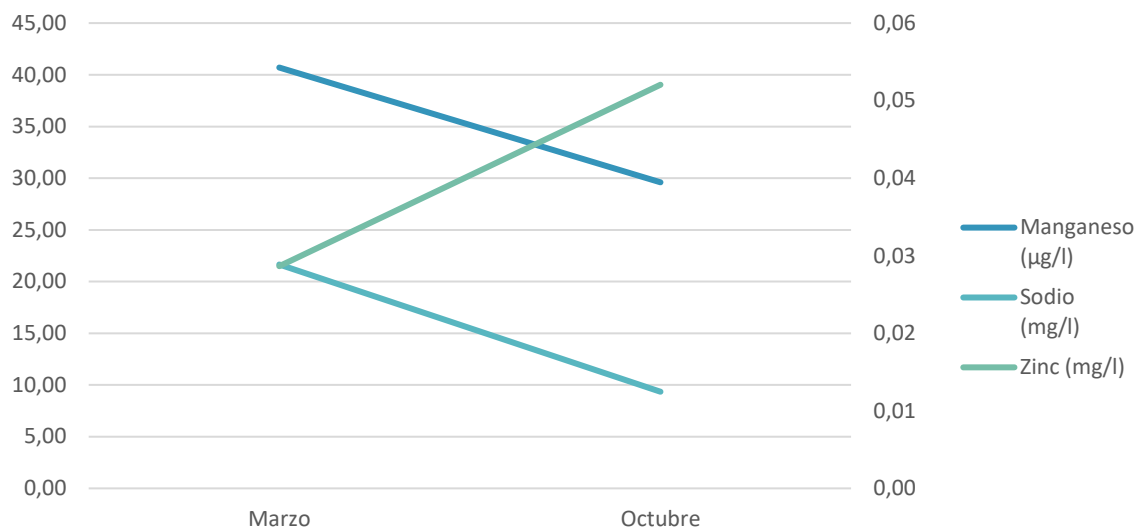
Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Valores promedio mensuales de SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



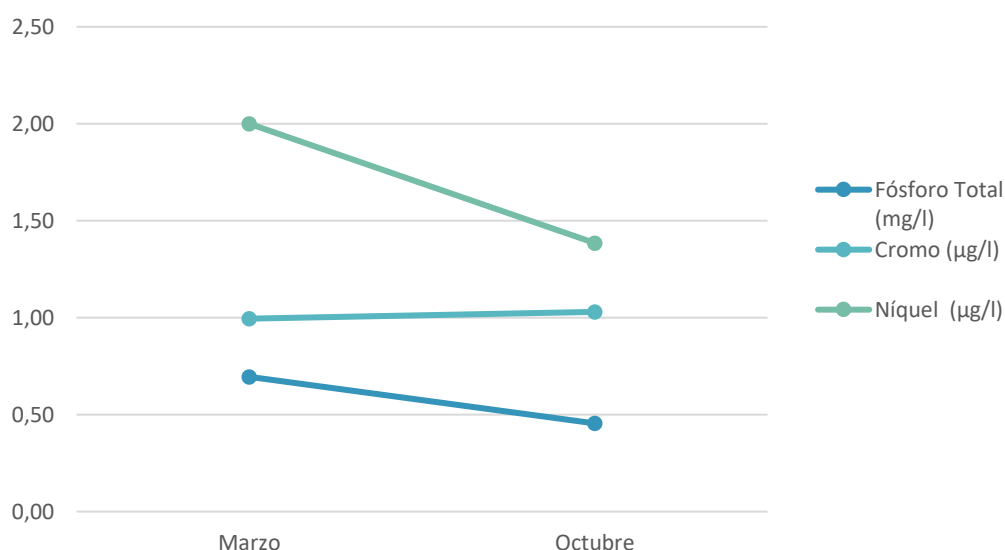
Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Valores promedio mensuales de calcio, cobre, potasio y plomo en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Valores promedio mensuales de manganeso, sodio y zinc en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Valores promedio mensuales de fósforo total, cromo y níquel en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022

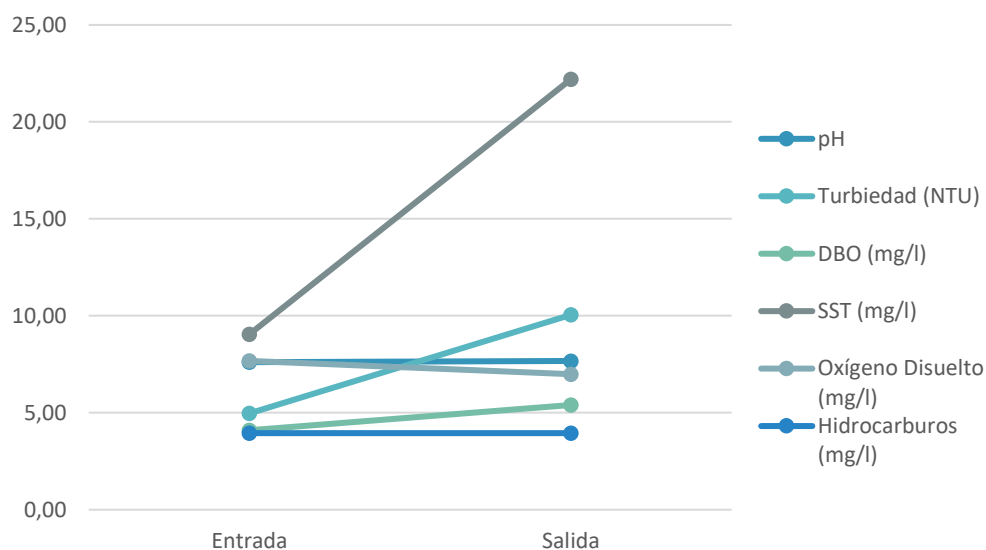
Al igual que en Quebrada Seca, en río Segundo la mayoría de los parámetros se observan con concentraciones más elevadas en la época seca (marzo), y disminuyen para la época lluviosa (octubre), lo que marca una tendencia decreciente en el comportamiento de los parámetros analizados. Este comportamiento, como se explicó anteriormente, responde al

hecho de que, durante la época lluviosa, el incremento en la frecuencia e intensidad de las lluvias produce un aumento en el caudal del río y su nivel, lo que a su vez genera un efecto de dilución de las concentraciones aparentes de los contaminantes en el cuerpo de agua. Únicamente ocho parámetros presentan un comportamiento de aumento en la época lluviosa.

Los parámetros con un aumento en época lluviosa fueron los metales como el zinc, el plomo, calcio, cadmio y el aluminio, también se registró en los sólidos suspendidos totales, el nitrógeno total y los hidrocarburos. Este último parámetro y algunos metales (hidrocarburos) presentaron un aumento debido al incremento de la escorrentía superficial, la infiltración de suelos contaminados y el desbordamiento de los sistemas de alcantarillado que generaron las intensas lluvias en esta época en 2022.

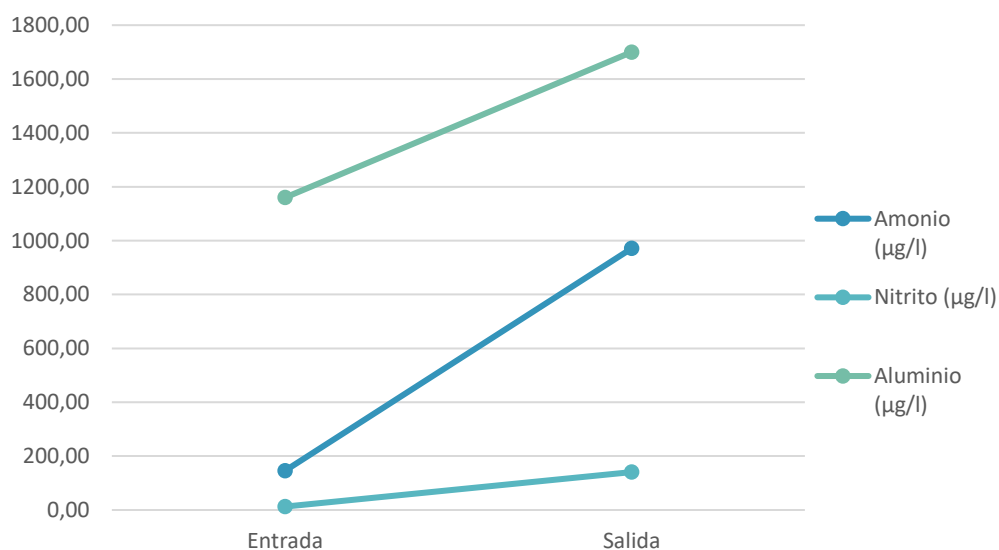
Durante la época de lluvias, las precipitaciones lavan la superficie de la tierra, arrastrando todo tipo de contaminantes, incluyendo hidrocarburos, desde carreteras, estacionamientos, áreas industriales y urbanas hacia los sistemas de drenaje y, finalmente, a los ríos. Esto puede incluir aceites de motor derramados en carreteras, combustibles fugitivos de vehículos, desechos industriales y otros compuestos de hidrocarburos que se encuentran en la superficie de la tierra.

En la microcuenca del río Segundo se realizó un muestreo en dos puntos en los cuales se registró variación en algunos de los parámetros evaluados. Para ello la **Figura 23**, **Figura 24**, **Figura 25**, **Figura 26**, **Figura 27**, **Figura 28** y **Figura 29** muestran los promedios anuales por sitio de la microcuenca para cada variable en cuestión.



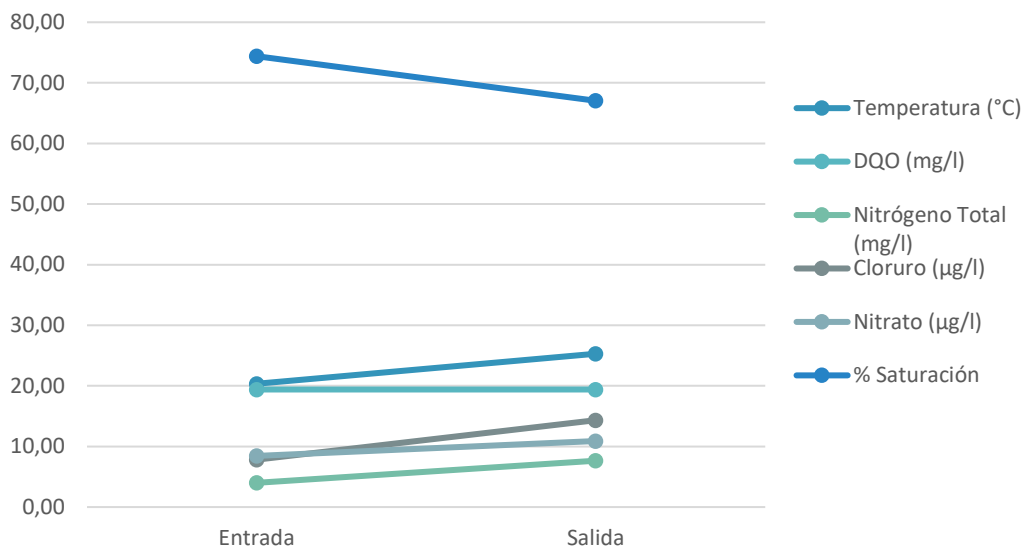
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Valores promedio anuales por sitio para pH, turbiedad, DBO, SST, Oxígeno Disuelto e hidrocarburos en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



