



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas Carrera de Ingeniería Química

Estudio estadístico multivariado aplicado a la evaluación de la calidad del agua potable y residual de la ciudad Cuenca usando parámetros físico químicos, contenido de metales y evaluación biotóxica del agua potable mediante el uso de daphnias.

**Trabajo de titulación previo a la
obtención del Título de Ingeniero
Químico**

AUTORAS:

Yleana Romina Arcentales Ríos
C.I.:010552698-2
e-mail: rominaarcentales@yahoo.es

Andrea Victoria Carrión Méndez
C.I.:010675541-6
e-mail: vickycarrionm@gmail.com

DIRECTORA:

Ing. Verónica Patricia Pinos Vélez. PhD
C.I.:0103550711

Cuenca-Ecuador
05 de mayo del 2021



RESUMEN

La concentración de metales en el agua es un ámbito a considerar en los estudios de calidad de agua; pues el agua cuyo contenido de metales que no está por debajo del límite de concentración permitido regido por la normativa vigente representa una gran complicación, pudiendo generar intoxicaciones en los seres humanos que la consuman y de igual forma en los animales y plantas que se encuentran presentes en este medio. Por tal motivo, se realizó un estudio sobre el contenido de metales del agua potable en la ciudad de Cuenca, se consideraron las cuatro principales plantas de potabilización de agua: El Cebollar, Tixán, Sustag y San Pedro, que corresponden a los sistemas de agua del: Tomebamba, Machángara, Yanuncay y Culebrillas, respectivamente. Las muestras fueron tomadas a la entrada y salida de cada planta; además, se tomaron muestras de agua potable dentro de la ciudad correspondiente al circuito de distribución de las plantas Tomebamba, Machángara y Yanuncay. Así mismo, se muestreo el agua de entrada y salida de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba. Con esta serie de muestras se determinó las concentraciones de quince metales a través de un ICP-OES. Por otra parte, se determinaron in situ los parámetros físico-químicos presentes en las muestras. Con los datos generados, se realizaron análisis estadísticos descriptivos, inferenciales y multivariados mediante el uso del software R. Se determinó que el agua potable y residual cumplía en cuanto a parámetros físico químicos y en contenido de metales. Debido a que las plantas usan sulfato de aluminio como coagulante, se decidió hacer bioensayos toxicológicos con el crustáceo daphnia magna para verificar si las trazas de aluminio detectadas en el agua tratada y en distribución podrían afectar el ecosistema, para ello, se realizó el cultivo de la especie y se comprobó la sensibilidad de la cepa mediante ensayos de toxicidad aguda con el uso de dicromato de potasio. Posteriormente, se realizaron los ensayos de toxicidad crónica con diferentes concentraciones de aluminio y usando directamente las aguas potables de diferentes sistemas. Estos datos fueron analizados e interpretados mediante el programa SPSS. En los ensayos, se encontró el valor CL50 de la especie a una concentración de aluminio de aproximadamente 0.594 ppm; en lo que respecta a los ensayos con las aguas de cada sistema en su distribución, no se encontró biotoxicidad lo que nos indica que el agua es segura para el consumo.

Palabras Clave: Toxicidad aguda. Toxicidad crónica. Daphinas magnas.



ABSTRACT

The concentration of metals in water is an area to be considered in water quality studies, because water whose metal content is not below the permitted concentration limit governed by current regulations represents a major complication, and can cause intoxication in humans who consume it and likewise in animals and plants that are present in this environment. For this reason, a study was conducted on the metal content of drinking water in the city of Cuenca, considering the four main water purification plants: El Cebollar, Tixán, Sustag and San Pedro, which correspond to the water systems of Tomebamba, Machángara, Machángara and San Pedro: Tomebamba, Machángara, Yanuncay and Culebrillas, respectively. Samples were taken at the inlet and outlet of each plant; in addition, drinking water samples were taken within the city corresponding to the distribution circuit of the Tomebamba, Machángara and Yanuncay plants. In addition, inlet and outlet water from the Ucubamba wastewater treatment plant was sampled. With this series of samples, the concentrations of fifteen metals were determined by ICP-OES. In addition, the physicochemical parameters present in the samples were determined in situ. With the data generated, descriptive, inferential and multivariate statistical analyses were performed using R software. It was determined that the drinking and waste water complied in terms of physical-chemical parameters and metal content. Since the plants use aluminum sulfate as a coagulant, it was decided to carry out toxicological bioassays with the crustacean *daphnia magna* to verify whether the traces of aluminum detected in the treated water and in distribution could affect the ecosystem. Subsequently, chronic toxicity tests were carried out with different concentrations of aluminum and directly using drinking water from different systems. These data were analyzed and interpreted using the SPSS program. In the tests, the CL50 value of the species was found at an aluminum concentration of approximately 0.594 ppm; with respect to the tests with the waters of each system in its distribution, no biotoxicity was found, which indicates that the water is safe for consumption.

Keywords: Acute toxicity. Chronic toxicity. Magnetic daphines.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE CONTENIDO	4
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE FIGURAS DEL ANEXO	14
AGRADECIMIENTO	19
DEDICATORIA.....	20
DEDICATORIA.....	21
INTRODUCCIÓN.....	22
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	22
OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	24
OBJETIVO GENERAL	24
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
CAPÍTULO I: EL AGUA. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y TRATAMIENTOS.....	27
1.1 Agua	27
1.1.2 Ciclo del agua	27
1.2 Propiedades fisicoquímicas del agua.....	28



1.2.1 pH	28
1.2.2 Turbidez.....	28
1.2.3 Conductividad eléctrica	29
1.2.4 Temperatura.....	29
1.2.5 Oxígeno disuelto.....	29
1.2.6 Cloro libre residual	29
1.3 Agua potable.....	30
1.3.1 Proceso de potabilización del agua, ETAPA, Cuenca.....	30
1.3.2 Proceso de potabilización del agua, Cuenca.....	31
1.4 Aguas Residuales.....	35
1.4.1 Tratamiento convencional para efluentes	36
1.4.2 Tratamiento avanzado para efluentes	36
1.4.3 Proceso de tratamiento de aguas residuales, Ucubamba, Cuenca	36
CAPÍTULO II: CALIDAD DEL AGUA: CONTENIDO DE METALES Y TOXICIDAD ...	39
2.1. Metales	39
2.1.1 Metales pesados en el agua.....	39
2.2 Ensayos de toxicidad	59
2.3 Análisis de toxicidad de los metales.....	59
2.3.1 Normativas sobre el contenido de metales	60
2.4. Índices de toxicidad	63



2.4.1 Concentración efectiva	64
2.4.2 Concentración efectiva media	64
2.4.3 Concentración letal	64
2.4.4 Concentración letal media	64
2.4.5 Dosis letal absoluta	64
2.4.6 NEANO	65
2.4.7 CENO	65
2.4.8 MCEO	65
2.4.9 Valor crónico	65
2.5 Toxicidad aguda	65
2.6 Toxicidad crónica	66
2.7 Daphnias magnas	66
CAPÍTULO III: MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.....	69
3.1. Métodos estadísticos.....	69
3.1.1 Estadística descriptiva	69
3.1.2 Estadística inferencial.....	73
3.1.3 Estadística multivariada.....	78
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	85
4.1 Organización del trabajo.....	85
4.2 FASE I: MUESTREO Y ANÁLISIS	86



4.2.1 Toma de muestras de las plantas de potabilización.....	86
4.2.2 Toma de muestra de la planta de tratamiento de aguas residuales	88
4.2.4 Análisis físico – químico	92
4.2.5 Análisis de metales usando (ICP-OES).....	93
4.3 FASE II: Ensayos de biotoxicidad	93
4.3.1 Preparación del agua reconstituida ASTM.....	93
4.3.2 Determinación de la alimentación para las daphnias.....	94
4.3.4 Bioensayo de Toxicidad	97
4.4 FASE III: Análisis de datos	99
4.4.1 Análisis estadístico descriptivo, inferencial y multivariado.....	99
4.4.2 Determinación del índice de HPI.....	100
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	101
5.1 Subsistemas de análisis.....	101
5.2 Resultados del análisis descriptivo	101
5.3.1 Contraste de igualdad en medias en muestras relacionadas	114
5.4 Análisis estadístico multivariado.....	116
5.4.1 Análisis de las correlaciones más relevantes entre variables	116
5.4.3 Análisis de los componentes principales en el agua tratada.....	119
5.4.4 Análisis de los componentes principales en el agua en distribución.....	121
5.4.5 Análisis del clúster para el sistema Tomebamba.....	123



5.4.6 Análisis del clúster para el sistema Machángara	124
5.4.6 Análisis del clúster para el sistema Yanuncay	124
5.4.6 Análisis del clúster para el sistema de Culebrillas	125
5.5 Resultados del índice de toxicidad de metales	126
5.7 Resultados de los ensayos de biotoxicidad.....	130
5.7.1 Toxicidad aguda	130
5.7.2 Toxicidad crónica	133
CONCLUSIONES	138
RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	141
ANEXOS	147
ANEXO 1. FIGURAS	147
ANEXO 2. REGISTRO DE TABLAS.....	150



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL ALUMINIO.....	39
TABLA 2: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL ARSÉNICO.....	41
TABLA 3: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL BARIO.	42
TABLA 4: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL CALCIO.....	43
TABLA 5: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL CADMIO.....	45
TABLA 6: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL COBALTO.....	46
TABLA 7: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL COBRE.	47
TABLA 8: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL CROMO.....	49
TABLA 9: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL HIERRO.....	50
TABLA 10: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL MANGANESO.	51
TABLA 11: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SODIO.....	53
TABLA 12: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL NÍQUEL.....	54
TABLA 13: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL PLOMO.....	55
TABLA 14: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL ZINC.	56
TABLA 15: PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL MERCURIO.....	58
TABLA 16: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E INORGÁNICAS CON LOS LÍMITES PERMITIDOS DEL AGUA POTABLE.....	60
TABLA 17: LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y USO DOMÉSTICO QUE ÚNICAMENTE REQUIERE TRATAMIENTO CONVENCIONAL.	61
TABLA 18: LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y USO DOMÉSTICO QUE ÚNICAMENTE REQUIERAN DESINFECCIÓN	62



TABLA 19: LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE	63
TABLA 20: PARÁMETROS PARA EL CULTIVO.	67
TABLA 21: PUNTOS DE LA TOMA DE MUESTRA	90
TABLA 22: SISTEMA TOMBAMBA.	103
TABLA 23: SISTEMA MACHÁNGARA.	105
TABLA 24: SISTEMA YANUNCAY.	107
TABLA 25: SISTEMA CULEBRILLAS.	109
TABLA 26: PRUEBAS DE NORMALIDAD Y HOMOCEDASTICIDAD.	113
TABLA 27: DIFERENCIA DE MEDIAS ENTRE LA FUENTE Y LA TRATADA.	114
TABLA 28: COMPARACIÓN DE MEDIAS ENTRE REDES DE DISTRIBUCIÓN.	116
TABLA 29: MATRIZ DE COMPONENTES DEL AGUA FUENTE EN LOS 4 SISTEMAS .	118
TABLA 30: MATRIZ DE COMPONENTES DEL AGUA TRATADA EN LOS 4 SISTEMAS	120
TABLA 31: MATRIZ DE COMPONENTES DEL AGUA EN DISTRIBUCIÓN DE LOS 3 SISTEMAS.....	122
TABLA 32: CARACTERÍSTICAS DE UCUBAMBA.....	126
TABLA 33: CÁLCULO DEL HPI PARA EL SISTEMA TOMBAMBA.....	127
TABLA 34: CÁLCULO DEL HPI PARA EL SISTEMA YANUNCAY	128
TABLA 35: CÁLCULO DEL HPI PARA EL SISTEMA MACHÁNGARA.....	128
TABLA 36: CATEGORÍAS DEL HPI.....	129
TABLA 37: HPI DE LOS SISTEMAS	129
TABLA 38: NÚMERO DE DAPHNIAS MAGNAS MUERTAS EN DICROMATO DE POTASIO	131



TABLA 39:TABLA DE RESULTADOS DE LA REGRESIÓN PROBIT	131
TABLA 40:REGISTRO DE MUERTES DE DAPHNIAS CON EL CLORURO DE ALUMINIO Y EN CADA SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	133
TABLA 41:TABLA DE RESULTADOS DE LA REGRESIÓN PROBIT DE LAS CONCENTRACIONES DE ALUMINIO	134