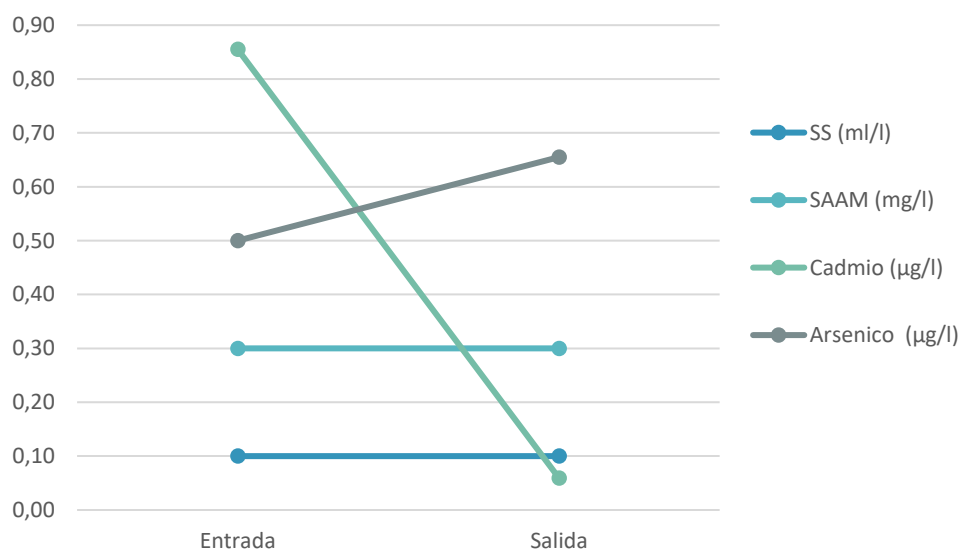
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Valores promedio anuales por sitio para amonio, nitrito y aluminio en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



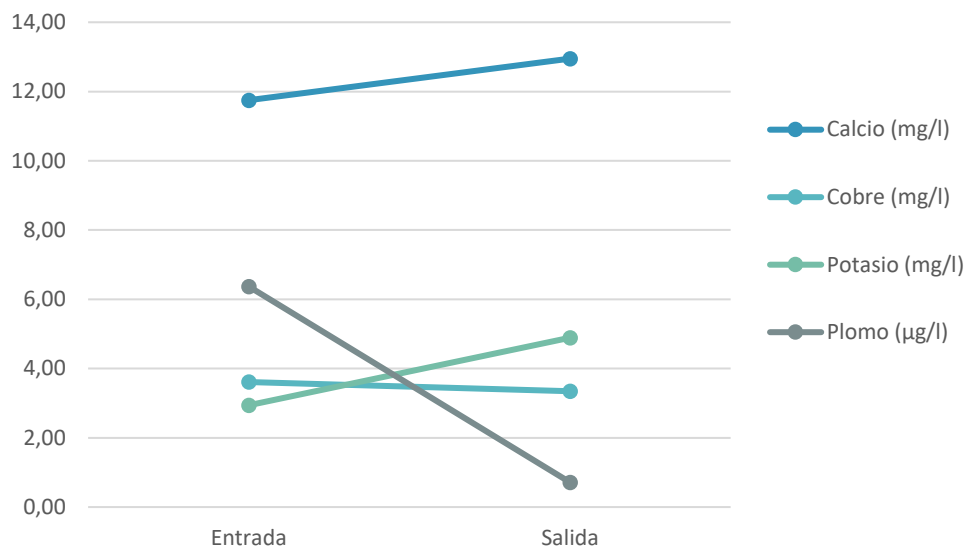
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Valores promedio anuales por sitio para temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



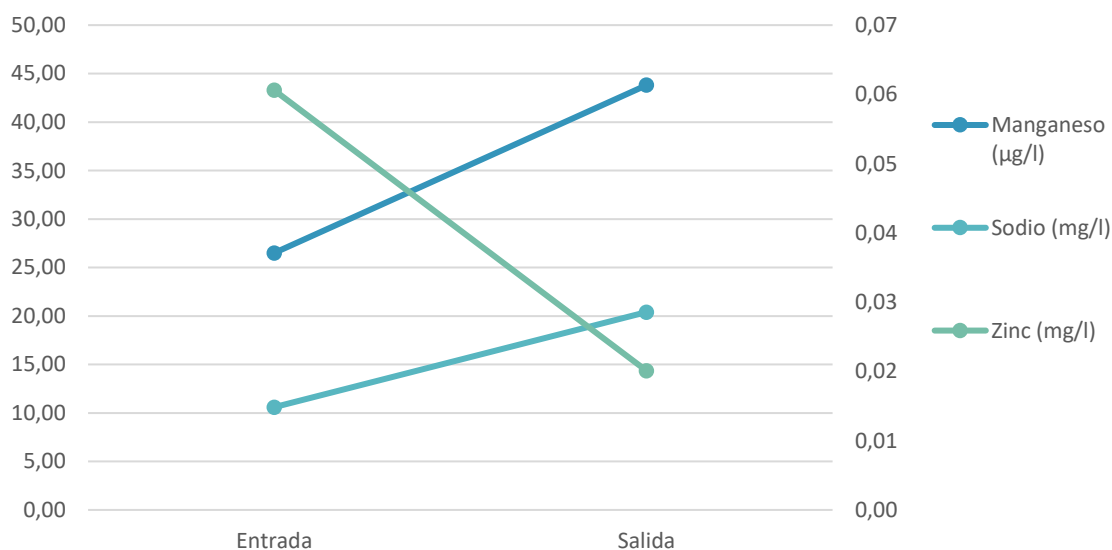
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Valores promedio anuales por sitio para SS, SAAM, Cadmio y Arsénico en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



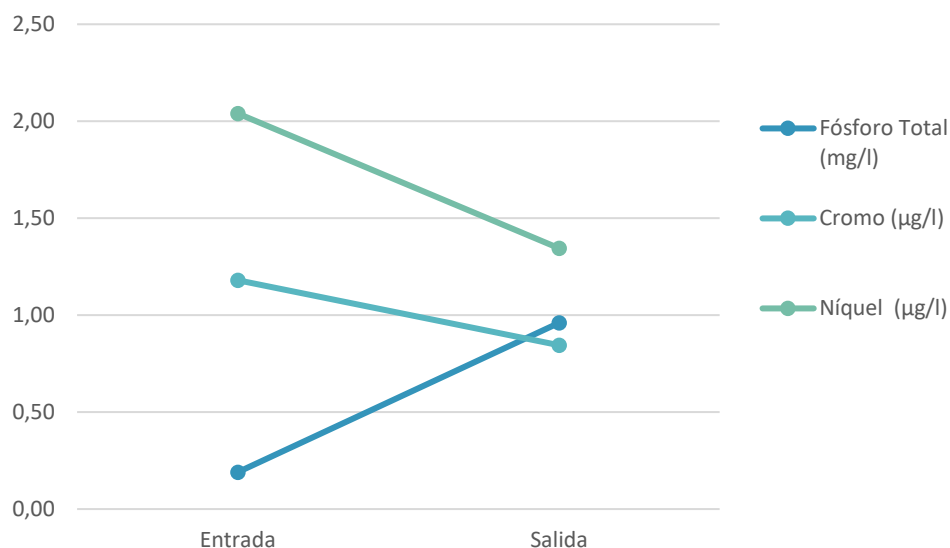
Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Valores promedio anuales por sitio para calcio, cobre, potasio y plomo en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Valores promedio anuales por sitio para manganeso, sodio y zinc en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Valores promedio anuales por sitio para fósforo total, cromo y níquel en el río Segundo, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022

En río Segundo la mayoría de las variables evaluadas presentan un aumento en la salida del río, siendo las concentraciones de amonio, fósforo total y SST los de mayor magnitud de cambio. Contrario a esto, parámetros como el cromo, níquel, zinc y cadmio mostraron una reducción de la concentración mientras que el resto de los parámetros mostró un comportamiento constante o con tendencias de aumento muy leves.

En el caso del fósforo la concentración se quintuplico en la salida del río con respecto a la entrada alcanzando un valor promedio de $0,96 \text{ mg L}^{-1}$. Los SST aumentaron su concentración 2,5 veces mientras que el amonio tuvo cambio su concentración de 145,8 en la entrada a $971,0 \text{ µg L}^{-1}$ en la salida lo que significa un incremento del 600 %. Río Segundo, a pesar de tener cerca de 55,5 hectáreas de cobertura forestal alrededor del río, tiene una influencia de la frontera agrícola muy cercana al punto de salida lo cual afecta los datos de estas variables. Específicamente en el punto de ubicación con longitud: -84,193 y latitud: 9,992 se encuentran más de 17 hectáreas de cultivos agrícolas con un posible alto uso de fertilizantes y otros productos orgánicos. Los principales cambios en la entrada y salida según la época se pueden apreciar mejor en el **Cuadro 8**.

Cuadro 8. Comparación de resultados de los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida del cuerpo de agua al cantón de Belén en dos estaciones climáticas para el río Segundo, 2022.

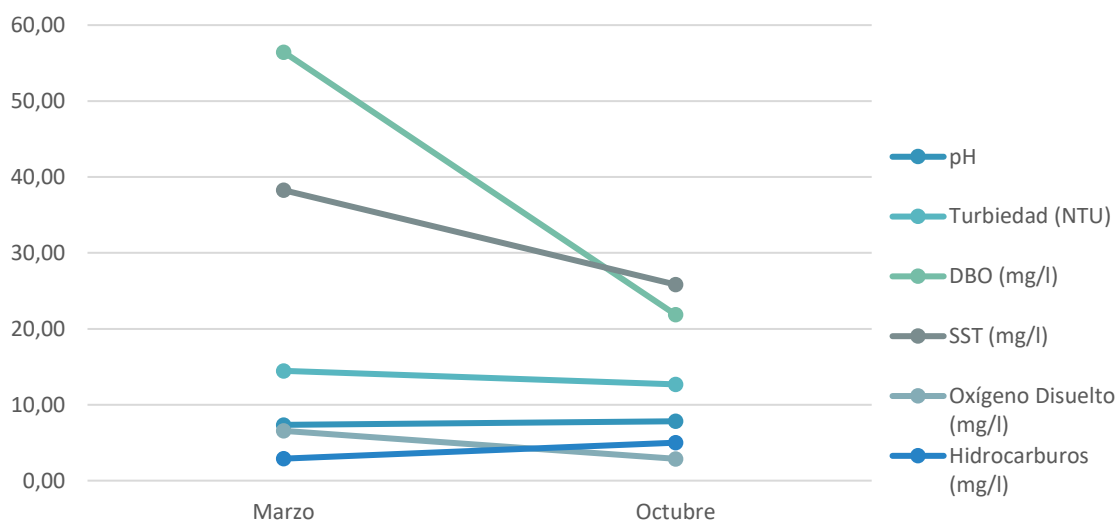
Época	Sitio	Código	pH	Turbiedad (NTU)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	Amonio (mg/L)	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	% Saturación	DQO (mg/L)	SS (mL/L)
Seca	Entrada	RSGD1	7,22	8,4	22,3	15,2	4801	24,1	7,15	80	28,71	0,1
	Salida	RSGD2	8,08	8,4	19,7	1,83	264,1	23,7	1,57	16,9	24,89	0,1
Lluviosa	Entrada	RSGD1	7,26	8,11	8,7	9,9	320,8	23,6	8,1	83,8	19,4	0,1
	Salida	RSGD2	7,28	20,9	8,2	47,7	300,6	23,6	8,33	85,7	19,8	0,6
Época	Sitio	Código	SAAM (mg/L)	P total (mg/L)	Nitrito (mg/L)	N total (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Hidrocarburos (mg/L)	Aluminio (mg/L)	Calcio (mg/L)
Seca	Entrada	RSGD1	0,4	5,6	1316	12,77	30,1	31,2	32,1	2,9	1216	17,4
	Salida	RSGD2	0,4	1,14	1079	11,3	48,6	22,9	10,28	2,9	457	25,7
Lluviosa	Entrada	RSGD1	0,4	0,72	162,43	11,3	18,4	26,9	17,43	2,9	211,1	12,78
	Salida	RSGD2	0,2	0,87	120,65	11,3	8,46	11,64	12,09	2,9	809,9	7,81
Época	Sitio	Código	Cobre (mg/L)	Manganeso (mg/L)	Potasio (mg/L)	Plomo (mg/L)	Sodio (mg/L)	Zinc (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cromo (mg/L)	Níquel (mg/L)	Arsénico (mg/L)
Seca	Entrada	RSGD1	0,16	437	7,15	1,67	75,3	0,0367	0,7	1,09	2,71	0,5
	Salida	RSGD2	0,12	198	7,9	1,45	35,2	0,0206	0,039	0,9	1,29	0,81
Lluviosa	Entrada	RSGD1	0,05	9,6	2,4	1,5	7,2	0,0845	1,01	1,27	1,37	0,5
	Salida	RSGD2	0,05	46	1,94	2	6,42	0,0196	0,0796	0,79	1,4	0,5

Fuente: Elaboración propia

4.3. Análisis de tendencias de los principales parámetros para el Río Bermúdez

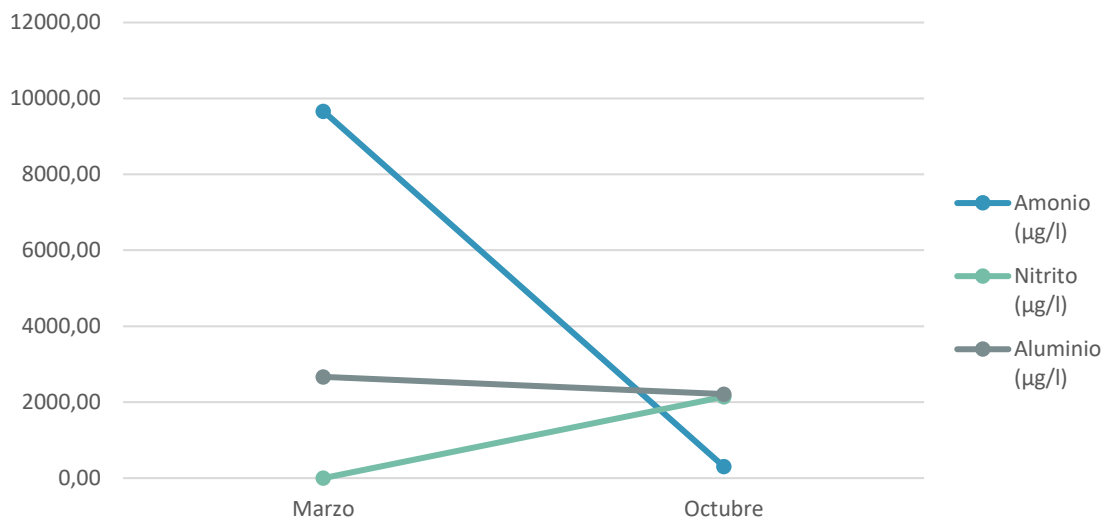
La Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 y Figura 36 muestran de manera gráfica los valores promedio mensuales para cada parámetro analizado durante el año de estudio en el río Bermúdez, con la intención de observar el comportamiento estacional y temporal de las variables.

En general se puede identificar el mismo comportamiento que los demás ríos; para el río Bermúdez la mayoría de los parámetros presentó concentraciones más elevadas en la época seca (marzo), y disminución para la época lluviosa (octubre), lo que marca una tendencia decreciente en el comportamiento de los parámetros analizados. Este comportamiento, como se explicó anteriormente, responde al hecho de que el incremento en la frecuencia e intensidad de las lluvias produce un aumento en el caudal del río y su nivel, lo que a su vez genera un efecto de dilución de las concentraciones aparentes de los contaminantes en el cuerpo de agua. Sin embargo, se observa que para los parámetros de nitritos, calcio y plomo existe un incremento de la época seca hacia la época lluviosa.



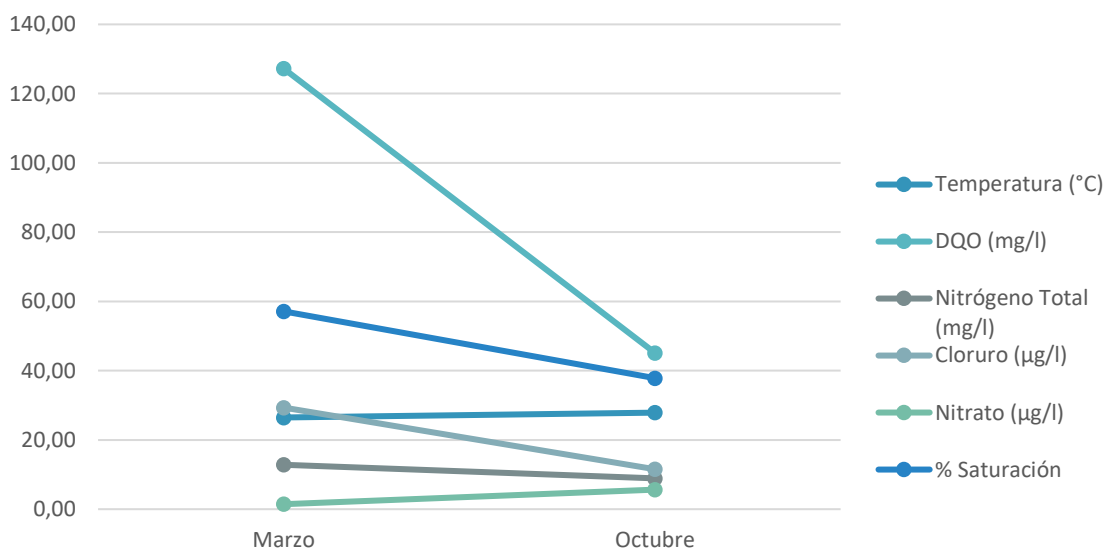
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Valores promedio mensuales de pH, DBO, SST, oxígeno disuelto e hidrocarburos en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



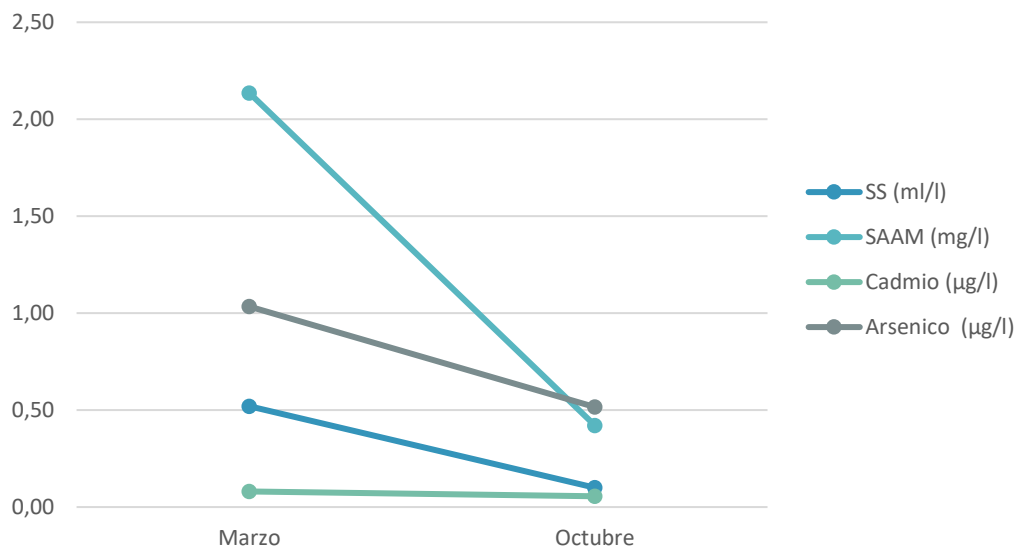
Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Valores promedio mensuales de amonio, nitrito y aluminio en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



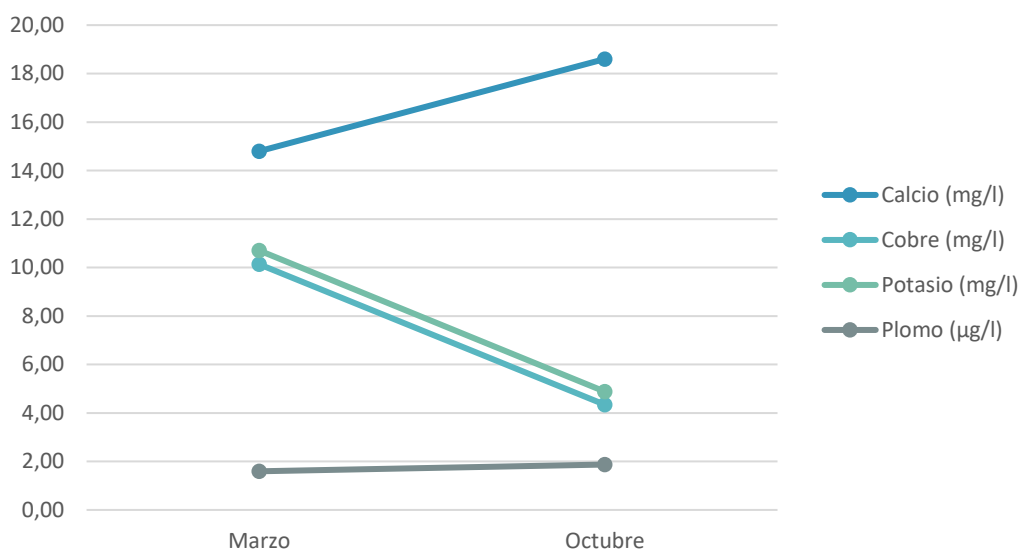
Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Valores promedio mensuales de temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación y turbiedad en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



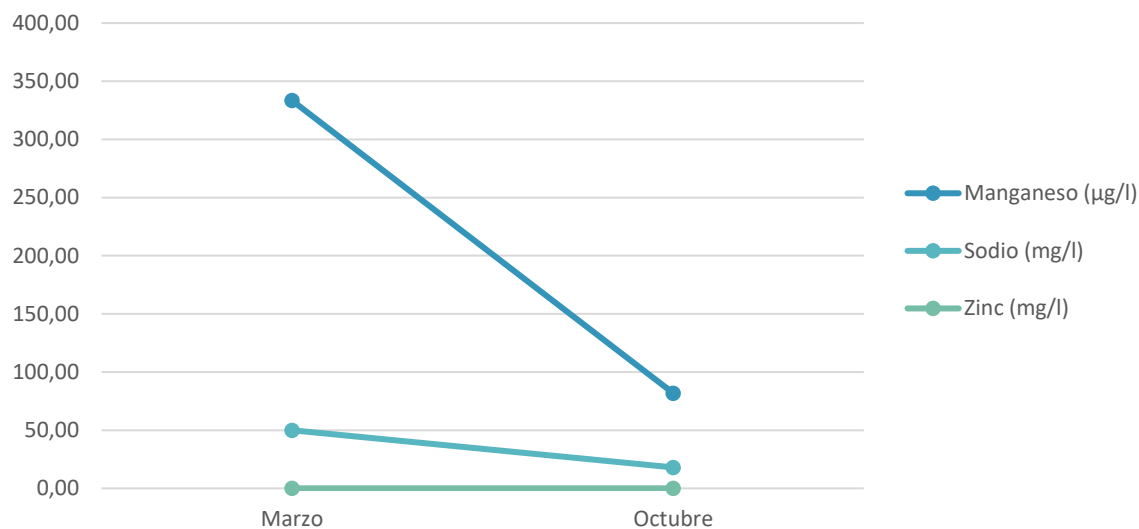
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Valores promedio mensuales de SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022.