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: CICLO DEL AGUA.....	27
FIGURA 2: ESQUEMA DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA DE LAS PLANTAS DE TIXÁN, SUSTAG Y EL CEBOLLAR.....	33
FIGURA 3: ESQUEMA DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA DE LA PLANTA SAN PEDRO.....	35
FIGURA 4: ESQUEMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UCUBAMBA.....	38
FIGURA 5: DAPHNIA.....	67
FIGURA 6: POBLACIÓN, MUESTRA E INDIVIDUO.....	69
FIGURA 7: T-STUDENT.....	76
FIGURA 8: REPRESENTACIÓN DE LOS CLÚSTERES (DENDOGRAMA).....	82
FIGURA 9: ESQUEMA DE LOS MÉTODOS JERÁRQUICOS.....	83
FIGURA 10: ESQUEMA DE LOS MÉTODOS NO JERÁRQUICOS.....	84
FIGURA 11: UBICACIÓN PLANTA DE AGUA POTABLE TIXÁN.....	86
FIGURA 12: UBICACIÓN PLANTA DE AGUA POTABLE SUSTAG.....	87
FIGURA 13: UBICACIÓN PLANTA DE AGUA POTABLE EL CEBOLLAR.....	87
FIGURA 14: UBICACIÓN PLANTA DE AGUA POTABLE SAN PEDRO.....	88
FIGURA 15: UBICACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA.....	89
FIGURA 16: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE.....	89
FIGURA 17: PUNTOS DE MUESTREO DEL SISTEMA TOMBAMBA.....	90
FIGURA 18: PUNTOS DE MUESTREO DEL SISTEMA YANUNCAY.....	91



FIGURA 19: PUNTOS DE MUESTREO DEL SISTEMA MACHÁNGARA	92
FIGURA 20: PREPARACIÓN DEL AGUA TIPO ASTM.....	94
FIGURA 21: DETERMINACIÓN DEL ALIMENTO ÓPTIMO.....	96
FIGURA 22: ENSAYOS DE TOXICIDAD AGUDA	97
FIGURA 23: ENSAYOS DE TOXICIDAD CRÓNICA.....	98
FIGURA 24: MATRIZ DE CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES (PARÁMETROS EVALUADOS).....	117
FIGURA 25: ACP (AGRUPACIÓN DE PARÁMETROS)-ANÁLISIS AGUA FUENTE.....	119
FIGURA 26: ACP (AGRUPACIÓN DE PARÁMETROS)-ANÁLISIS AGUA TRATADA....	121
FIGURA 27: ACP (AGRUPACIÓN DE PARÁMETROS)-ANÁLISIS AGUA EN DISTRIBUCIÓN.....	123
FIGURA 28: DENDOGRAMA, SISTEMA TOMBAMBA.....	124
FIGURA 29: DENDOGRAMA, SISTEMA MACHÁNGARA.....	124
FIGURA 30: DENDOGRAMA, SISTEMA YANUNCAY	125
FIGURA 31: DENDOGRAMA, SISTEMA CULEBRILLAS	125
FIGURA 32: REGRESIÓN PROBIT CL50 PARA EL DICROMATO DE POTASIO	132
FIGURA 33: REGRESIÓN PROBIT CL50 PARA EL ALUMINIO	135
FIGURA 34: MUERTES EN CADA SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	136



ÍNDICE DE FIGURAS DEL ANEXO

FIGURA A1:A)SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO, B) CLORURO DE POTASIO, C) BICARBONATO DE SODIO Y D) SULFATO DE MAGNESIO HEPTAHIDRATADO	147
FIGURA A2:SOLUCIONES DE 1 L.	147
FIGURA A3:SOLUCIÓN AFORADA Y MEDICIÓN DEL PH.....	147
FIGURA A4:FRASCOS DE 5L, CON LA SIEMBRA DE LAS DAPHNIAS MAGNAS.	148
FIGURA A5:ENSAYOS 1, 2, 3 Y 4.....	148
FIGURA A6:ENSAYO 5.....	148
FIGURA A7:ENSAYO 6 Y 7.....	149
FIGURA A8:ESTERILIZACIÓN DE LOS VASOS DE 50 ML.	149
FIGURA A9:DICROMATO DE POTASIO.....	149
FIGURA A10:SOLUCIONES DE DICROMATO DE POTASIO CON SUS RÉPLICAS Y BLANCOS.	149
FIGURA A11:ESTERILIZACIÓN DE LOS VASOS DE 50 ML.	150
FIGURA A12:SOLUCIONES DE CLORURO DE ALUMINIO Y MUESTRAS DE AGUA. .	150



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yleana Romina Arcentales Ríos, autora del trabajo de titulación Estudio estadístico multivariado aplicado a la evaluación de la calidad del agua potable y residual de la ciudad de Cuenca usando parámetros físico químicos, contenido de metales y evaluación biotóxica del agua potable mediante el uso de daphnias”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 05 de mayo del 2021

Yleana Romina Arcentales Ríos

C.I: 0105526982



Cláusula de Propiedad Intelectual

Andrea Victoria Carrión Méndez, autora del trabajo de titulación “Estudio estadístico multivariado aplicado a la evaluación de la calidad del agua potable y residual de la ciudad Cuenca usando parámetros físico químicos, contenido de metales y evaluación biotóxica del agua potable mediante el uso de daphnias”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 05 de mayo de 2021

Andrea Victoria Carrión Méndez

C.I: 0106755416



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yleana Romina Arcentales Ríos en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio estadístico multivariado aplicado a la evaluación de la calidad del agua potable y residual de la ciudad de Cuenca usando parámetros físico químicos, contenido de metales y evaluación biotóxica del agua potable mediante el uso de daphnias”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de mayo de 2021

Yleana Romina Arcentales Ríos

C.I: 0105526982



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Andrea Victoria Carrión Méndez en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio estadístico multivariado aplicado a la evaluación de la calidad del agua potable y residual de la ciudad Cuenca usando parámetros físico químicos, contenido de metales y evaluación biotóxica del agua potable mediante el uso de daphnias.", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de mayo de 2021

Andrea Victoria Carrión Méndez

C.I: 0106755416



AGRADECIMIENTO

Agradecemos en primer lugar a Dios, por permitirnos culminar estos años de estudio con este proyecto de titulación, por darnos salud y vida en este tiempo de pandemia, al mismo tiempo queremos agradecer a nuestros padres por su apoyo incondicional en todo este tiempo de vida estudiantil, por sus consejos que nos han permitido superar los obstáculos que se nos han presentado a largo de nuestra carrera, también agradecemos a todos nuestros profesores, ya que han sido un pilar fundamental para el desarrollo de nuestros conocimientos, formación y ética profesional, nos han ayudado a crear un perfil profesional y humano para que nuestra profesión este siempre al servicio de los demás; también agradecemos a nuestros compañeros, con quienes hemos compartido cada momento de la carrera apoyándonos unos con otros, hemos creado hermosos recuerdos formando grandes amistades y buenos compañeros.

De forma muy especial agradecemos a nuestra tutora, la Ing. Verónica Pinos, ya que nos ha brindado su tiempo, conocimientos y apoyo en todo momento, sin su ayuda no habiésemos podido concluir este proyecto de titulación, gracias de todo corazón por ser parte fundamental de este, nuestro gran sueño de conseguir el título de ingenieras químicas, así también al Dr. Larriva que nos permitió el uso tanto del laboratorio del campus de Balzay, como de todos los materiales necesarios para el desarrollo de los ensayos. Agradecemos a la Universidad de Cuenca, por brindarnos la oportunidad de estudiar y obtener una educación superior, también a PUCE por hacernos parte de esta investigación que nos ha permitido desarrollar el proyecto de titulación.

El desarrollo de esta tesis no lo podemos catalogar como algo fácil, pero si como una experiencia inolvidable, en donde aplicamos muchos de nuestros conocimientos aprendidos a lo largo de la carrera, cada investigación, proceso y experimento que realizamos lo disfrutamos mucho llegando a fomentar una amistad en donde nos apoyamos conjuntamente hasta llegar al final, y como dicen: *“Siembre una buena y sincera amistad, y muy probablemente el tiempo te permitirá disfrutar de una agradable cosecha”*.



DEDICATORIA

“La gente habla de conseguir golpes de suerte en sus carreras. Yo soy la prueba de que la teoría de los golpes de suerte es simplemente errónea. Uno consigue su propia suerte. El mundo está dirigido por los que se dan a conocer, no por los que esperan a que se pregunten por ellos”

Steve Blank

Dedico este proyecto de titulación a Dios quien me ha dado vida y salud en este tiempo tan difícil que está pasando la humanidad; de manera especial a mis padres que me han apoyado de manera incondicional a través de mi vida estudiantil, a mis abuelos que me han criado y me han brindado sus enseñanzas para a llegar a ser la mujer que soy ahora, también dedico a mis tías que han estado conmigo en mis momentos malos y buenos, a mi hermano quien me ha dado la fortaleza para seguir adelante, quienes todos juntos me han motivado cumplir mis anhelos. Gracias Dios por tener una familia que ha apoyado todo este momento al escribir esta tesis.

Romina Arcentales



DEDICATORIA

“No temas ni te desalientes, porque el propio Señor irá delante de ti. Él estará contigo; no te fallará ni te abandonará.”

Deuteronomio 31:8

Dedico este proyecto de titulación a Dios, quien me ha guiado e iluminado todo este tiempo, bendiciendo cada paso que he dado. A mi papá, Jorge, que con su trabajo y sacrificio me ha dado la oportunidad de estudiar y ha creído en mí, también a mi mamá Victoria, que, con su amor, paciencia y confianza en mí, me ha guiado en todo momento, ellos con su ejemplo me han mostrado que nada es imposible y que a pesar de los obstáculos que se presenten, siempre hay una solución, que Dios proveerá en todo tiempo, fueron el pilar fundamental, de este, mi gran anhelo.

A mi esposo José, que siempre ha estado para mí, con todo su amor, apoyándome y alentando mi sueño, siendo este apoyo incondicional en mi caminar, dedico también a mi angelito que viene en camino, mi hija Sara, ella me dio la fortaleza e impulso que necesitaba para concluir este proyecto, finalmente a todos mis familiares que con sus oraciones y consejos me han apoyado siempre.

Andrea Carrión



INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los elementos químicos presentes en el agua potable pueden variar según su origen, el proceso de tratamiento o el material de las tuberías; la mayoría de esos elementos no representan una amenaza para la salud humana, mientras que otros, como los metales tóxicos, han demostrado causar efectos nocivos sobre la vida silvestre, humana y acuática. La ciudad de Cuenca siempre se ha caracterizado por una buena calidad del agua potable, es por ello que los habitantes no tienen la necesidad de comprar agua embotellada como en otras ciudades del país y recurren a consumir directamente del grifo.

Es importante monitorizar el agua potabilizada, es decir, analizar el agua desde la captación, una vez terminado el proceso de potabilización y en puntos aleatorios dentro de la distribución, con el propósito de corroborar que todos los parámetros físico-químicos y concentraciones de metales se encuentren dentro de los límites establecidos por la NTE INEN 1108: agua para consumo humano. Requisitos, 2020; y de esta manera evaluar que mantenga su calidad en la distribución. Al realizar estos análisis se podría encontrar la presencia de concentraciones de metales tóxicos o de parámetros físico-químicos fuera de los límites establecidos por la norma, lo cual traería repercusiones graves para los habitantes de la ciudad (Miranda, 2017).

Así también, es importante analizar el agua residual tratada, pues esta desemboca en nuestros ríos; el control de calidad de esta agua permitirá determinar si algún parámetro no está dentro de los límites establecidos por la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua (TULSMA), ya que de ser así esto podrían presentar un efecto negativo en el ecosistema del río, es decir, afectando principalmente flora y fauna del mismo.

El muestreo continuo de la calidad de agua es costoso y los datos descriptivos no siempre nos dan suficiente información por eso es importante el uso de herramientas estadísticas. Estas nos permiten una mejor visualización de los datos encontrados y obtener información relevante. A través de la estadística inferencial se pueden hacer comparaciones entre las aguas de ingreso y salida de un tratamiento para poder evaluarlo, así también entre el agua a la salida de la planta potabilizadora y en puntos cercanos a su distribución. Además, la estadística multivariada nos permite analizar varios parámetros a la vez y determinar similitudes obteniendo



simplificaciones. También, se realizarán comparaciones entre los parámetros analizados y las normas vigentes, para relacionar los resultados e interpretarlos de forma técnica.

Otro aspecto importante es evaluar la biotoxicidad del agua, para lo cual, se aplicó una prueba con crustáceos macroinvertebrados conocidos como daphnias magnas, estos cladóceros son más conocidos como “pulgas de agua”, los cuales son típicos en este tipo de ecosistemas. Para determinar la toxicidad por metales se usó el índice de contaminación por metales pesados (HPI).



OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

Determinar y analizar los parámetros físico químicos, concentraciones de metales y la biotoxicidad en el agua potable de la ciudad de Cuenca proveniente de las 4 plantas potabilizadoras y el agua residual de la planta de tratamiento Ucubamba a través de métodos instrumentales y estadísticos descriptivos, inferenciales y multivariados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar los parámetros físico químicos y la concentración de metales en el agua potable y residual de la ciudad de Cuenca.

Determinar la biotoxicidad del agua potable de la ciudad de Cuenca a través de ensayos con daphnias.

Realizar el análisis estadístico descriptivo, inferencial y multivariado de los parámetros físico químicos y la concentración de metales del agua potable de la ciudad de Cuenca.



El Capítulo I trata sobre el agua, se hizo referencia al ciclo de ésta, sus propiedades físico-químicas como son el pH, la turbidez, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y cloro libre residual. También trató el agua potable, la norma nacional ecuatoriana y la organización mundial de la salud; además explicó el proceso de potabilización realizado en los diferentes sistemas de la ciudad de Cuenca como son: Yanuncay, Tomebamba, Machángara y Culebrillas por ETAPA EP, empresa encargada entre sus servicios de proveer el agua potable a la ciudad de Cuenca, así también, explica el tratamiento de aguas residuales de la planta de tratamiento de agua residual de Ucubamba gestionada igualmente por ETAPA EP.

En el Capítulo II se explicará algunos parámetros de la calidad del agua, comenzando desde los metales pesados y propiedades físico-químicas analizadas en este estudio, los riesgos en la salud humana y los efectos ambientales. Luego se trata los ensayos de toxicidad y la forma de analizar la toxicidad de los metales en base al índice HPI. Este capítulo, también presenta las normativas vigentes TULSMA e INEN 1108:2020 donde se indican los límites máximos permitidos para el contenido de metales y parámetros físico-químicos, tanto para aguas de consumo humano como para descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce, solo para el aluminio se tomará el límite establecido por la OMS. También se detallará los principales índices de toxicidad aguda y crónica aplicadas en la metodología del proyecto y finalmente, explica las pruebas de biotoxicidad crónica con las daphinas magnas.

El Capítulo III trata sobre los métodos estadísticos para el análisis de los datos, para lo cual se comienza explicando los aspectos más importantes de la estadística descriptiva siendo estos las medidas de tendencia central que corresponden a la media aritmética, mediana y moda, así también las medidas de dispersión, como son la varianza y la desviación típica. Luego se procederá a explicar sobre la estadística inferencial, que hace una comparación de medias aplicando pruebas de normalidad, homogeneidad de las poblaciones y según el tamaño de los grupos experimentales y su contraste, para así pasar a la explicación de pruebas paramétricas como las no paramétricas para muestras grandes y pequeñas; dentro de esta estadística se encuentran varias pruebas importantes, en este capítulo se detallará á sobre la T-student, Kruskal Wallis y Wilcoxon. Finalizando este capítulo se explicará sobre la estadística multivariada, que conlleva primero el análisis de componentes principales e indica como se la realiza y cuáles son los criterios de aplicación para la selección del número de componentes principales a utilizar; luego trata del



análisis de conglomerados o conocido como análisis clúster, explica las medidas de disimilitud, los criterios de aplicación y su representación gráfica en dendogramas. Incluye también una breve explicación y clasificación de los métodos jerárquicos como de los no jerárquicos.

El Capítulo IV se subdivide en tres fases, en la fase I, se detallará la metodología empleada para el muestreo del agua potable, en cada una de las plantas: Tixán, el Cebollar, Sustag y San Pedro, así también, en el circuito de su distribución y en la planta de tratamiento de agua residual de Ucubamba. También se indicará el proceso que siguió para el análisis físico-químico in situ realizado y también para la conservación de muestras para el análisis de metales. En la fase II se explicará los ensayos realizados para la determinación de la biotoxicidad del aluminio, para lo cual se detalla la preparación del agua reconstituida según la norma ASTM D 1193: especificación estándar para agua reactiva, 2001, luego el proceso para determinar la alimentación más adecuada para las daphnias magnas, posteriormente se explica el proceso de estandarización de estos crustáceos mediante ensayos de toxicidad aguda con el dicromato de potasio para finalmente, explicar la metodología usada para los ensayos de toxicidad crónica con el aluminio. En la tercera y última fase, se describe el análisis estadístico realizado en el software R y detalla el proceso para la determinación del índice HPI y la CL50 del aluminio.

En el Capítulo V, se presenta los resultados y la discusión de los análisis estadísticos que muestra el análisis descriptivo para los parámetros físico-químicos de las 4 plantas potabilizadoras de agua, sus distribuciones y del agua residual; además, se muestra los resultados de los análisis inferencial y multivariado que permiten una mejor interpretación de los datos presentados, ya que se muestra un contraste de igualdad de medias, análisis de componentes principales y formación de clústeres. Se indica la determinación del índice HPI para los metales estudiados. También se detalla la calibración y los resultados obtenidos en el análisis de biotoxicidad del aluminio donde se muestran los valores de CL50.



CAPÍTULO I: EL AGUA. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y TRATAMIENTOS

1.1 Agua

El agua es una sustancia muy importante que contiene una gran cantidad de propiedades y una estructura excepcional. Es una molécula sencilla formada por dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno, la misma que tiene enlaces polares, permitiendo así unirse con otras moléculas mediante puentes de hidrógeno. Una de las propiedades características de esta molécula, es la capacidad de disolver casi cualquier sustancia polar, por este motivo es que casi toda reacción química se encuentra en medio acuoso. El agua puede estar en diferentes estados, ya sea sólido, líquido o gaseoso; el agua dulce en el planeta constituye tan sólo el 3%; lleva un papel fundamental en la vida, ya que sin este elemento ningún ser vivo podría realizar sus funciones vitales (Vera & Camilloni, 2015; Vaquero, 2012).

1.1.2 Ciclo del agua

El agua pasa de la tierra hacia la atmósfera y volviendo nuevamente a la tierra; este ciclo hidrológico se da por varias causas, la primera es cuando el sol le proporciona energía para que esta se evapore, y la segunda la gravedad para que el agua que se encuentra condensada pueda descender hacia la tierra (Vera & Camilloni, 2015). Ver figura 1.



Figura 1: Ciclo del agua
Fuente: Agua.org.mx

Según Vera y Camilloni (2015), las fases del ciclo del agua son:

- **Evaporación:** El sol hace que el agua líquida contenida en los océanos pase de la superficie terrestre hacia la atmósfera.



- **Transpiración:** Las plantas toman de sus raíces el agua contenida en el suelo, estas expulsan el agua en forma de vapor aumentando así la humedad del aire.
- **Condensación:** El vapor de agua al enfriarse se condensa formando así las nubes.
- **Transporte:** Las corrientes de aire empujan las nubes y las masas de aire húmedo.
- **Precipitación:** Al momento que se producen unas gotas y estas se vuelven pesadas, caen ya sea en forma de lluvia, nieve o granizo, dependiendo de la temperatura.
- **Absorción:** Cuando el agua es atraída a la tierra por la gravedad ya sea en forma de lluvia, nieve o de deshielo, existen dos grandes circuitos que devuelven al mar.
- **Filtración/Descarga:** Cuando se encuentra bajo tierra y se desplaza lentamente por los estratos portadores de agua.
- **Escurrimiento:** El agua al momento que cae al suelo se evapora por efecto de la temperatura o simplemente se dirige hacia los ríos, cursos de agua y lagos.
- **Acuíferos:** Los poros y grietas de las rocas pueden llenarse totalmente de agua formando así un acuífero.

1.2 Propiedades físico-químicas del agua

1.2.1 pH

El potencial de hidrógeno (pH) es una medida del grado de acidez o basicidad de una muestra, es decir, es el valor que mide la concentración de iones hidronio H_3O^+ , se expresa en números, menores a 7 son aguas ácidas que contribuyen con la corrosión de sustancias metálicas al ponerse en contacto con ellas, mientras que los valores mayores a 7, corresponden a aguas básicas, que dan lugar a incrustaciones. El número 7 representa la neutralidad del agua, pues el número de átomos de hidrógeno y oxidrilos son iguales. Un aspecto importante a considerar es que el pH varía con la temperatura, por tanto esta escala se considera para 20°C (Aguilar & Navarro, 2018; Flores, 2016; Quintuña & Samaniego, 2016).

1.2.2 Turbidez

La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que produce una dispersión o interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua donde la luz sea reemitida y no transmitida sin alteraciones a través de la muestra. Se da cuando existe material insoluble y/o partículas en suspensión. Existe el método nefelométrico para su medición, el mismo que compara la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones específicas con la intensidad de la



luz dispersada por una solución patrón de referencia en iguales condiciones, donde la turbiedad será mayor cuando aumente la intensidad de la luz dispersada (Aguilar & Navarro, 2018; Flores, 2016; Quintuña & Samaniego, 2016).

1.2.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una expresión numérica de la capacidad de una sustancia en transportar corriente eléctrica, la cual dependerá de la presencia de iones en el agua, concentración total, movilidad, valencia y temperatura. Son concentraciones de sales solubles presentes en el agua disolviéndose en iones de carga positiva e iones de carga negativa, estas hacen que se provoque la conducción de la corriente (Aguilar & Navarro, 2018; Flores, 2016; Quintuña & Samaniego, 2016).

1.2.4 Temperatura

La temperatura es un indicador de las otras propiedades físico-químicas y biológicas del agua, pues si incremento determina el comportamiento de la conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto, debido a la solubilidad de sales. Además, puede ocasionar la proliferación de hongos y cambios en la flora acuática (Aguilar & Navarro, 2018; Flores, 2016; Quintuña & Samaniego, 2016).

1.2.5 Oxígeno disuelto

Para explicar esta propiedad se parte de que la molécula del agua presenta una gran polaridad, debido a que los núcleos de oxígeno son mucho más electronegativos que los de hidrógeno, haciendo que los dos enlaces den como resultado una fuerte polaridad eléctrica, el oxígeno queda con un exceso de carga negativa, mientras que los hidrógenos con carga positiva. Se considera una propiedad importante, pues permite la oxidación de algunos constituyentes alterando su solubilidad y por ende modificando otras propiedades. La principal fuente de oxígeno disuelto para el agua es el aire de la atmósfera (Flores, 2016; Quintuña & Samaniego, 2016).

1.2.6 Cloro libre residual

El cloro libre residual es un indicador de la calidad del agua potable, el mismo que se encuentra como ácido hipocloroso o como ion hipoclorito conocido como cloro libre, colocados al final del proceso de potabilización del agua con el objetivo de desinfección y oxidación. Este reacciona de forma inmediata con el indicador DPD (N, N Dietil-p-fenilendiamina) tornándose a un color



magenta, siendo este directamente proporcional a la concentración del cloro libre residual (Aguilar & Navarro, 2018; Flores, 2016; Quintuña & Samaniego, 2016).

1.3 Agua potable

Se denomina agua potable o agua apta para el consumo de los humanos al agua que puede ser consumida sin restricción para beber o preparar alimentos. “Es el agua cuyas características físicas, químicas y microbiológicas han sido tratadas a fin de garantizar su aptitud para consumo humano” (NTE INEN 1108, 2011).

El agua potable es de suma importancia, pues se utiliza en diferentes ámbitos, siendo el principal conservar la salud de la población en general, en lo que respecta a su consumo, evitando enfermedades y en lo referente a la higiene, ya que estos son derechos humanos básicos (OMS, 2011).

De acuerdo a la OMS el 88 % de las enfermedades diarreicas son producto de un abastecimiento de agua insalubre y de un saneamiento y una higiene deficientes. Un sistema de abastecimiento de agua potable eficiente y bien manejado reduce entre un 6 % y un 21 % la morbilidad por diarrea, si se contabilizan las consecuencias graves. La mejora del saneamiento reduce la morbilidad por diarrea en un 32 %. Las medidas de higiene, entre ellas la educación sobre el tema y la insistencia en el hábito de lavarse las manos, pueden reducir el número de casos de diarrea en hasta un 45 %. La mejora de la calidad del agua de bebida mediante el tratamiento del agua doméstica, por ejemplo, con la cloración en el punto de consumo, puede reducir en un 35 % a un 39 % los episodios de diarrea. Por eso es importante evaluar que todos los parámetros se cumplan con el fin de asegurar la salud de la población (OMS, 2000).