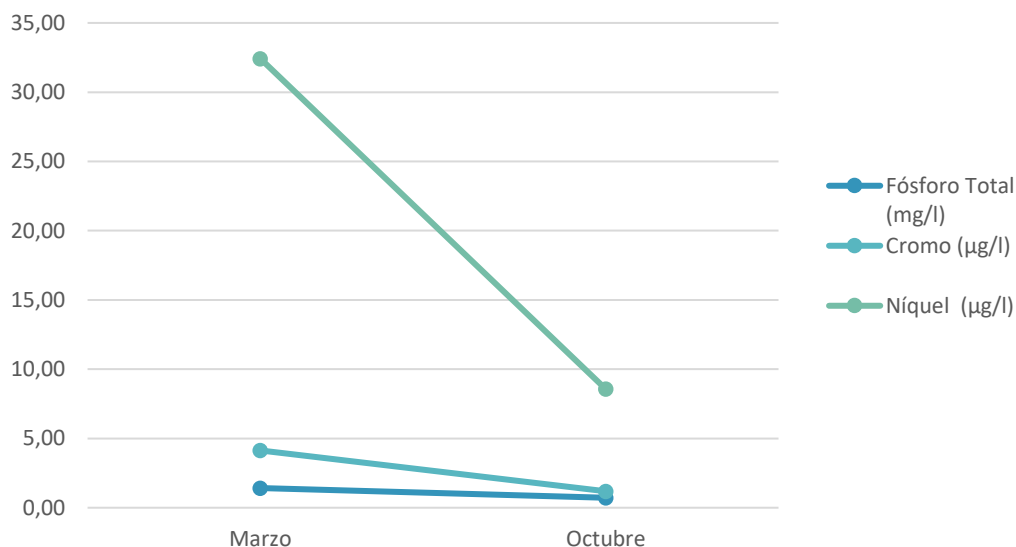
Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Valores promedio mensuales de calcio, cobre, potasio y plomo en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Valores promedio mensuales de manganeso, sodio y zinc en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022

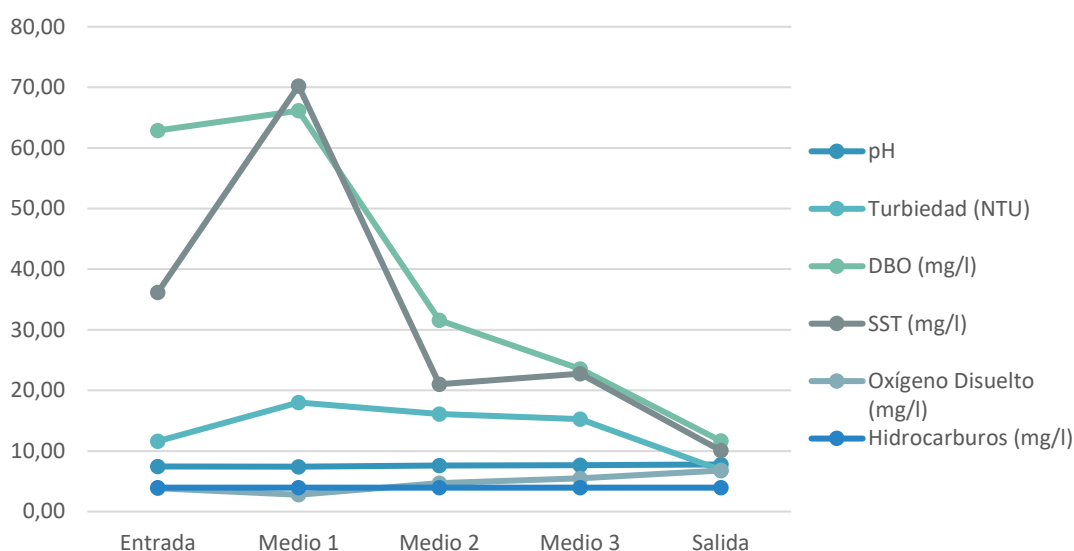


Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Valores promedio mensuales de fósforo total, cromo y níquel en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022

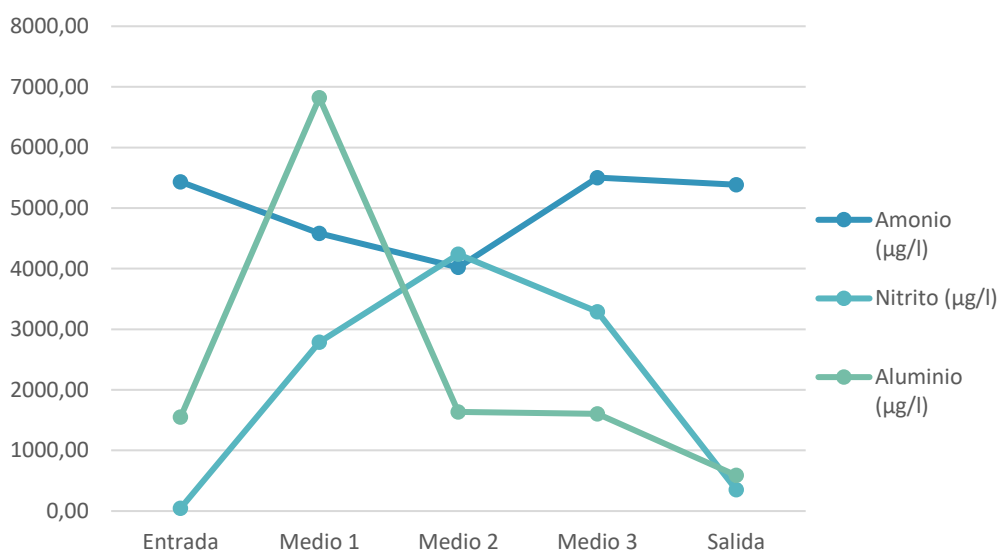
Con respecto al análisis espacial, los resultados indican un foco de contaminación en el punto medio 1 (RBMDZ1) debido a que algunos de los parámetros más importantes en calidad de aguas presentan altas concentraciones en dicho punto. En efecto, parámetros como la DBO, DQO, SST, SS, SAAM, Cu, Ni y Al muestran un pico de concentración en dicho punto. En el punto de la entrada al río también se observan picos altos de concentración de

DQO y SAAM, aunque en menor proporción con respecto a el punto medio 1 (Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 y Figura 43).



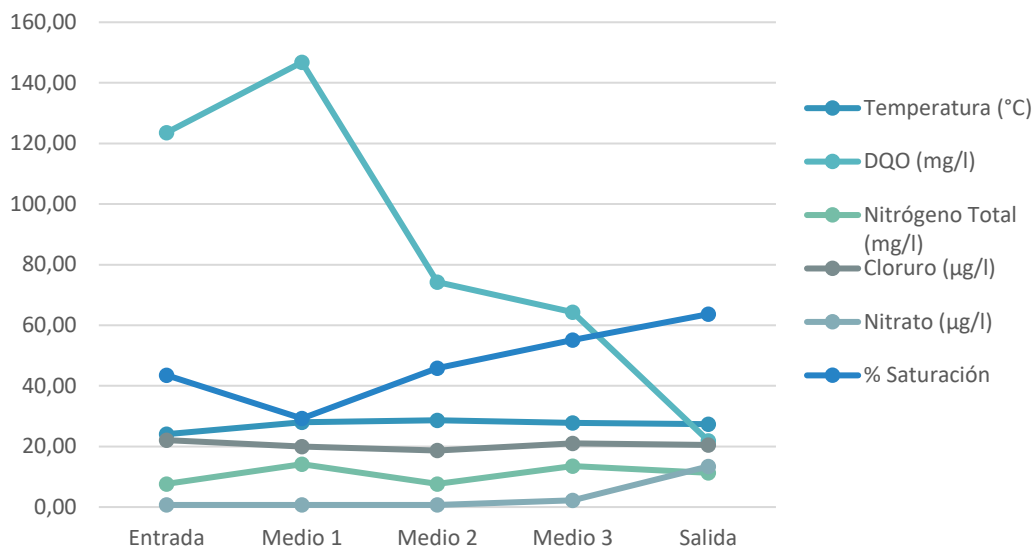
Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Valores promedio anuales por sitio para pH, DBO, SST, oxígeno disuelto, turbiedad e hidrocarburos en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



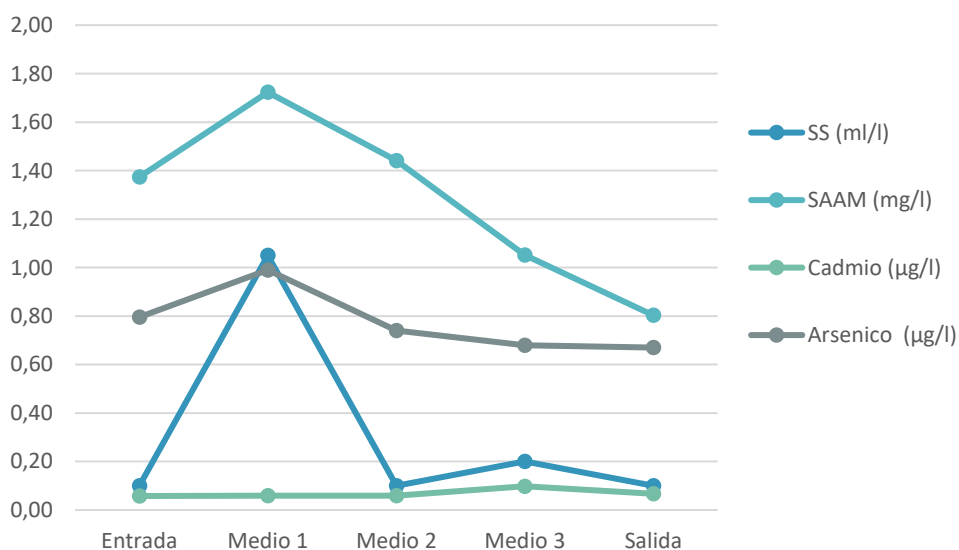
Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Valores promedio anuales por sitio para amonio, nitrito y aluminio en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