1.3.1 Proceso de potabilización del agua, ETAPA, Cuenca

Según la organización mundial de la salud (2012), se considera como derecho fundamental el acceso al agua potable, que es usada para uso doméstico, es decir la que se emplea para beber, cocinar y la higiene personal, siendo de vital importancia para el ser humano, es por ello que debe ser segura, es decir cumplir las normas microbiológicas y químicas según las normas establecidas para agua potable. Además, la OMS, dispone de guías para la calidad del agua potable, en donde se proporciona información sobre: la gestión preventiva del riesgo para proteger la salud desde la cuenca hasta el consumidor, establecimiento de normas, resumir las



consecuencias para la salud relacionadas con la contaminación por agua potable, entre otros varios aspectos de gran importancia. Los métodos convencionales de tratamiento de agua son la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Agua Potable, 2020). Ver figura 2.

1.3.2 Proceso de potabilización del agua, Cuenca

i. Captación

El agua fuente que entra a la planta para recibir el proceso de potabilización, proviene de un río que es diferente para cada planta, para la *planta de potabilización de Tixán* se usa el agua del río Machángara, *la planta de potabilización de El Cebollar* emplea el agua del río Tomebamba, y en *la planta de potabilización de Sustag* se usa el agua del río Yanuncay (Agua Potable, 2020).

ii. Conducción

El agua captada, es transportada hacia un desarenador, en donde es conducida mediante tuberías (Agua Potable, 2020).

iii. Mezcla rápida

Se realiza con un mezclador de tipo resalto hidráulico, el cual facilita la formación de flóculos (Agua Potable, 2020).

iv. Coagulación y floculación

El agua que ingresa a la planta de tratamiento se le adiciona sulfato de aluminio como coagulante, mediante una agitación intensa permitiendo la formación de coágulos, luego mediante agitación lenta se forman esferas de mayor tamaño y peso llamadas flóculos, esto ayuda a que las bacterias, lodo y otra impureza sean atrapados (Ávila, 2013).

v. Sedimentación

El agua pasa a los sedimentadores donde los flóculos caen al fondo por su propio peso, en este proceso es donde se elimina la mayor parte de las impurezas, otorgando mayor claridad al agua (Ávila, 2013).



vi. Filtración

En este proceso el agua pasa a la etapa final de clarificación por medio de un filtro, que está compuesto por una capa de arena y otra de antracita, este medio poroso permite que el agua llegue a la turbiedad y color establecido por la norma INEN 1108: agua para consumo humano, requisitos, sexta revisión 2020, pues las partículas que no fueron removidas en el anterior proceso quedan retenidas en el filtro, el mismo que posee un retro lavado mediante aire (Ávila, 2013).

vii. Desinfección

Aquí es donde se produce la muerte de todas las bacterias y otros microorganismos existentes en el agua causantes de diversas enfermedades, mediante el uso de un agente químico desinfectante, siendo el más común el cloro gas (Ávila, 2013).

viii. Monitoreo

Son de suma importancia ya que ayuda a tener el correcto tratamiento del agua al ser potabilizada, e identificar variaciones físicas, químicas y bacteriológicas (Ávila, 2013). A continuación, se observa el esquema del proceso de potabilización:

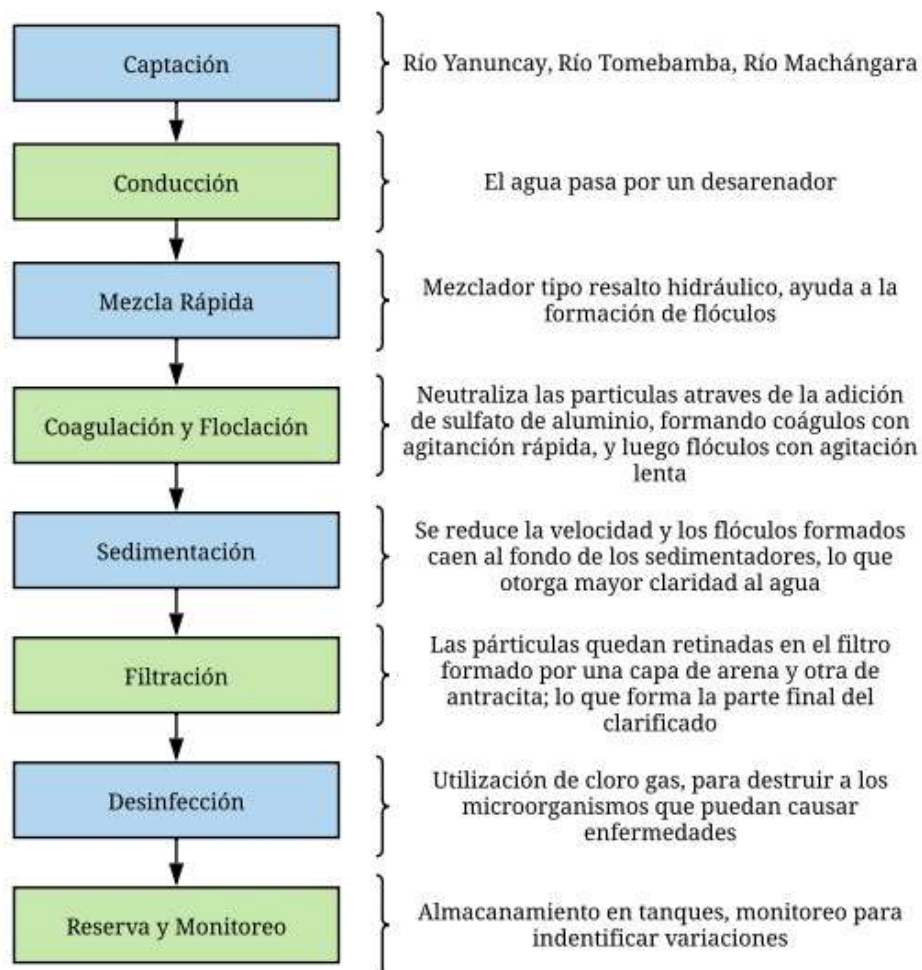


Figura 2: Esquema del proceso de potabilización del agua de las plantas de Tixán, Sustag y El Cebollar
Fuente: Elaboración propia

La **planta de potabilización de San Pedro**, se diferencia del proceso mencionado anteriormente por el módulo tipo DAFFI que se detalla a continuación: (Agua Potable, 2020). Ver figura 3.

1. Captación

La fuente principal de agua es el río Culebrillas, por lo que su captación se encuentra en el sector de Culebrillas (Agua Potable, 2020).

2. Conducción

El agua pasa por desarenador y se transporta a la planta por una tubería (Agua Potable, 2020).



3. Coagulación:

El agua pasa a un tanque mezclador en donde se le adiciona sulfato de aluminio como coagulante mediante un dosificador, este sistema cuenta con un mezclador mecánico para asegurar que la mezcla sea adecuada, además se adiciona un polímero en la transición del taque al módulo DAFI para que ayude a la formación de flóculos (Piedra Aguilera, 2017)

4. Floculación y filtración:

Se realiza en el módulo DAFFI (flotación por aire disuelto y filtración) (Agua Potable, 2020), que es un tanque circular, que posee en la parte superior un puente giratorio con dos funciones principales: en un extremo se barre el agua con flóculos o flocs suspendidos por la alimentación de aire generado por compresores, y el otro extremo está el canal de evacuación de agua de lavado; este tanque posee tres compartimentos concéntricos, el primero cercano al eje es de evacuación de agua de lavado, el segundo es el que recibe el agua del tanque de coagulación en la parte superior cuenta con ranuras que permiten el paso del agua al tanque exterior de mayor tamaño y en el tercer tanque se realiza dos procesos importantes: el primero la inyección de aire para lograr que los flóculos formados floten y sean absorbidos por el puente, el segundo la filtración para la retención de partículas finas, que son filtros a presión y están formados con lechos de basaltos, antracita y arena, el agua filtrada es recogida por un tubo perimetral (Piedra Aguilera, 2017).

5. Tanques de aguas claras

El agua que se receipta a partir del módulo DAFFI, se deposita en estos tanques, en donde se da la mezcla con el cloro mediante una bomba dosificadora (Agua Potable, 2020).

A continuación, se presenta el esquema del proceso de potabilización de la Planta de San Pedro:

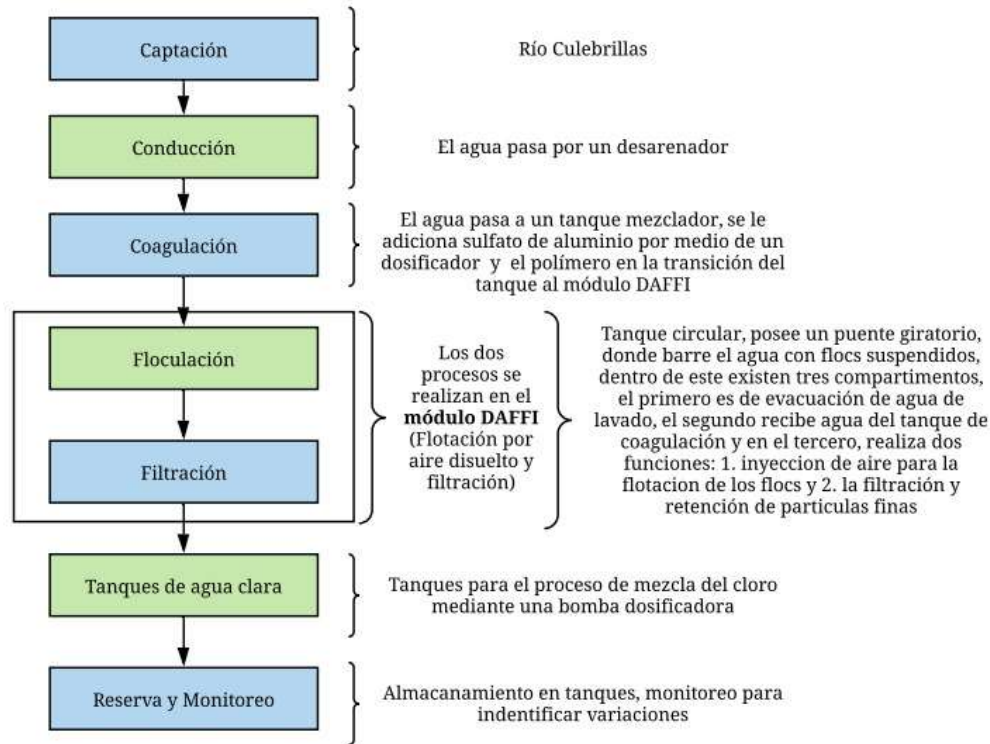


Figura 3: Esquema del proceso de potabilización de agua de la planta San Pedro
Fuente: Elaboración propia.

1.4 Aguas Residuales

Son aguas residuales “Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original” (TULSMA, 2017).

Estas aguas tienen una elevada cantidad de metales, contaminantes orgánicos y biológicos por lo que es necesario su tratamiento antes de ser liberadas al ambiente. Estudios de la CEPAL indican que los países desarrollados tratan el 70 % del agua residual y este porcentaje baja a entre el 25 y 30 % en el caso de América Latina (BID & CEPAL, 2018). Además, los tratamientos usados en países en desarrollo son generalmente primarios y secundarios menos sofisticados y efectivos (Pinos, et. al, 2019).

La organización mundial de la salud (2012), ha establecido guías únicamente para el uso de aguas residuales en la agricultura, debido a que se ha dado un crecimiento en los cultivos, por tanto,



se debe encontrar un balance entre estos recursos y la salud pública. Estas guías pueden ser adaptadas a diferentes condiciones locales, sociales, económicas y ambientales. Sin embargo, aún no ha desarrollado guías para descargas de agua residual.

1.4.1 Tratamiento convencional para efluentes

Es aquel que está conformado por tratamiento primario y secundario, incluye desinfección (TULSMA, 2017).

- **Tratamiento primario.** - Contempla el uso de operaciones físicas tales como: desarenado, mezclado, floculación, flotación, sedimentación, filtración y el desbaste (principalmente rejillas, mallas, o cribas) para la eliminación de sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual (TULSMA, 2017).
- **Tratamiento secundario.** - Contempla el empleo de procesos biológicos y químicos para remoción principalmente de compuestos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos. El tratamiento secundario generalmente está precedido por procesos de depuración unitarios de tratamiento primario (TULSMA, 2017).