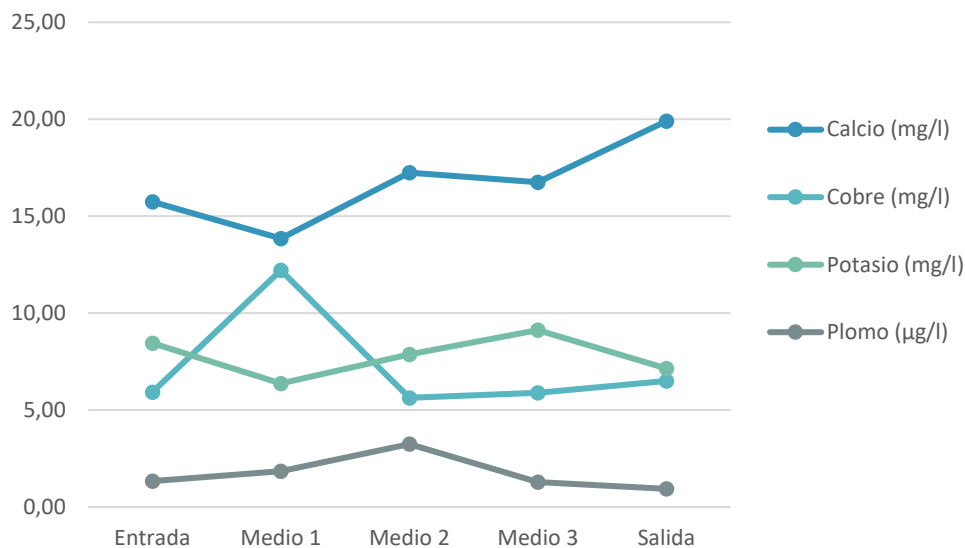
Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Valores promedio anuales por sitio para temperatura, DQO, nitrógeno total, cloruro, nitrato, porcentaje de saturación el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



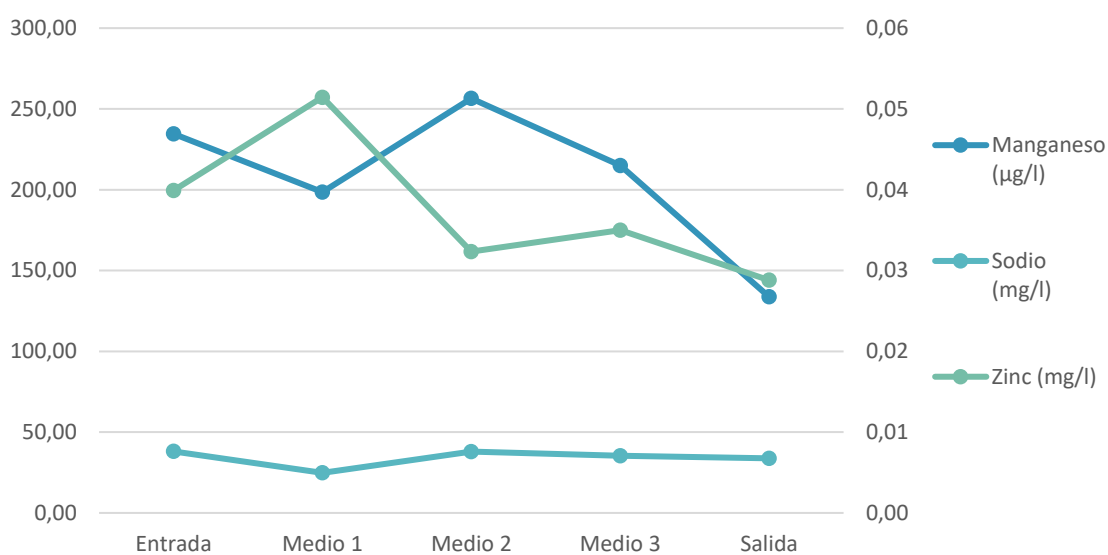
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Valores promedio anuales por sitio para SS, SAAM, cadmio y arsénico en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



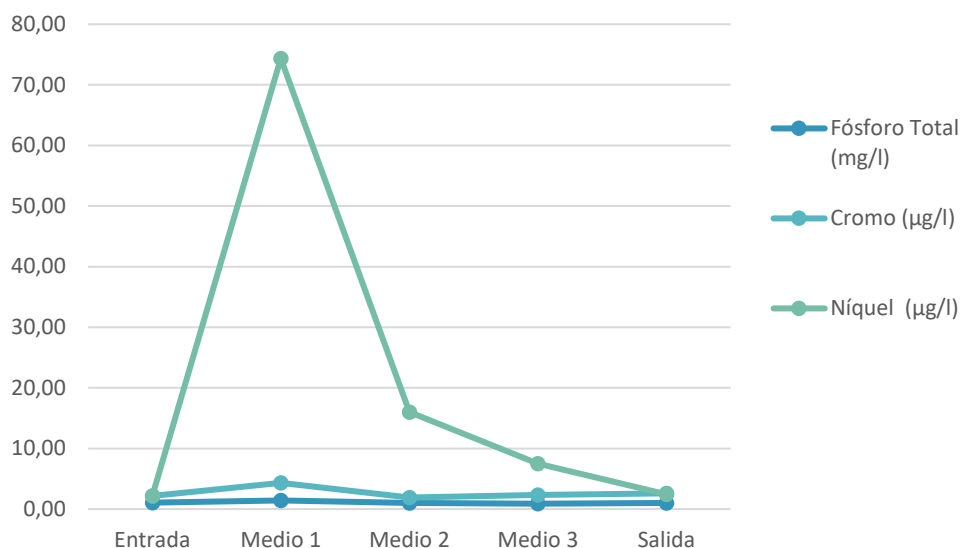
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Valores promedio anuales por sitio para calcio, cobre, potasio y plomo en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. Valores promedio anuales por sitio para manganeso, sodio y zinc en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022



Fuente: Elaboración propia.

Figura 43. Valores promedio anuales por sitio para fósforo total, cromo y níquel en el río Bermúdez, en su paso por el cantón de Belén durante el año 2022

Al analizar el tipo de uso de suelo y las áreas de influencia cercanas al río Bermúdez se puede observar áreas agrícolas en la entrada del río, zonas de pasturas destinadas a la ganadería en el punto medio 1, así como basta área urbana y muy poca cobertura forestal en la zona de protección en los márgenes del río (**Figura 1**). Según el artículo 33 de la Ley Forestal 7575 de Costa Rica debe existir una franja de protección al recurso hídrico de 10 m, por lo que la corta y deterioro de dicha área está prohibida por ley. Esta norma no se cumple completamente a la largo de la microcuenca del río Bermúdez dado que existen zonas sin cobertura forestal que son sustituidas por casas, calles y pasturas ganaderas.

Por tanto, los incrementos en los parámetros en dichos puntos son entendibles dado el aporte de contaminación antrópica al río. Los comportamientos señalados previamente se confirman con los resultados observados en el **Cuadro 9** que muestra los valores de los parámetros a la entrada y salida del cantón para el río Bermúdez en cada una de las épocas climáticas, señalando en rojo cuando el valor a la salida es mayor que en la entrada, indicativo del aporte de contaminación antrópico.

Cuadro 9. Comparación de resultados de los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida del cuerpo de agua al cantón de Belén en dos estaciones climáticas para el río Segundo, 2022.

Época	Sitio	Código	pH	Turbiedad (NTU)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	Amonio (mg/L)	Temp. (°C)	OD (mg/L)	% Saturación	DQO (mg/L)	SS (mL/L)
Seca	Entrada	RBMDZ1	7,13	18,80	91,90	33,90	10614,00	23,80	4,37	37,00	182,60	0,10
	Salida	RBMDZ5	7,56	10,2	21,3	15,9	10536	25,8	8,79	77	24,43	0,1
Lluviosa	Entrada	RBMDZ1	7,80	4,46	33,9	38,4	253	24,3	3,31	50,1	64,6	0,1
	Salida	RBMDZ5	8	3,54	2	4,22	233,2	29	4,76	50,3	19,4	0,1
Época	Sitio	Código	SAAM (mg/L)	P total (mg/L)	Nitrito (mg/L)	N total (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Hidrocarburos (mg/L)	Aluminio (mg/L)	Calcio (mg/L)
Seca	Entrada	RBMDZ1	2,547	1,36	-	11,3	34,4	0,48	40,7	2,9	729	15,7
	Salida	RBMDZ5	1,406	1,3	-	11,3	27,8	3,09	36,9	2,9	524	16,7
Lluviosa	Entrada	RBMDZ1	0,2	0,72	48,1	4	9,79	0,92	17,6	5	2376	15,8
	Salida	RBMDZ5	0,2	0,72	352,2	11,3	13,12	23,7	15,92	5	654	23,1
Época	Sitio	Código	Cobre (mg/L)	Manganeso (mg/L)	Potasio (mg/L)	Plomo (mg/L)	Sodio (mg/L)	Zinc (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cromo (mg/L)	Níquel (mg/L)	Arsénico (mg/L)
Seca	Entrada	RBMDZ1	7,02	381	12	1,8	54,8	0,0492	0,0618	2,81	2,54	1,09
	Salida	RBMDZ5	10,3	251	10,7	1,32	52,8	0,0345	0,0682	4,41	3,34	0,84
Lluviosa	Entrada	RBMDZ1	4,83	88	4,9	0,86	21,3	0,0306	0,0533	1,52	1,83	0,5
	Salida	RBMDZ5	2,72	16,4	3,58	0,56	14,8	0,0231	0,0659	0,734	1,49	0,5

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del **Cuadro 9** muestran que 21 de los 30 parámetros evaluados presentan incrementos en la salida del río del cantón lo cual advierte la alta influencia de las actividades antropogénicas a la calidad del agua en los ríos. El 30 % de estos parámetros mostraron cambio tanto en época seca como en época lluviosa indicando que la contaminación es constante e indiferente a la época del año.

4.4 Metodología del Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Fisicoquímica del Agua

Para la evaluación y clasificación de los cuerpos de aguas superficiales, el Decreto Ejecutivo N° 33903-MINAE-S (2007) establece que una de las metodologías a utilizar es la Metodología del Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Fisicoquímica del Agua, la cual establece la asignación de un puntaje a partir de los parámetros de DBO, nitrógeno amoniacal y oxígeno disuelto (expresado como porcentaje de saturación) tal como se muestra en el **Cuadro 10**.

Cuadro 10. Asignación de puntajes según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Fisicoquímica del Agua.

Puntos	PSO (%)	DBO (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)
1	91 – 100	≤ 3	< 0,50
2	71 – 90 111 – 120	3,1 – 6,0	0,50 – 1,0
3	51 – 70 121 – 130	6,1 – 9,0	1,1 – 2,0
4	31 – 50	9,1 – 15	2,1 – 5,0
5	≤ 30 y > 130	> 15	> 5,0

Fuente: (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007)

Cuadro 11. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Fisicoquímica del Agua por codificación de colores.

Clase	Sumatoria de puntos	Código de color	Interpretación de calidad
1	3	Azul	Sin contaminación
2	4 – 6	Verde	Contaminación Incipiente
3	7 – 9	Amarillo	Contaminación moderada
4	10 – 12	Anaranjado	Contaminación severa
5	13 – 15	Rojo	Contaminación muy severa

Fuente: (Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, 2007)

Posteriormente se procede a realizar la sumatoria de los puntos asignados a cada parámetro y el total se correlaciona con un código de color el cual está asociado a un nivel de contaminación respectivo, tal como se muestra en el **Cuadro 11**.

Los resultados de esta evaluación indican que el río más contaminado es el Bermúdez con un valor promedio del índice holandés de 11 que clasifica el río con una severa contaminación, situación que se agrava en la época seca al tener una muy severa contaminación. En el caso de Quebrada seca la clasificación de la contaminación se ubica entre incipiente y moderada mientras que río Segundo fue la cuenca con la menor contaminación entre los tres cuerpos de agua (**Cuadro 12**). La alta contaminación mostrada en el río Bermúdez puede matar o dañar gravemente a la vida acuática, incluidos peces, invertebrados acuáticos y plantas. Además, imposibilita el uso del recurso hídrico generando impactos ambientales y sociales deteriorando el bienestar humano.