1.4.2 Tratamiento avanzado para efluentes

Es el tratamiento adicional necesario para remover sustancias suspendidas y disueltas que permanecen después del tratamiento convencional para efluentes (TULSMA, 2017).

1.4.3 Proceso de tratamiento de aguas residuales, Ucubamba, Cuenca

“La planta dispone de un proceso de depuración compuesto por estructuras de tratamiento preliminar y un sistema de lagunas de estabilización en dos líneas, formado por laguna aireadas primarias, lagunas facultativas y lagunas de maduración terciaria. El proceso de depuración implica la transformación de sustancias y la acumulación de sólidos existentes en las aguas residuales, en el fondo de las lagunas aireadas y facultativas, lo que ocasiona una pérdida de volumen útil de tratamiento y como resultado una reducción de la eficiencia del sistema” (Ávila, 2013). Ver figura 4.

i. Cajón de llegada - bypass - compuerta de admisión

Su función principal es romper la presión y permitir que el agua residual rebose el bypass (Ávila, 2013).



ii. Cribas mecánicas auto limpiantes

Su función principal es retener y evacuar desechos sólidos de gran tamaño, para que no interfieran con los procesos biológicos en el sistema de las lagunas (Ávila, 2013).

iii. Deflectores de caudal - desarenadores- transportador de arena

Los desarenadores se encuentran aguas abajo de las cribas, su función principal es retener y evacuar materiales o partículas de arena, además protegen a los aireadores de la abrasión y del desgaste, por otro lado, los deflectores reducen la velocidad de ingreso de las aguas residuales a los desarenadores, aumentando así su flujo y el transportador de arena, remueve la arena que está cubierta con cal para evitar olores (Ávila, 2013).

iv. Lagunas aireadas

Son las que constituyen inicialmente para el tratamiento biológico y se encarga de asimilar materia orgánica solubles, mantiene las condiciones aeróbicas para que pasen a la siguiente unidad, ayuda a la separación de sólidos y reducción de carga orgánica y el conteo bacteriano (Ávila, 2013).

v. Lagunas facultativas

Es donde se almacenan y asimilan los desechos biológicamente tratados en las anteriores lagunas, manteniendo un límite adecuado de carga orgánica y balance de oxígeno, permite sustentar algas en la parte superior, provocando la mortalidad bacteriana y removiendo nematodos intestinales (Ávila, 2013).

vi. Lagunas de maduración

En estas lagunas no llegan sólidos biológicos distintos de algas, por lo que no acumulan lodo. Se elimina la contaminación remanente de los anteriores procesos (Ávila, 2013). A continuación, se muestra el esquema del proceso de tratamiento de aguas residuales:

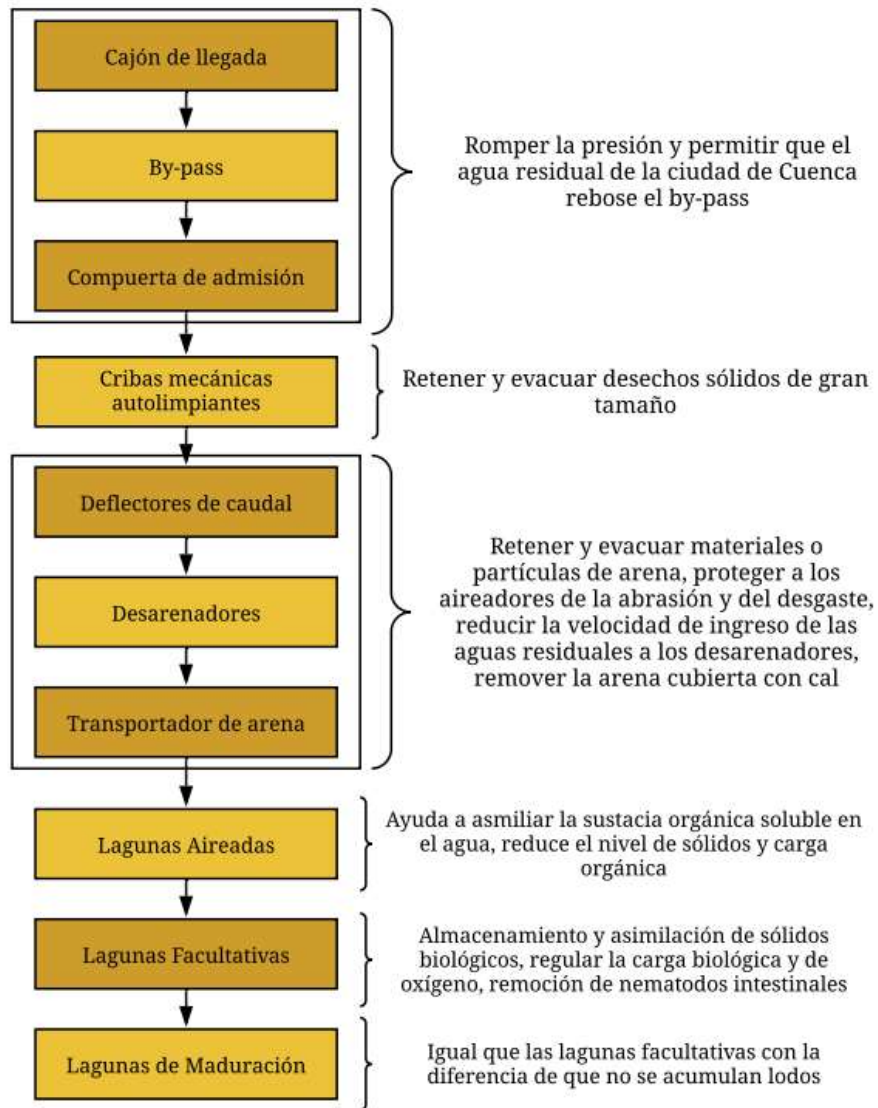


Figura 4: Esquema del proceso de tratamiento de aguas residuales Ucubamba
Fuente: Elaboración propia



CAPÍTULO II: CALIDAD DEL AGUA: CONTENIDO DE METALES Y TOXICIDAD

2.1. Metales

2.1.1 Metales pesados en el agua

i. Aluminio

El aluminio es el tercer metal más abundante en la corteza terrestre, combinado con otros metales, siendo la bauxita la causa principal de su presencia ya que contiene hasta un 55% de alúmina. Este metal tiene varios usos industriales en forma de aleaciones, pudiendo contener trazas de cromo, plomo, bismuto, entre otros, dependiendo su uso. La toxicidad del aluminio dependerá de diversos factores como el pH del agua, contenido de materia orgánica, tiempo de exposición y concentración, por tanto, será de acuerdo a la disponibilidad biológica de este elemento o de la movilización de iones de aluminio tóxicos resultado de aspectos físicos como membranas fosfolipídicas o químicos como el pH del suelo y agua, debido a las lluvias ácidas, así también por la acidificación de la atmósfera circundante provocando efectos negativos en el ambiente (Cardozo & Tapiero, 2010; Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014a; Nordberg, 2011). Las propiedades físico-químicas del aluminio se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1: Propiedades físico-químicas del aluminio

ALUMINIO	
Número atómico	13
Valencia	3
Estado de oxidación	+3
Electronegatividad	1.5
Radio covalente	1.18
Radio iónico	0.5
Radio atómico	1.43
Masa atómica (g/mol)	26.9815
Densidad (g/ml)	2.7
Punto de ebullición °C	2450
Punto de fusión °C	660

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

El aluminio puede resultar perjudicial para la salud humana cuando se encuentra de forma soluble, es decir en iones, formando compuestos como el cloruro de aluminio. Pero, en sí, resulta difícil determinar un periodo de tiempo en el que se pueda provocar una toxicidad, ya que sus síntomas pueden presentarse en segundos, mientras que otros después de algún tiempo de



exposición a este compuesto, además, dependerá de su concentración, si ésta es alta puede causar efectos de neurotoxicidad como la atrofia neuronal por tanto daños en el sistema nervioso central, demencia, pérdida de la memoria, temblores severos, entre otros. Estos casos pueden darse en personas que se desarrollan en zonas de trabajo como minas o fábricas donde se usa el aluminio durante el proceso productivo, ha causado daños tan severos llegando a ocasionar cáncer o la necesidad de diálisis renal en los trabajadores (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; Nordberg, 2011).

2. Efectos ambientales del aluminio

El aluminio puede ser muy tóxico en organismos acuáticos, está directamente relacionado con el pH del agua en la que se encuentran, si este es elevado el aluminio precipita como hidróxido y floclula en el agua, en este estado es muy poco tóxico ya que se asemeja al suspendido en sólidos. Es por ello, que el aluminio en concentraciones altas puede ser muy tóxico para animales acuáticos es por ello que lagos acidificados con concentraciones de aluminio, son un peligro principalmente para organismos que respiran con branquias como los peces, causándoles fallo osmorregulador al destruir el plasma y los iones hemolinfa, afectando no sólo a estas especies, sino también a pájaros u otros animales que se alimentan de éstos, interfiriendo en el equilibrio ecológico y del ecosistema (Cardozo & Tapiero, 2010; Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014).

ii. Arsénico

El arsénico es un metal que se encuentra en grandes cantidades en la naturaleza combinado con cobre, plata, plomo, oro, entre otros. Siendo el más usado a nivel industrial el trióxido de arsénico, el mismo que es un subproducto de la fundición de plomo y cobre. Presenta una propiedad semi metálica, es muy tóxico y cancerígeno, de acuerdo al estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio biológico en el que se encuentre, donde la arsina se considera el compuesto más tóxico mientras los compuestos arsenicales y arsénico elemental serían los menos tóxicos (Cardozo & Tapiero, 2010; Jaishankar et al., 2014). Las propiedades físico-químicas del arsénico se pueden observar en la tabla 2.



Tabla 2: Propiedades físico-químicas del arsénico

ARSENICO	
Número atómico	33
Valencia	+3, -3, +5
Estado de oxidación	+5
Electronegatividad	2.1
Radio covalente	1.19
Radio iónico	0.47
Radio atómico	1.39
Masa atómica (g/mol)	74.922
Densidad (g/ml)	5.72
Punto de ebullición °C	613
Punto de fusión °C	817

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

Es uno de los compuestos más tóxicos para la salud humana, presenta varias vías de acceso como el agua, aire o comida, inclusive por el contacto con la piel. La exposición a niveles altos de arsénico se produce generalmente en lugares de trabajo, en sitios de desechos peligrosos y zonas con niveles altos naturales, como suelo, rocas y agua. Puede provocar toxicidad aguda o crónica por medio de la vía digestiva, causando decoloración de la piel, aparición de pequeños callos o verrugas, alteraciones del sistema nervioso central, delirio, entre otras. En grandes concentraciones puede causar infertilidad, abortos en mujeres, perturbaciones en el corazón o la piel, inclusive según la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (USEPA) le clasifica al arsénico en el grupo A de metales cancerígenos, considerando sus efectos en la salud humana, llegando hasta la muerte (Cardozo & Tapiero, 2010; Lenntech, 2014; OSHA, 2015).

2. Efectos ambientales del arsénico

El arsénico al ser un elemento fácilmente absorbido por plantas, se relaciona directamente con la alimentación de los animales, y por ende del ser humano. Este contaminante es emitido en la mayoría de los casos por las industrias que son productoras de cobre, plomo, zinc y agricultura, así también se lo puede encontrar en el agua potable por el uso de pesticidas arsenicales, depósitos minerales naturales o eliminación incorrecta de químicos arsenicales, por tanto, se ha encontrado que la presencia de este contaminante en el agua altera genéticamente a los peces, por su presencia en plantas que son el alimento de estos, pues presentan mal funcionamiento de la respiración



celular, enzimas celulares y mitosis, causando un desequilibrio ecológico y del ecosistema (Cardozo & Tapiero, 2010; Lenntech, 2014; Jaishankar et al., 2014).

iii. Bario

El bario es uno de los elementos químicos más abundantes en la corteza terrestre, siendo su principal fuente la barita y witherita. Se presenta usualmente combinado con elementos como azufre, carbón u oxígeno. Es muy usado en aleaciones para piezas de níquel-bario. Pero su uso debe ser limitado, ya que presenta toxicidad a determinadas concentraciones, inclusive presenta riesgo de explosión. La cantidad de bario que se encuentra en el agua potable es pequeña. Se utiliza para realizar perforación en la industria petrolera, también se utiliza para la fabricación de pinturas, ladrillos, tejas, vidrios, caucho entre compuestos de bario (ATSDR, 2015; Lenntech, 2014). Las propiedades físico-químicas del bario se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3: Propiedades físico-químicas del bario.

BARIO	
Número atómico	56
Valencia	+2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	0.9
Radio covalente	1.98
Radio iónico	1.35
Radio atómico	2.22
Masa atómica (g/mol)	137.34
Densidad (g/ml)	3.5
Punto de ebullición °C	1640
Punto de fusión °C	714

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

Este elemento en compuestos solubles, puede ser muy tóxico, además la inhalación de compuestos insolubles puede producir neumoconiosis. Otros de sus derivados de sulfuros, óxidos o carbonatos producen irritación en los ojos, nariz, garganta y piel. En algunas personas, la exposición a pequeñas cantidades por periodos cortos puede producir vómitos, alteraciones en la presión sanguínea, diarrea, entre otros; existen estudios en los que se investiga acerca de la contaminación prolongada en pequeñas cantidades de bario (ATSDR, 2015; Espinal & Edgardo, 2016; Lenntech, 2014c; Nordberg, 2011).



2. Efectos ambientales del bario

El bario puede combinarse de forma natural, en el agua con iones sulfato o carbonato, para posteriormente transformarse a formas más complejas y que perduren más en el ambiente. Al ser un metal muy usado en industrias de aceite, lubricantes, pinturas, vidrio, gomas, minas procesos de refinado, entre otros, es liberado al ambiente en cantidades considerables, además presenta solubilidad en diferentes medios, lo que hace que pueda recorrer grandes distancias. En lo referente al ecosistema acuático, puede ser absorbido por peces u otros organismos acumulándose en su cuerpo, ya que se queda en el sedimento de las aguas (ATSDR, 2015; Espinal & Edgardo, 2016; Lenntech, 2014c; Nordberg, 2011).

iv. Calcio

El calcio es el tercer metal más abundante en la corteza terrestre, teniendo una gran distribución en todo el mundo. En la industria se lo obtiene por electrólisis del cloruro de calcio fundido, si se lo tiene en estado puro se lo puede transformar en alambre, prensar y amartillar en placas. Tiene la capacidad de formar películas finas de óxido y nitruro en el aire. En su forma comercial, es capaz de reaccionar de forma fácil con el agua y ácidos, para producir hidrógeno que a su vez forma ciertas impurezas de amoníaco e hidrocarburos (ATSDR, 2019d; Lenntech, 2014). Las propiedades físico-químicas del calcio se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4: Propiedades físico-químicas del calcio.

CALCIO	
Número atómico	20
Valencia	+2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1
Radio covalente	1.74
Radio iónico	0.99
Radio atómico	1.97
Masa atómica (g/mol)	40.08
Densidad (g/ml)	1.55
Punto de ebullición °C	1440
Punto de fusión °C	838

Fuente: Elaboración propia



1. Riesgos para la salud humana

El calcio es un metal que puede ser fácilmente asimilado por el ser humano, ya que se encuentra en alimentos como la leche animal, frutos secos, vegetales, entre otros. Por tanto, compone el esqueleto y dientes de los seres humanos, lo que lo convierte en una necesidad para las personas, su déficit provoca osteoporosis. Pero su exceso también puede ser contraproducente, provocando piedras en los riñones, esclerosis, cáncer de hueso, glándula tiroides activa, entre otras múltiples enfermedades (Lenntech, 2014e; Mandal, 2011; Schlumberger, 2013).

2. Efectos ambientales del calcio

Este elemento es un constituyente esencial para la formación del esqueleto de los animales y como ion fisiológico, así como, para el crecimiento de las plantas ya que es un constituyente estructural. En el mar se lo encuentra como cloruro de calcio. Por tanto, en las concentraciones adecuadas, no representa un peligro para los organismos vivos. No obstante, podría darse una contaminación por el calcio, cuando está en concentraciones elevadas produciendo dureza en el agua, ya sea de mar o agua dulce. Lo cual ocurre cuando el calcio soluble de diversas fuentes como yeso, anhidrita, cemento sin fraguar, entre otros, llega al agua. Esto podría afectar el ecosistema de plantas o animales y por ende afectar su normal desarrollo (Lenntech, 2014e; Mandal, 2011; Schlumberger, 2013).

v. Cadmio

El cadmio es un metal blando que usualmente se lo encuentra junto con el zinc, en la naturaleza. Es un elemento muy resistente a la corrosión, se usa para electrodeposición en otros metales, tales como acero y hierro en industrias que elaboran partes de aviones y vehículos. En la actualidad, la mayor parte de este metal se obtiene de subproductos y recuperado de baterías de níquel-cadmio, industrialmente las tres cuartas partes del cadmio son empleadas en la fabricación de pilas alcalinas como componente de electrodo mientras que la parte restante se usa en revestimientos, pigmentos, enchapados y como estabilizador de plástico (Jaishankar et al., 2014; Nordberg, 2011; OSHA, 2015). Las propiedades físico-químicas del cadmio se pueden observar en la tabla 5.



Tabla 5: Propiedades físico-químicas del cadmio.

CADMIO	
Número atómico	48
Valencia	+2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.7
Radio covalente	1.48
Radio iónico	0.97
Radio atómico	1.54
Masa atómica (g/mol)	112.4
Densidad (g/ml)	8.65
Punto de ebullición °C	765
Punto de fusión °C	320.9

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

La intoxicación por cadmio en humanos, se da principalmente en lugares de trabajo, en donde se puede encontrar en el aire concentraciones altas que provocan desde neumonitis química, llegando hasta edema pulmonar. También se pueden producir intoxicaciones crónicas debido a la exposición de óxidos de cadmio, pudiendo causar lesiones renales, daños en los huesos y anemia, inclusive para trabajadores que han estado mucho tiempo expuestos al cadmio pueden presentar mortalidad por cáncer pulmonar. Siendo más peligroso en mujeres, debido a que tienen menos reservas de hierro en sangre y por ende pueden absorber más cadmio. Por otra parte, también se puede encontrar la presencia de este metal en ciertos alimentos o en el humo del tabaco (Lenntech, 2014d; Nordberg, 2011; WHO, 2007).

2. Efectos ambientales del cadmio

El cadmio es liberado al ambiente a través de ríos, debido a la descomposición de rocas, también por fuegos forestales y volcanes. La otra parte del cadmio es resultado de actividades provocadas por el ser humano, haciendo que termine en aguas residuales y por ende en los suelos y sedimentos, donde puede permanecer por décadas y las plantas absorben este metal, causándoles un efecto negativo en los sistemas enzimáticos de las células, estrés oxidativo y deficiencia nutricional en estas plantas y esta concentración pasa a toda la cadena alimentaria (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; Nordberg, 2011; WHO, 2007).



vi. Cobalto

El cobalto presenta una gran distribución en la naturaleza, pues se encuentra en meteoritos, estrellas, suelos, plantas e inclusive se presenta como trazas en otros minerales como el hierro, cobre, zinc, entre otros. Este elemento no se ve afectado por el aire ni el agua en condiciones normales, inclusive es resistente al desgaste y la corrosión a temperaturas elevadas, se puede mezclar con otros metales para formar aleaciones que son más duras y resistentes, también se utiliza para colorantes de vidrio, cerámica y pintura (ATSDR, 2004; Lenntech, 2014). Las propiedades físico-químicas del cobalto se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6: Propiedades físico-químicas del cobalto.

COBALTO	
Número atómico	27
Valencia	+2, +3
Estado de oxidación	+3
Electronegatividad	1.8
Radio covalente	1.26
Radio iónico	0.63
Radio atómico	1.25
Masa atómica (g/mol)	58.93
Densidad (g/ml)	8.9
Punto de ebullición °C	2900
Punto de fusión °C	1495

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

Este elemento puede ser fácilmente inhalado, bebido o inclusive ingerido por los seres humanos, ya que se encuentra ampliamente distribuido por todo el ambiente. El cobalto en algunos casos es beneficioso para los seres humanos, ya que es parte de la vitamina B12. No obstante, a concentraciones muy altas puede provocar enfermedades como: asma, vómitos, náuseas, daño en los pulmones y neumonía. En ocasiones se encuentra en suelos cercanos a mineras, haciendo que se disperse a plantas comestibles y por ende afectar a la salud de las personas, el cobalto radiactivo puede generar grandes daños en la salud perjudicando así a las células del cuerpo dependiendo del tiempo de exposición que se encuentre el individuo (ATSDR, 2004; Lenntech, 2014).

2. Efectos ambientales del cobalto

Es un elemento que se encuentra de forma natural en el ambiente, por lo tanto, en concentraciones adecuadas no causa efectos negativos, inclusive en plantas de producción de



energía nuclear se generan isótopos radiactivos que no son peligrosos, pues tienen una desintegración media corta. El cobalto presente en suelos cercanos a minas y fundiciones pueden contener concentraciones muy elevadas de cobalto, acumulándose en plantas y cuerpos de animales que se alimentan de esas plantas, este efecto no es usual, pequeñas cantidades de este metal puede liberado por el humo de los vehículos, actividades industriales como la minerías, accidentes nucleares, desechos radioactivos y operaciones de plantas nucleares (ATSDR, 2004; Lenntech, 2014).

vii. Cobre

El cobre es un metal muy conocido por su gran capacidad de conducir el calor y la electricidad, además tiene una alta ductilidad y se considera esencial para el metabolismo humano. Su principal fuente se encuentra en sulfuros minerales como calcocita, covelita, entre otros. Es ampliamente utilizado en industrias que elaboran productos para la prevención de la putrefacción de la madera, telas, fungicidas, pesticidas e inclusive como catalizador. Como el acetiluro de cobre puede causar explosiones en fábricas; este metal es utilizado para la manufactura de alambre, láminas del metal, cañerías y otros productos de este metal (ATSDR, 2019g; Lenntech, 2014g; Nordberg, 2011). Las propiedades físico-químicas del cobre se pueden observar en la tabla 7.

Tabla 7: Propiedades físico-químicas del cobre.

COBRE	
Número atómico	29
Valencia	1, 2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.9
Radio covalente	1.38
Radio iónico	0.69
Radio atómico	1.28
Masa atómica (g/mol)	63.54
Densidad (g/ml)	8.96
Punto de ebullición °C	2595
Punto de fusión °C	1083

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

El cobre se encuentra en algunos alimentos, agua potable y aire, siendo necesario para la salud, por tanto, en cantidades proporcionalmente altas, es muy tolerable, pero a concentraciones muy superiores si puede provocar efectos negativos en la salud. La principal amenaza se encuentra en



compuestos solubles de cobre, encontrados en el agua, los mismos que han sido liberados por la aplicación de la agricultura. Cuando la exposición se da por largos periodos, es decir en ambientes de trabajo, puede irritar la nariz, boca, ojos, dolor de estómago, vómitos y diarreas. Inclusive a concentraciones ya muy superiores puede provocar daño al hígado y riñones, llegando a la mortalidad (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014; Nordberg, 2011).

2. Efectos ambientales del cobre

La liberación del cobre al medio ambiente, puede darse de forma natural o como consecuencia de actividades humanas, las cuales han aumentado a nivel mundial, por tanto, se ha incrementado la concentración en el medio ambiente, usualmente se deposita en ríos, a través del vertimiento de aguas residuales, en este medio puede viajar largas distancias, pero también puede terminar en el suelo formando parte de la materia orgánica y mineral del mismo, esto causa un efecto perjudicial en las plantas, pues el cobre es tóxico para estas y por ende, estas no pueden crecer y desarrollarse en este tipo de medios, siendo una amenaza para granjas. Además, causa acidez en el suelo, no permite el desarrollo de microorganismos y lombrices de tierra (ATSDR, 2019g; Lenntech, 2014g; Nordberg, 2011).

viii. Cromo

El cromo es un metal muy suave y dúctil, usado principalmente en aleaciones anticorrosivas que proporcionan gran dureza y resistencia al calor, empleadas como recubrimiento para galvanizados, cromado de una gran variedad de equipos eléctricos o piezas de automóviles. Su principal fuente es la cromita que se encuentra distribuida por toda la corteza terrestre, se puede encontrar en diferentes productos como en madera tratada, curtido de cuero, etc. (ATSDR, 2019; Jaishankar et al., 2014; Nordberg, 2011). Las propiedades físico-químicas del cromo se pueden observar en la tabla 8.