Las principales problemáticas asociadas al grado de contaminación en el río Bermúdez son la escasa cobertura forestal alrededor de los márgenes del río lo cual impide que exista protección al recurso hídrico, el efecto de actividades agrícolas y ganaderas, y la alta densidad poblacional. Por ejemplo, en el punto RBMDZ1 de muestreo se observa la influencia de cultivos agrícolas cerca del río que genera contaminantes nitrogenados por el uso de fertilizantes (**Figura 44**). Caso contrario se observa en río Segundo donde existe mayor cobertura forestal que protege al río reduciendo el grado de contaminación. También es evidente que el cantón de Belén es altamente urbano con presencia de industrias y una alta densidad poblacional.

Cuadro 12. Clasificación de los puntos muestreados según el Sistema Holandés.

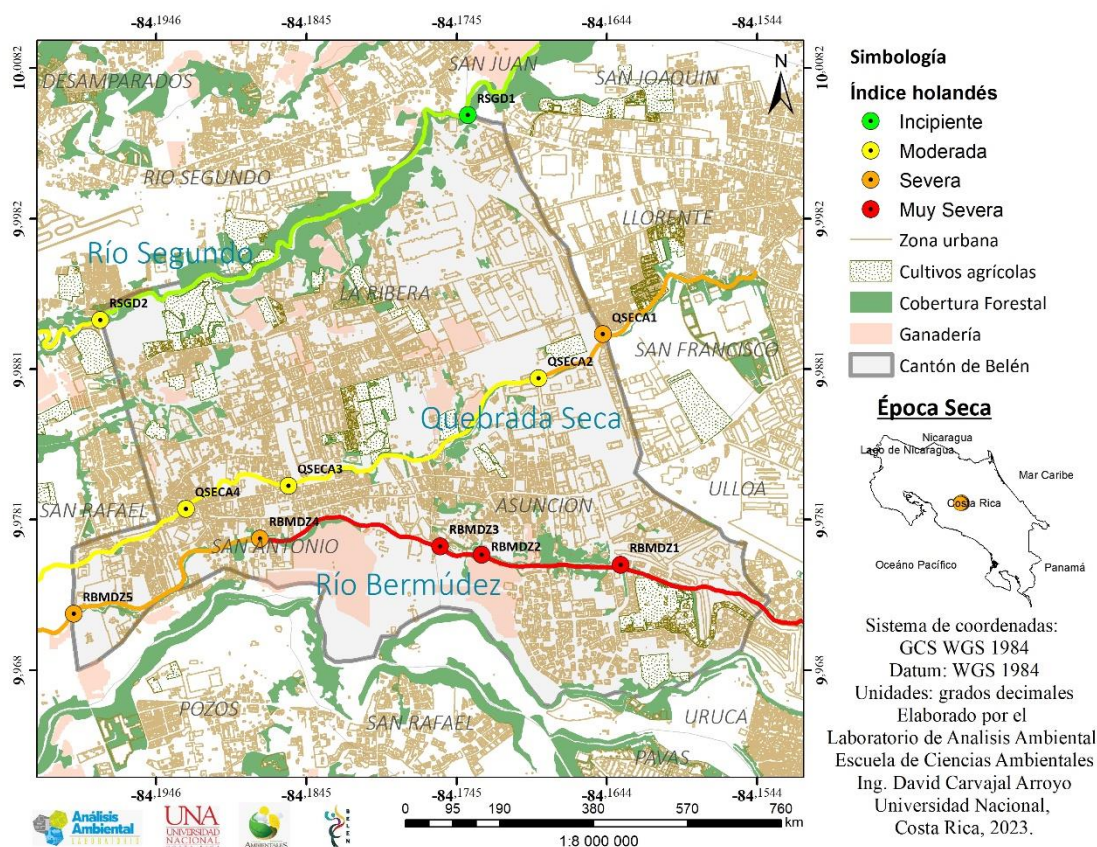
Época	Código	PSO (%)	% saturación	DBO del agua	Asignación puntos para DBO	N amoniacal	Puntaje N amoniacal	Total	Clase	interpretación de calidad
Seca	QSECA1	76,7	2	12,8	4	2,52	4	10	4	Severa
Lluviosa	QSECA1	54,4	3	2	1	0,51	2	6	2	Incipiente
Seca	QSECA2	76,6	2	14,1	4	1,80	3	9	3	Moderada
Lluviosa	QSECA2	66,6	3	2	1	0,36	1	5	2	Incipiente
Seca	QSECA3	81,6	2	9	3	0,90	2	7	3	Moderada
Lluviosa	QSECA3	77	2	2	1	0,23	1	4	2	Incipiente
Seca	QSECA4	83	2	8,2	3	0,80	2	7	3	Moderada
Lluviosa	QSECA4	61,4	3	0,01	1	0,22	1	5	2	Incipiente
Seca	RSGD1	78,8	2	6,2	3	0,13	1	6	2	Incipiente
Lluviosa	RSGD1	70	3	2	1	0,10	1	5	2	Incipiente
Seca	RSGD2	79,8	2	6,1	3	1,05	3	8	3	Moderada
Lluviosa	RSGD2	54,3	3	4,7	2	0,46	1	6	2	Incipiente
Seca	RBMDZ1	37	4	91,9	5	8,26	5	14	5	Muy Severa
Lluviosa	RBMDZ1	50,1	4	33,9	5	0,20	1	10	4	Severa
Seca	RBMDZ2	35,8	4	104,2	5	6,66	5	14	5	Muy Severa
Lluviosa	RBMDZ2	22,7	5	28,1	5	0,47	1	11	4	Severa
Seca	RBMDZ3	62,7	3	38,9	5	6,06	5	13	5	Muy Severa
Lluviosa	RBMDZ3	29	5	24,2	5	0,20	1	11	4	Severa
Seca	RBMDZ4	73,1	2	26	5	8,42	5	12	4	Severa
Lluviosa	RBMDZ4	37,1	4	21,1	5	0,14	1	10	4	Severa
Seca	RBMDZ5	77	2	21,3	5	8,19	5	12	4	Severa
Lluviosa	RBMDZ5	50,3	4	2	1	0,18	1	6	2	Incipiente

Fuente: Elaboración propia

En todos los ríos evaluados se observó un efecto positivo en la calidad del recurso hídrico al aumentar las precipitaciones en la época lluviosa, según las clasificaciones obtenidas del índice holandés. Esto es producto del aumento de la capacidad de autodepuración del río y de la dilución de contaminantes orgánicos al aumentar el caudal. Este efecto es muy notorio en Quebrada Seca que en época seca presentó partes de la cuenca con contaminación severa en las partes altas y

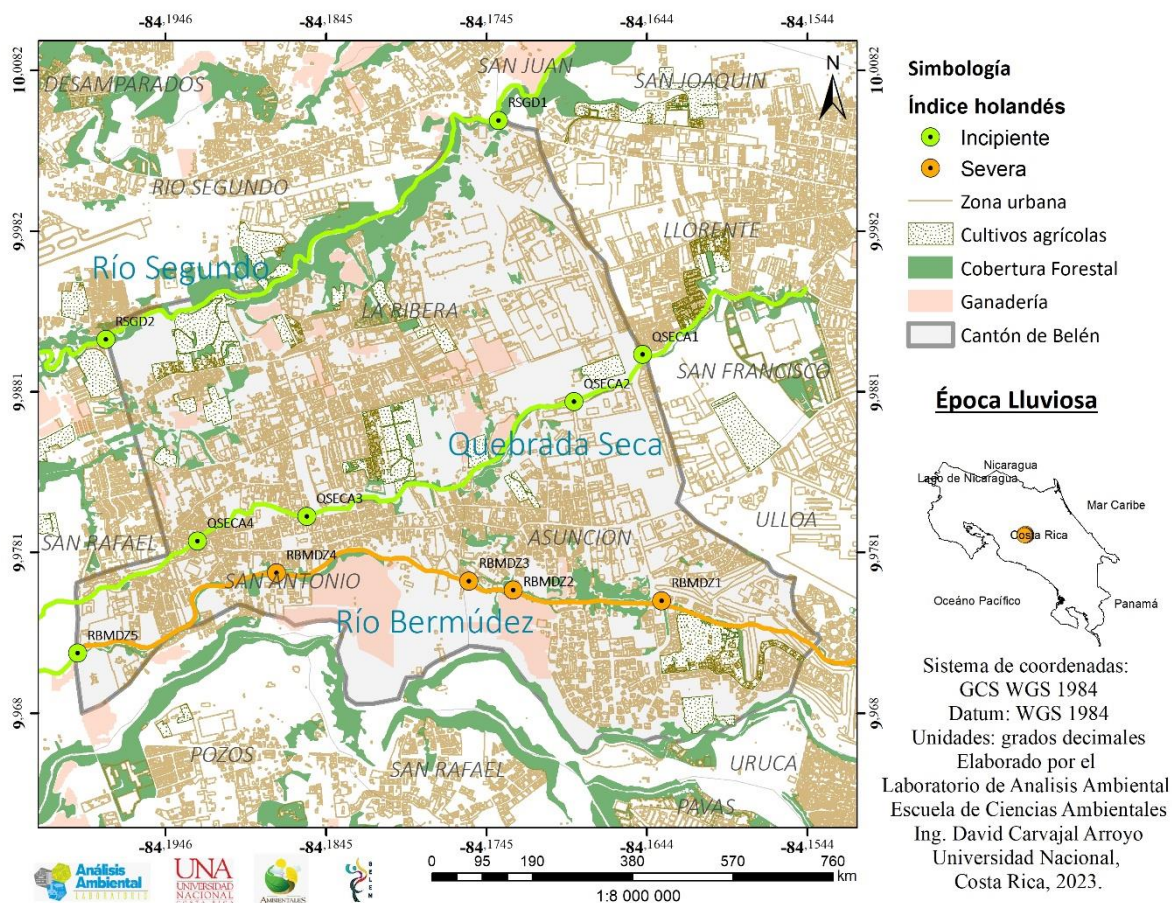
moderadas en la media y baja (**Figura 44**) mientras que para la época lluviosa (octubre) toda la cuenca presentó una contaminación incipiente (**Figura 45**).

En el río con mayor índice de contaminación (Bermúdez) también es evidente el efecto de la época lluviosa en la calidad del agua cambiando de categoría de contaminación muy severa en época seca a una severa en época lluviosa en los primeros tres puntos de monitores (RBMDZ1, RBMDZ2 y RBMDZ3). En esta cuenca el único punto que no redujo el grado de contaminación fue el RBMDZ4 que mantuvo una contaminación severa tanto en época seca como lluviosa. Esta situación podría ser debido a un alto arrastre de contaminantes en dicho punto, así como de vertidos sin tratamiento al río.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Interpretación de la calidad del agua según el Sistema Holandés en la campaña de muestreo de marzo 2022 (época seca)



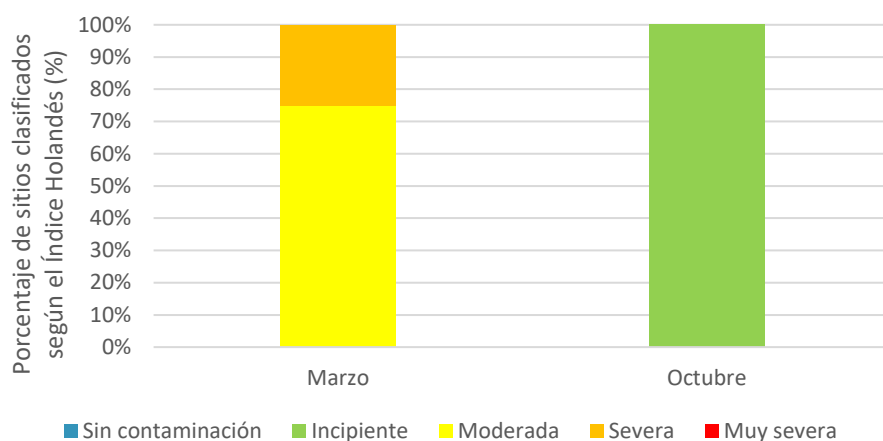
Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Interpretación de la calidad del agua según el Sistema Holandés en la campaña de muestreo de octubre 2022 (época lluviosa)

Otro ejercicio que ayuda a visualizar mejor el estado de cada microcuenca estudiada es señalar el porcentaje de sitios en cada rango de contaminación definida por campaña de acuerdo con el Sistema Holandés, de manera que se pueda conocer el comportamiento temporal, así como la cantidad de sitios en un nivel de contaminación dado para las diferentes partes de la microcuenca lo que permite observar el comportamiento espacial.

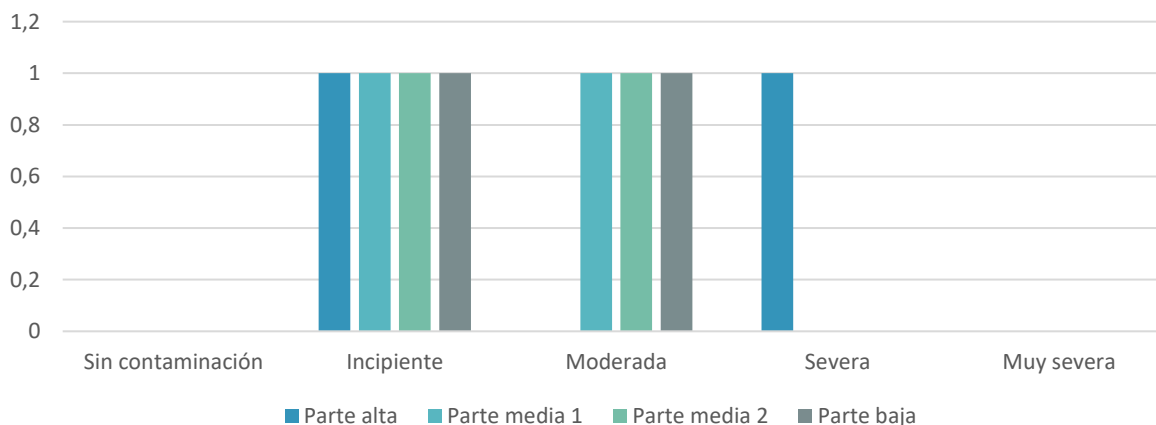
En el río Quebrada Seca durante la época seca el 75 % de los sitios evaluados tuvieron una calificación, según el índice holandés, de contaminación moderada mientras que en época lluviosa todos los sitios presentaron una contaminación incipiente. Únicamente uno de los cuatro sitios presentó contaminación severa y fue en el mes de marzo (**Figura 46**). En términos espaciales, se registró contaminación incipiente en todas las partes de la cuenca mientras que la contaminación

moderada se registró en el 75 % de los puntos muestreados. El único registro de contaminación moderada en Quebrada Seca fue en la entrada o parte alta (Figura 47).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46. Porcentaje de sitios clasificados según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para cada campaña de muestreo en el río Quebrada Seca, 2022

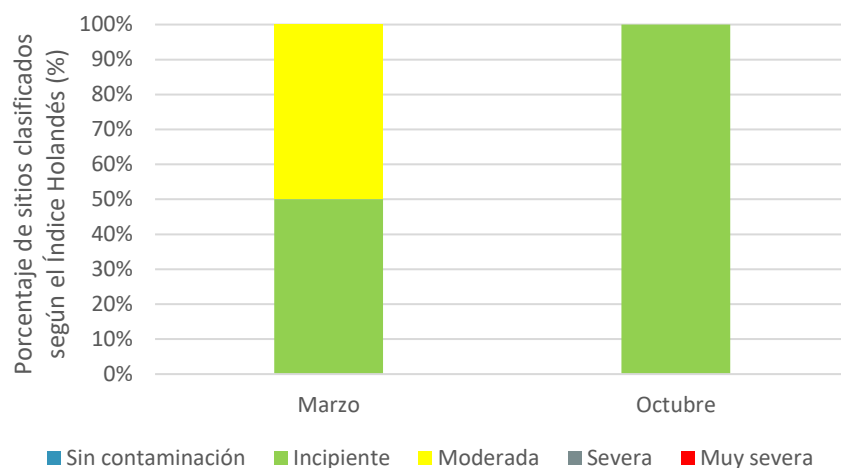


Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Cantidad de clasificaciones según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para las diferentes partes de la microcuenca en el río Quebrada Seca, 2022

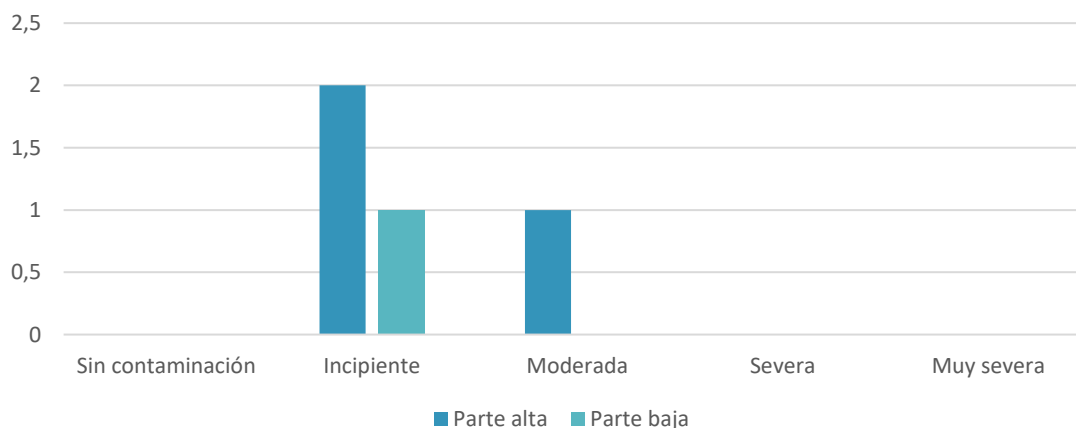
De igual manera, la **Figura 48**, **Figura 49** y muestran los resultados de comportamiento espacial y temporal arrojados por el Sistema Holandés para el río Segundo. En la época lluviosa el 100 % de los puntos presento una contaminación incipiente mientras que en época seca el 50 % tuvieron este grado de contaminación. El restante 50 % de los puntos en época seca fueron categorizados con contaminación moderada por lo que se concluye la baja contaminación que presenta en

general esta cuenca. En la parte alta la categoría siempre fue incipiente mientras que en la baja varió entre incipiente y moderada. Una limitante que presenta el monitoreo de esta microcuenca es que solo cuenta con dos sitios de muestreo, lo que limita el establecimiento de tendencias espaciales, además de limitar el análisis sobre el comportamiento en la sección media de la microcuenca en su paso por el cantón.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 48. Porcentaje de sitios clasificados según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para cada campaña de muestreo en el río Segundo

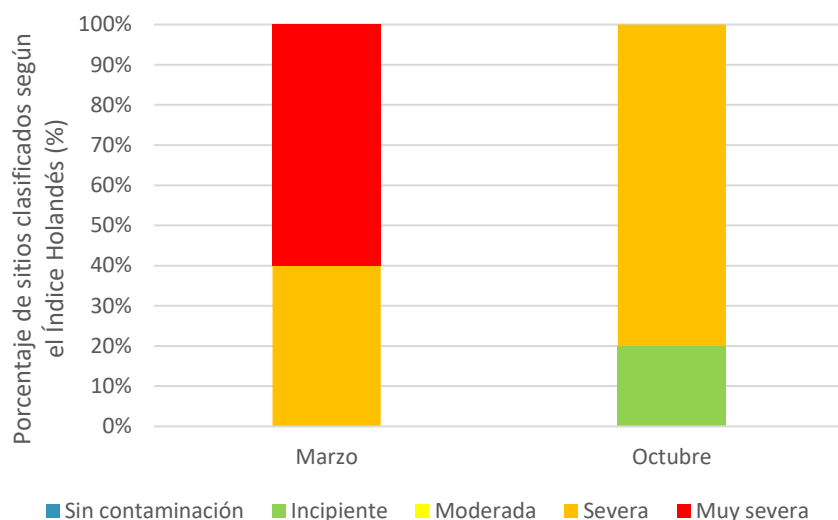


Fuente: Elaboración propia.

Figura 49. Cantidad de clasificaciones según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para las diferentes partes de la microcuenca en el río Segundo, 2022

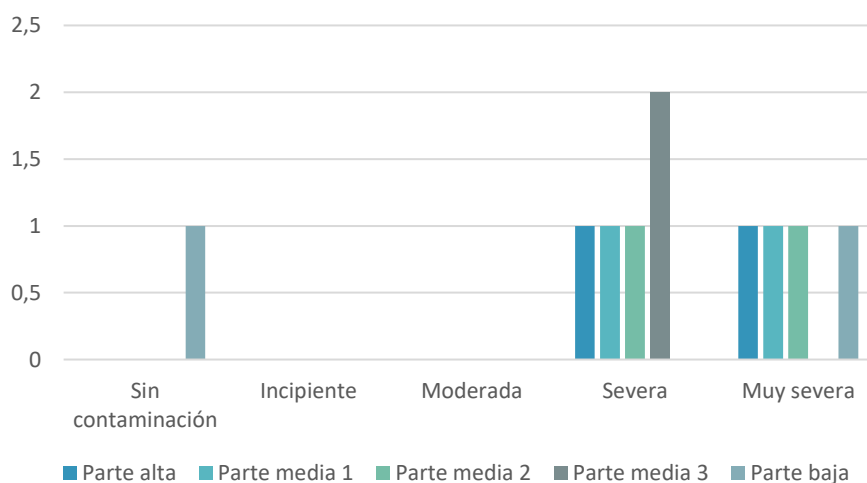
En el caso del río Bermúdez, que presentó el mayor grado de contaminación, la **Figura 50** indica que en época seca el 60 % de los puntos se clasificó como contaminación muy severa mientras

que el 40 % fue severa. Con la influencia de las precipitaciones en la época lluviosa las categorías cambiaron presentando un 80 % de contaminación severa y un 20 % fue incipiente. El tipo de contaminación severa se presentó en todas las partes de la cuenca a excepción de la salida (parte baja). Similar sucedió con la contaminación muy severa que se presentó en casi todos los puntos monitoreados a excepción de la parte media 3.