Tabla 8: *Propiedades físico-químicas del cromo.*

CROMO	
Número Atómico	24
Valencia	2, 3, 4, 5, 6
Estado de oxidación	+3
Electronegatividad	1.6
Radio covalente	1.27
Radio iónico	0.69
Radio atómico	1.27
Masa atómica (g/mol)	51.996
Densidad (g/ml)	7.19
Punto de ebullición °C	2665
Punto de fusión °C	1875

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

El cromo se encuentra usualmente en concentraciones bajas en el aire y agua, también se encuentra en ciertos alimentos como vegetales, frutas, carnes, entre otros, siendo esencial para los seres humanos, inclusive su falta, podría ocasionar problemas al corazón, trastornos metabólicos y diabetes. Así también, la exposición profesional a este elemento puede provocar erupciones cutáneas, problemas respiratorios, daño en riñones, hígados llegando hasta un cáncer de pulmón y la mortalidad. El cromo es considerado un metal con efecto cancerígeno (ATSDR, 2019; Jaishankar et al., 2014; Nordberg, 2011).

2. Efectos ambientales del cromo

El cromo puede ocasionar diversos efectos en los organismos, de acuerdo a su forma cromo III o cromo VI, procedentes de industrias textiles, pinturas, combustión del carbón, entre otros. Siendo el segundo, el más tóxico, pudiendo provocar cáncer y alteraciones en el material genético, por tanto, se requiere un control estricto en cultivos. No es usual que el cromo se encuentre en los peces, pero en concentraciones ya sea muy bajas o muy elevadas podría causar daños como problemas respiratorios, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores (ATSDR, 2019; Jaishankar et al., 2014; Nordberg, 2011).

ix. Hierro

El hierro ocupa el segundo lugar, de los metales más abundantes en la corteza terrestre, ha demostrado ser un buen agente reductor, de acuerdo a las condiciones en las que se encuentre. Su



principal fuente es la hematita. Muy empleado en la fabricación de piezas de hierro y acero fundido, así también en aleaciones con otros metales. Otra de sus aplicaciones es para aumentar la densidad de los líquidos en las perforaciones petrolíferas, fabricación de imanes, tintes y abrasivos. El hierro es un elemento fundamental para el crecimiento de los organismos. La abundancia de especies en el agua se ve afectada directa e indirectamente por el hierro (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; Nordberg, 2011). Las propiedades físico-químicas del hierro se pueden observar en la tabla 9.

Tabla 9: Propiedades físico-químicas del hierro.

HIERRO	
Número atómico	26
Valencia	2, 3
Estado de oxidación	+3
Electronegatividad	1.8
Radio covalente	1.25
Radio iónico	0.64
Radio atómico	1.26
Masa atómica (g/mol)	55.847
Densidad (g/ml)	7.86
Punto de ebullición °C	3000
Punto de fusión °C	1536

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

Es un metal que se encuentra en varios alimentos desde carne hasta vegetales, es un constituyente importante de la hemoglobina. No obstante, en concentraciones excesivas y con exposición a vapores o polvos de óxidos de hierro puede provocar desde conjuntivitis, coriorretinitis, retinitis, hasta neumoconiosis benigna e incremento del riesgo a desarrollar cáncer de pulmón, tiene efecto corrosivo tanto en los órganos del tracto gastrointestinal y fluidos biológicos. Los radicales libres de hidrógeno libre que se da por el hierro, atacan principalmente al ADN, dando mutaciones y tumores benignos (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; Nordberg, 2011).

2. Efectos ambientales del hierro

Este metal puede resultar peligroso para el medio ambiente, cuando se encuentra como hierro III-o-arsenito, pentahidratado, por lo que se debe controlar su presencia en plantas, aire o agua, afectando principalmente a las plantaciones debido a las altas concentraciones que se encuentran



en el suelo y en el agua, generando una coloración marrón (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; Nordberg, 2011).

x. Manganeso

Este elemento es uno de los metales de transición, es de gran importancia en la fabricación del acero, se encuentra de manera abundante en la corteza terrestre ya que forma parte de las estructuras rocosas, agua y productos biológicos. Es un metal muy reactivo, ya que en su forma sólida reacciona lentamente, pero si se encuentra el polvo reacciona con facilidad. Posee muchas aplicaciones industriales, ya que como óxido se utiliza como agente desecante o catalizador en pinturas, barnices, y como decolorante en la industria de vidrio y pilas secas, cuando se encuentra en forma de permanganato de potasio se le utiliza como blanqueador y decoloración de dientes, y como agente oxidante en química analítica y preparativa. También se le puede usar como aditivo en la gasolina para mejorar el octanaje (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014). Las propiedades físico-químicas del manganeso se pueden observar en la tabla 10.

Tabla 10: Propiedades físico-químicas del manganeso.

MANGANESO	
Número atómico	25
Valencia	2, 3, 4, 6, 7
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.5
Radio covalente	1.39
Radio iónico	0.8
Radio atómico	1.26
Masa atómica (g/mol)	54.938
Densidad (g/ml)	7.43
Punto de ebullición °C	2150
Punto de fusión °C	1245

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

El magnesio al ser un elemento principal en el cuerpo humano, este al no cumplir la ración diaria la salud disminuye, pero si se consume en exceso existe altos problemas de salud. Los efectos que se dan son principalmente en el tracto respiratorio y en el cerebro, ya que por consumo excesivo de este puede producir un envenenamiento llevando a que el humano tenga alucinaciones, olvidos y daño en los nervios, llegando a provocar Parkinson, embolia pulmonar y bronquitis. También al ser expuesta en un tiempo largo a este elemento puede producir esquizofrenia, depresión, debilidad



de músculos, dolor de cabeza e insomnio. En cambio, a la falta de este elemento en el cuerpo, puede producir sobrepeso, intolerancia a la glucosa, formación de coágulos de sangre, defectos de nacimiento, síntomas neurológicos y problemas en la piel. Se le considera un elemento cancerígeno en altas concentraciones o dosis (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).

2. Efectos ambientales del manganeso

Las concentraciones de manganeso en el aire aumentan de manera considerable por la actividad industrial, y la quema de productos fósiles; en agua las concentraciones de manganeso se derivan por fuentes humanas, y en el suelo se da por la aplicación como pesticida. Al ser ingerida por los animales puede generar disturbancias en sus pulmones, hígado y vasculares, decremento de presión sanguínea, falta de desarrollo de fetos de animales y daños cerebrales. En las plantas las concentraciones bajas de magnesio que son absorbidas del suelo pueden generar disturbaciones en la división de agua en hidrógeno y oxígeno, mientras en altas concentraciones dan un efecto tóxico ya que produce inflamación de la pared celular, abrasamiento de las hojas y puntos marrones en las hojas (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).

xi. Sodio

El Sodio es un metal suave y uno de los más importantes de los metales alcalinos, ocupa el sexto lugar como uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, y también en el agua de mar, se encuentra en forma de cloruro, carbonato, borato, nitrato y sulfato. Reacciona con el agua formando hidróxido de sodio, no reacciona con el nitrógeno y tampoco con los hidrocarburos parafínicos, con el carbono reacciona de una manera difícil y si reacciona de manera fácil con algunos halogenuros. Forma compuestos con naftaleno y otros aromáticos policíclicos y con aril alquenos (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014). Las propiedades físico-químicas del sodio se pueden observar en la tabla 11.



Tabla 11: Propiedades físico-químicas del sodio.

SODIO	
Número atómico	11
Valencia	1
Estado de oxidación	+1
Electronegatividad	0.9
Radio covalente	1.54
Radio iónico	0.95
Radio atómico	1.9
Masa atómica (g/mol)	22.9898
Densidad (g/ml)	0.97
Punto de ebullición °C	892
Punto de fusión °C	97.8

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

Este elemento es utilizado en varias de las comidas como sal común, por lo que el ser humano debe tener un balance al momento de consumir, ya que un exceso de esta sal puede dañar a los riñones e incrementar las posibilidades de hipertensión. Los vapores en forma de hidróxido de sodio causan irritación a los ojos, nariz y garganta generando una bronquitis y tos química, en contacto con la piel puede provocar quemaduras permanentes, y en contacto con los ojos puede generar la pérdida de la vista total y permanente (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).

2. Efectos ambientales del sodio

El Sodio de forma líquida es absorbida rápidamente en el suelo, llegando a contaminar las reservas de aguas, llegando a disminuir la acidez del agua, y afecta a los organismos acuáticos por sus propiedades irritantes, afectando en general a los peces agua dulce (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).

xii. Níquel

El níquel es un metal duro, blanco plateado, dúctil y maleable, tiene cinco isótopos naturales y siete radioactivos. Se emplea para la fabricación de acero inoxidable y con otras aleaciones resistentes a la corrosión, se usa en monedas como sustituto de la plata, y es usado como catalizador de hidrogenación. Es un mineral muy comercializado ya que se encuentra de manera abundante en la corteza terrestre. Resiste a la corrosión alcalina, y no es inflamable en grandes pedazos, sin



embargo, al momento de encontrarse en forma de tiras puede incendiarse. Es un agente reductor muy fuerte. La mayor parte de los compuestos de este metal son de color verde o azules. La mayor parte del níquel utilizado en las industrias del reciclaje en donde se encuentran las aleaciones de este metal (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014). Las propiedades físico-químicas del níquel se pueden observar en la tabla 12.

Tabla 12: Propiedades físico-químicas del níquel.

NIQUEL	
Número atómico	25
Valencia	2, 3, 4, 6, 7
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.5
Radio covalente	1.39
Radio iónico	0.8
Radio atómico	1.26
Masa atómica (g/mol)	54.938
Densidad (g/ml)	7.43
Punto de ebullición °C	2150
Punto de fusión °C	1245

Fuente: Elaboración propia

3. Riesgos para la salud humana

Este metal se encuentra en los alimentos naturalmente en pequeñas cantidades, el ser humano puede estar expuesto al respirar el aire, beber agua, en la comida o fumar cigarrillos ya que este humo tiene altas concentraciones de níquel, en pequeñas cantidades este elemento es esencial pero al consumir de manera inadecuado y excesiva produce problema en el tracto respiratorio, produciendo alergias, rinitis, sinusitis, cáncer en las cavidades nasales, pulmón y otros órganos (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).

4. Efectos ambientales del níquel

El níquel es liberado al aire por las plantas, pero cuando este elemento se encuentran grandes concentraciones en suelos arenosos puede dañar a la planta, y en el agua disminuye el crecimiento de las algas, al igual que los microorganismos que se encuentran en la presencia del níquel. En los animales al ser ingerido en grandes concentraciones puede producir cánceres en diferentes lugares del cuerpo de los animales, principalmente los que se encuentran alrededor de las refinerías (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).



xiii. Plomo

El plomo es un metal pesado, flexible, inelástico y que funde con facilidad. Su principal fuente es la galena, los óxidos son sus formas más importantes. Además, forman aleaciones con distintos metales como cobre, estaño, arsénico, entre otros. Es un metal tóxico cuyo uso indebido y excesivo ha llegado a producir envenenamiento en trabajadores, especialmente al ser inhalado. Sus principales aplicaciones se dan en la fabricación de acumuladores, tetraetilplomo, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones. El plomo utilizado se recupera de las baterías recicladas o trozos metal en donde se encuentra este elemento (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014; WHO, 2007). Las propiedades físico-químicas del plomo se pueden observar en la tabla 13.

Tabla 13: Propiedades físico-químicas del plomo.

PLOMO	
Número atómico	82
Valencia	2, 4
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.9
Radio covalente	1.47
Radio iónico	1.2
Radio atómico	1.75
Masa atómica (g/mol)	207.19
Densidad (g/ml)	11.4
Punto de ebullición °C	1725
Punto de fusión °C	327.4

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

El plomo al presentar una gama de aplicaciones, es muy susceptible de estar presente en diferentes tipos de trabajos y por ende en contacto con trabajadores, además se puede encontrar en algunas comidas como fruta, carnes, granos, entre otros. Puede provocar una serie de enfermedades como perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, incremento de la presión sanguínea, daño a los riñones, daño al cerebro, abortos, alterar la producción de espermatozoides, entre muchas otras enfermedades. El plomo inorgánico se considera cancerígeno para el humano (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014; WHO, 2007).



2. Efectos ambientales del plomo

Las sales de plomo pueden entrar al ambiente de muchas formas siendo una de estas, por tubos de escape de coches para luego depositarse en suelo y aguas, llegando a viajar largas distancias, esto sumado a otras formas ha causado contaminación, se acumula en organismos acuáticos provocándoles envenenamiento por plomo, para los crustáceos hace falta pequeñas concentraciones para afectarlos. Por tanto, al afectar a plantas y animales causa daños en toda la cadena alimenticia, Este metal puede provocar la corrosión de tuberías puede hacer que se presente cierta cantidad de plomo en el agua (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014; WHO, 2007).

xiv. Zinc

El zinc es un metal maleable, dúctil y de color gris, se utiliza para realizar aleaciones y recubrimiento protector de otros metales; se le puede encontrar en la corteza terrestre como mineral en forma de sulfuro de zinc, aunque también es un elemento esencial en muchos organismos vegetales y animales, es un buen conductor de calor y electricidad, considerándose un superconductor eléctrico, es un metal químicamente activo: los compuestos de este metal son usados en la industria farmacéutica, y también es usado para fabricar compartimentos de baterías secas (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014). Las propiedades físico-químicas del zinc se pueden observar en la tabla 14.