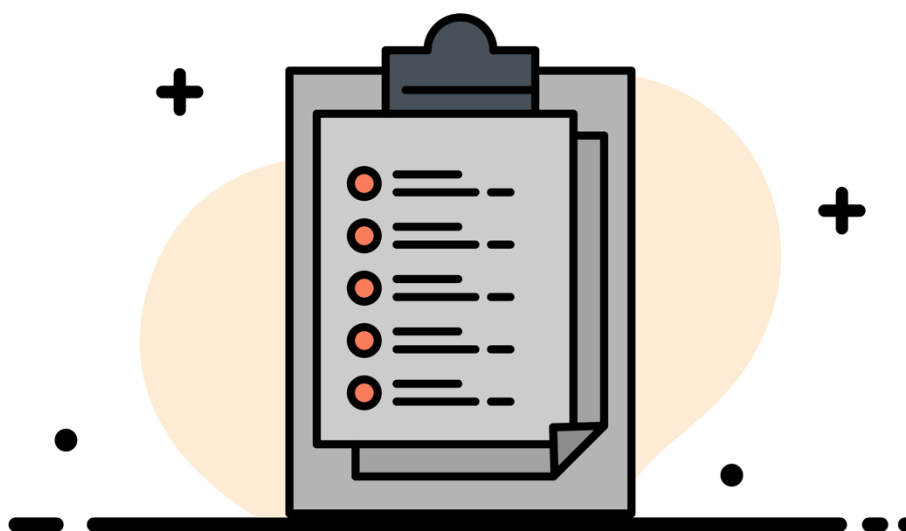
Fuente: Elaboración propia.

Figura 50. Porcentaje de sitios clasificados según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para cada campaña de muestreo en el río Bermúdez



Fuente: Elaboración propia.

Figura 51. Cantidad de clasificaciones según el nivel de contaminación de acuerdo con el Sistema Holandés para las diferentes partes de la microcuenca en el río Bermúdez, 2022



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- De acuerdo con los resultados promedio anuales obtenidos para los parámetros complementarios, las cuencas en estudio se ubican mayoritariamente entre las clases 1 y 2 del artículo 7 del Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S para la mayoría de los parámetros, lo que define una mayor posibilidad de usos.
- Los parámetros de DQO, SAAM y SST que se relacionan con las cargas orgánicas presentan clasificaciones más elevadas con respecto al uso definido en el artículo 7 del Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S, oscilando entre clase III y V con usos restringidos y requerimiento de tratamientos avanzados o imposibilidad del uso según sea el caso.
- Todos los ríos evaluados presentan una reducción de la concentración en la mayoría de los parámetros evaluados debido al efecto de dilución que provoca el aumento de las precipitaciones durante la época lluviosa; sin embargo, parámetros como el calcio, fósforo total, los nitratos, nitritos, el nitrógeno total, SST y los hidrocarburos presentaron un incremento en la concentración en época lluviosa (octubre).
- El aumento generalizado durante la época lluviosa de fósforo total, los nitratos, nitritos, el nitrógeno total, SST y los hidrocarburos es debido a la escorrentía superficial, lixiviación y arrastre de materiales orgánicos e inorgánicos que generan las intensas lluvias.
- En los puntos de los ríos con influencia directa, de actividades agrícolas y ganaderas, así como menor cobertura forestal alrededor del río, existen picos de concentración fósforo total, los nitratos, nitritos, el nitrógeno total debido al alto uso de fertilizantes y la generación de residuos orgánicos.
- Los efectos de las actividades antrópicas se reflejan en la salida del río Bermúdez al aumentar las concentraciones del 70 % de los parámetros evaluados mientras que en Quebrada Seca el aumento fue en el 25 %; en río Segundo el cambio en la salida fue del 30 % de los parámetros evaluados.
- El comportamiento espacial para el río en Quebrada Seca muestra una ligera estabilidad en la mayoría de sus puntos, aunque parámetros como la turbiedad, el amonio, los SAAM y el cromo, que están relacionados con vertidos domésticos mostraron un aumento en los puntos Qseca1 y Qseca2.

- En río Segundo el comportamiento espacial muestra un aumento muy marcado en la mayoría de las variables en la salida del río del cantón siendo las concentraciones de amonio, fósforo total y SST los de mayor magnitud de cambio.
- El comportamiento espacial en el río Bermúdez indica un foco de contaminación en el punto medio 1 (RBMDZ1) debido las altas concentraciones DBO, DQO, SST, SS, SAAM, Cu, Ni y Al en dicho punto. Además, en el punto de la entrada al río también se observan picos altos de concentración de DQO y SAAM, aunque en menor proporción con respecto a el punto medio 1.
- En términos generales, según el Índice Holandés, la microcuenca con mayor grado de contaminación es el río Bermúdez (contaminación muy severa) seguido por Quebrada Seca (contaminación moderada) mientras que río Segundo (contaminación incipiente) es el río con el menor grado de contaminación.
- Las principales problemáticas asociadas al grado de contaminación en el río Bermúdez son la escasa cobertura forestal alrededor de los márgenes del río lo cual impide que exista protección al recurso hídrico, el efecto de actividades agrícolas y ganaderas, y la alta densidad poblacional; siendo los puntos cercanos a la entrada los de mayor contaminación.
- El ingreso de la época lluviosa (aumento de las lluvias) disminuye la gravedad de la contaminación en todas las microcuencas cambiando de categoría todos los puntos a lo largo de los ríos; en el caso del Bermúdez cambia de contaminación muy severa a severa mientras que en Quebrada Seca y río Segundo cambia de moderada a incipiente.
- Los puntos con una clasificación de contaminación severa y muy severa en el río Bermúdez, así como la contaminación severa en época seca en Quebrada Seca se deben principalmente a la falta de cobertura forestal cerca de los ríos y a la influencia de los vertidos domésticos, agrícolas, ganaderos e industriales propios de urbanismo.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un análisis espacial mediante el uso de imágenes satelitales o alguna otra herramienta de sistemas de información geográfica para evaluar con precisión la influencia de las actividades agrícolas y pecuarias a la calidad de cada uno de

los cuerpos de agua, principalmente en el río Bermúdez que presenta el mayor grado de contaminación. Además, es pertinente realizar un acercamiento con los propietarios de las fincas ganaderas con el fin de conocer el estado de los márgenes del río (zona de protección) que colindan con dichas propiedades.

- En río Segundo se recomienda agregar al menos un punto más de monitoreo específicamente en las coordenadas con longitud -84,18450 y latitud 9,9820 en donde se observan la influencia de 15 hectáreas de con cultivos agrícolas y 5 hectáreas de fincas ganaderas que podrían afectar la calidad del río. Uno o más puntos permitiría una valoración más completa sobre el estado en la parte media del río.
- En todos los ríos, aunque principalmente en el río Bermúdez, se recomienda la implementación de un programa de reforestación en los márgenes del río mediante la incorporación de especies, herbáceas, arbustivas, arbóreas nativas y epifitas (según las condiciones del sitio) para la protección del recurso hídrico. Algunas especies recomendadas son las del género: *Zygia*, *Ficus*, *Psidium*, *Guateria*, *Inga*, *Montanoa*, *Erythrina*, *Mimosa*, *Melinis*, *Solanum* y *Cestrum*, entre otros.
- Se recomienda duplicar esfuerzos en programas de educación ambiental a los habitantes del cantón mediante charlas, talleres y actividades de concientización sobre el manejo de residuos domésticos, el efecto de los residuos en la calidad del agua y la protección de los ríos.
- Se recomienda ampliar las campañas de monitoreo, ejecutando al menos tres y preferiblemente cuatro monitoreos anuales de manera que se pueda caracterizar mejor las variaciones temporales no solo en las principales épocas climáticas (seca y lluviosa) sino tomando en consideración uno o los dos periodos de transición, lo que mejoraría la resolución temporal y el análisis de tendencias en el tiempo.



6. Bibliografía

- CEPIS, OPS y OMS. (1999). *Monitoreo de la Calidad del Aire en América Latina*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/238739661_MONITOREO_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE_EN_AMERICA_LATINA
- Damo, R. (2013). Evaluation of Water Quality Index for Drinking Water. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(4), 1045-1051.
- Decreto Ejecutivo 33903-MINAE-S. (2007). Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. *Diario Oficial La Gaceta*, 178.
- Fernández-Labrada, M., Rodríguez-Heredia, D., García-Ulasia, I., Santana-Gómez, M., & Córdova-Rodríguez, V. (2015). Comportamiento de la contaminación orgánica de la Bahía de Santiago de Cuba. *Cienca en su PC*, 29-42.
- Foladori, G. (2001). *Controversias sobre la sustentabilidad. La coevolución sociedad y naturaleza*. Zacatecas: Porrúa.
- Fonseca-Sánchez, A., Madrigal-Solís, H., Núñez-Solís, C., Calderón-Sánchez, H., Moraga-López, G., & Gómez-Cruz, A. (2019). Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. *Uniciencia*, 76-97.
- García-Quevedo, T. (2012). *Propuesta de índices de calidad de agua para ecosistemas hídricos de Chile*. Obtenido de Repositorio Académico de la Universidad de Chile: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112367/cf-garcia_tq.pdf;sequence=1
- Gómez-Duarte, O. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Revista de la Facultad de Medicina*, 7-8.
- González, L. (2016). *Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación*. Obtenido de Portal de Revistas Académicas de la Universidad Tecnológica de Panamá: <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/mente-y-materia/article/viewFile/334/pdf>
- Lovett, G., Burns, D., Driscoll, C., Jenkins, J., Mitchell, M., Rustad, L., . . . Haeuber, R. (2007). Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(5), 253-260.
- Mercado-Maldonado, A., & Ruiz-González, A. (2006). El concepto de las crisis ambientales en los teóricos de la sociedad del riesgo. *Espacios Públicos*, 9(18), 194-213.
- Nivelo-Nivelo, S. (2015). *Monitoreo de la calidad de agua en San Cristóbal, Galápagos*. Obtenido de Repositorio Digital Universidad San Francisco de Quito: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4696>

- Orta-Arrazcaeta, L. (2002). Contaminación de las aguas por plaguicidas químicos. *Fitosanidad*, 55-62.
- Peña, E. (2007). *Calidad de Agua*. Obtenido de Repositorio de ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>
- Perevochtchikova, M. (2009). La situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 24(3), 513-547.
- Rand, C. (1995). *Fundamentals of Aquatic Toxicology* (Segunda Edición ed.).
- Rodríguez-Miranda, J., Serna-Mosquera, J., & Sánchez-Céspedes, J. (2016). Índices de calidad en cuerpos de agua superficiales en la planificación de los recursos hídricos. *Logos Ciencia y Tecnología*, 8(1), 159-167.
- Romeu-Álvarez, B., Quintero-Álvarez, H., Larrea-Murrell, J., Lugo-Moya, D., Rojas-Hernández, N., & Heydrich-Pérez, M. (2015). Experiencias en el monitoreo ambiental: contaminación de ecosistemas dulceacuícolas de La Habana (Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 15(3), 1325-1335.
- Sánchez-Herrera, M. (2005). El índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party Score) modificado y adaptado al cauce principal del Río Pamplonita Norte de Santander. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 54-67.
- Solano-Arce, M. (2011). *Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la parte media- alta de la microcuenca del río Damas y propuesta de manejo*. Obtenido de Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados: <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Impacto%20ambiental%20por%20aguas%20residuales%20y%20residuos%20s%C3%B3lidos%20en%20la%20calidad%20del%20agua.pdf>
- Torres, P., Hernán-Cruz, C., & Patiño, P. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.
- UNEP. (2017). *Hacia un planeta sin contaminación*. Obtenido de United Nations Office Nairobi: <https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/k1708350s.pdf>
- Vargas-Marcos, F. (2005). La Contaminación Ambiental como Factor Determinante de la Salud. *Revista Española de Salud Pública*, 117-127.