Tabla 14: Propiedades físico-químicas del zinc.

ZINC	
Número atómico	30
Valencia	2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.6
Radio covalente	1.31
Radio iónico	0.74
Radio atómico	1.38
Masa atómica (g/mol)	65.37
Densidad (g/ml)	7.14
Punto de ebullición °C	906
Punto de fusión °C	419.5

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

Este elemento es esencial en la salud humana, cuando consume grandes cantidades de zinc puede generar pérdida de apetito, disminución de la sensibilidad, sabor y olor, pequeñas llagas,



erupciones cutáneas, incluso genera defectos de nacimiento; pero al momento de tener una concentración grande de este metal en el cuerpo humano puede causar úlcera de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia, arteriosclerosis, y daños respiratorios; en el ambiente laboral cuando se ingesta zinc se le considera como la fiebre del metal, también puede ocasionar anemia, daño al páncreas, disminución del colesterol beneficioso (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).

2. Efectos ambientales del zinc

Las concentraciones de este metal aumentan por acción industrial o los emplazamientos para residuos tóxicos, por ello se encuentra el agua contaminada por acción de las aguas residuales de las plantas industriales, por lo incrementa la acidez del agua; en el caso del suelo cuando se encuentra contaminado afecta a los animales de la zona dañando su salud, y está al mismo tiempo al ser absorbido por el suelo llegan a contaminar las aguas subterráneas, interrumpe la actividad en el suelo que son la de los microorganismos y lombrices y la descomposición de la materia orgánica es más lenta; los abonos y el lodo también contribuyen que aumente la concentración de este metal en el suelo (ATSDR, 2019; Lenntech, 2014).

xv. Mercurio

El mercurio a temperatura ambiente es un líquido blanco plateado que puede formar soluciones conocidas como amalgamas con otros metales como plata, cobre, plomo. Se usa principalmente como mercurio metálico en interruptores eléctricos, fluido de trabajo en bombas, termómetros, termostatos, para la elaboración de lámparas de mercurio entre muchos otros diversos usos. Es un elemento muy tóxico y bioacumulativo, se le extrae de la minería como sulfuro de mercurio, el sulfuro y el óxido de mercurio se utiliza en la fabricación de pinturas (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; WHO, 2007). Las propiedades físico-químicas del mercurio se pueden observar en la tabla 15.



Tabla 15: Propiedades físico-químicas del mercurio.

MERCURIO	
Número atómico	80
Valencia	1, 2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.9
Radio covalente	1.49
Radio iónico	1.1
Radio atómico	1.57
Masa atómica (g/mol)	200.59
Densidad (g/ml)	16.6
Punto de ebullición °C	357
Punto de fusión °C	-38.4

Fuente: Elaboración propia

1. Riesgos para la salud humana

Este metal al encontrarse formando parte de ciertos equipos de uso en distintas áreas como los termostatos, pueden romperse y entrar en contacto directo con el ser humano, en una concentración bastante alta, lo que podría ocasionar daños en los nervios, cerebro, riñones, irritación en los ojos, reacciones en la piel, entre otras afecciones. De forma natural no debería estar presente en alimentos ni animales, sin embargo, en ocasiones sí lo está, especialmente en peces, por tanto, el consumo excesivo de estos podría causar las enfermedades antes mencionadas, incluyendo daño al ADN y cromosomas, así también defectos de nacimiento y abortos (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; WHO, 2007).

2. Efectos ambientales del mercurio

Este metal se encuentra en el ambiente al momento de las rupturas de minerales de rocas y suelos por la exposición al viento y agua, por lo que las concentraciones por fuentes naturales han permanecido, sin embargo, esta concentración aumenta a través del tiempo por la actividad humana, ya sea por la quema de productos fósiles, minería, fundiciones y combustión de residuos sólidos, otra actividad humana en la que afecta al suelo es por acción de los fertilizantes y vertidos de aguas industriales. En el agua la presencia de mercurio afecta al pH provocando una mayor acidez a esta. El mercurio cuando es absorbido por los microorganismos puede afectar a su sistema nervioso, al mismo tiempo a los peces dañando así la cadena alimenticia, la ingesta de mercurio en ciertos animales provoca daño a los riñones, trastornos en el estómago, daño intestinal, fallo en la reproducción y alteración en el ADN (Jaishankar et al., 2014; Lenntech, 2014; WHO, 2007).



2.2 Ensayos de toxicidad

Se considera tóxica a una sustancia o materia cuando debido a su cantidad, concentración o características físico-químicas o infecciosas presenta el potencial de:

- Causar o contribuir de modo significativo al aumento de la mortalidad, al aumento de enfermedades graves de carácter irreversible o a las incapacitaciones reversibles.
- Que presente un riesgo para la salud humana o para el ambiente al ser tratados, almacenados, transportados o eliminados de forma inadecuada.
- Que presente un riesgo cuando un organismo vivo se expone o está en contacto con la sustancia tóxica (TULSMA, 2017).

2.3 Análisis de toxicidad de los metales

Las pruebas de toxicidad se realizarán mediante el cálculo del índice de contaminación por metales tóxicos, este índice ayuda para identificar la calidad de agua y dar una información clara y sencilla a las autoridades, público y poder comparar las tendencias temporales de la calidad de agua. Se calcula mediante la siguiente ecuación (1): (Mahato et al., 2014 & Chaturvedi et al., 2019).

$$HPI = \sum_{i=1}^n HPI_i \quad (1)$$

Donde:

n: número de metales pesados

HPI i: índice de contaminación parcial de metales pesados para el enésimo metal

El cálculo de dicho índice de contaminación parcial de metales pesados, se realiza mediante la siguiente ecuación (2): (Mahato et al., 2014 & Chaturvedi et al., 2019).

$$HPI_i = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

Para el cálculo del subíndice del metal se usa la siguiente ecuación (3): (Mahato et al., 2014 & Chaturvedi et al., 2019).

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{[M_i - I_i]}{[S_i - I_i]} \times 100 \quad (3)$$

Para el cálculo del factor de ponderación de la unidad se usa la siguiente ecuación (4): (Mahato et al., 2014 & Chaturvedi et al., 2019).



$$W_i = \frac{1}{S_i} \quad (4)$$

Donde:

Wi: factor de ponderación de la unidad

Qi: subíndice del metal

Mi: concentración medida

Si: máxima concentración permitida

Ii: concentración máxima deseable

2.3.1 Normativas sobre el contenido de metales

i. Norma INEN 1108

En el caso del Ecuador las aguas muestreadas deben cumplir con la norma técnica INEN 1108: Sexta revisión 2020 mostrada a continuación. Ver tabla 16.

Tabla 16: Características físicas e inorgánicas con los límites permitidos del agua potable

Parámetro	Unidad	Límite permitido
Arsénico	mg/L	0.01
Cadmio	mg/L	0.003
Cloro libre residual	mg/L	0.3 a 1.5
Cobre	mg/L	2
Color aparente	Pt-Co	15
Cromo (cromo total)	mg/L	0.05
Fluoruro	mg/L	1.5
Mercurio	mg/L	0.006
Nitratos (como NO ₃ ⁻)	mg/L	50
Nitritos (como NO ₂ ⁻)	mg/L	3
Plomo	mg/L	0.01
Turbiedad	NTU	5

Fuente: Norma INEN 1108:2020

ii. Libro VI Anexo I TULSMA

Otro documento importante que se considera en el Ecuador, es la Norma de Calidad Ambiental (TULSMA) la cual es aplicada para diferentes tipos de agua, en este caso se han tomado las tablas con los límites permisibles para el agua destinada a consumo humano, ver tablas 17-18 y de los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce, ver tabla 19.



Tabla 17: Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requiere tratamiento convencional.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/L	0.2
Arsénico (total)	As	mg/L	0.05
Bario	Ba	mg/L	1
Cadmio	Ca	mg/L	0.01
Cloruro	Cl	mg/L	250
Cobre	Cu	mg/L	1
Color	color real	unidades de color	100
Fluoruro (total)	F	mg/L	1.5
Hierro (total)	Fe	mg/L	1
Manganeso (total)	Mn	mg/L	0.1
Mercurio (total)	Hg	mg/L	0.001
Nitrato	N-Nitrato	mg/L	10
Nitrito	N-Nitrito	mg/L	1
Olor y sabor			Es permitido olor y sabor removible por tratamiento convencional
Oxígeno disuelto	O.D.	mg/L	No menor al 80% del oxígeno de saturación y no menor a 6mg/L
Plata (total)	Ag	mg/L	0.05
Plomo (total)	Pb	mg/L	0.05
Potencial de hidrógeno	pH	mg/L	6 a 9
Selenio	Se	mg/L	0.01
Sodio	Na	mg/L	200
Temperatura		°C	Condición natural $\pm 3^\circ$
Turbiedad		UTN	100
Zinc	Zn	mg/L	5

Fuente: TULSMA, Libro VI, Anexo I



Tabla 18: Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/L	0.1
Arsénico (total)	As	mg/L	0.05
Bario	Ba	mg/L	1
Berilio	Be	mg/L	0.1
Boro (total)	B	mg/L	0.75
Cadmio	Ca	mg/L	0.001
Cobalto	Co	mg/L	0.2
Cobre	Cu	mg/L	1
Color	color real	unidades de color	20
Cloruros	Cl-	mg/L	250
Estaño	Sn	mg/L	2
Fluoruros	F	mg/L	menor a 1.4
Hierro (total)	Fe	mg/L	0.3
Litio	Li	mg/L	2.5
Manganeso (total)	Mn	mg/L	0.1
Mercurio (total)	Hg	mg/L	0.001
Níquel	Ni	mg/L	0.025
Nitrato	N-Nitrato	mg/L	10
Nitrito	N-Nitrito	mg/L	1
Olor y sabor			Ausencia
Oxígeno disuelto	O.D.	mg/L	No menor al 80% del oxígeno de saturación y no menor a 6 mg/L
Plata (total)	Ag	mg/L	0.05
Plomo (total)	Pb	mg/L	0.05
Potencial de hidrógeno	pH	mg/L	6 a 9
Selenio (total)	Se	mg/L	0.01
Sodio	Na	mg/L	200
Sulfatos	SO ₄ ⁼	mg/L	250
Temperatura	°C		Condición natural ± 3°
Turbiedad		UNT	10
Vanadio	V	mg/L	0.1
Zinc	Zn	mg/L	5

Fuente: TULSMA, Libro VI, Anexo 1



Tabla 19: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/L	5
Arsénico (total)	As	mg/L	0.1
Bario	Ba	mg/L	2
Boro (total)	Ba	mg/L	2
Cadmio	Cd	mg/L	0.02
Cloro activo	Cl	mg/L	0.5
Cloruros	Cl ⁻	mg/L	1000
Cobre	Cu	mg/L	1
Cobalto	Co	mg/L	0.5
Color real	Color real	unidades de color	Inapreciables en dilución: 1/20
Cromo	Cr+6	mg/L	0.5
Estaño	Sn	mg/L	5
Fluoruros	F	mg/L	5
Hierro (total)	Fe	mg/L	10
Manganeso (total)	Mn	mg/L	2
Mercurio (total)	Me	mg/L	0.005
Níquel	Ni	mg/L	2
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/L	10
Nitrógeno (total)	N	mg/L	15
Plata	Ag	mg/L	0.1
Plomo	Pb	mg/L	0.2
Potencial de hidrógeno	pH		5 a 9
Selenio	Se	mg/L	0.1
Sulfatos	SO ₄ ⁼	mg/L	1000
Sulfitos	SO ₃	mg/L	2
Sulfuros	S	mg/L	0.5
Temperatura	°C	mg/L	<35
Vanadio	V	mg/L	5
Zinc	Zn	mg/L	5

Fuente: TULSMA, Libro VI, Anexo I.

2.4. Índices de toxicidad

Los índices de toxicidad son una medida cuantitativa de la toxicidad de una sustancia determinada experimentalmente en animales de laboratorio, estos ejemplares deben dar una respuesta de toxicidad que sea extrapolable al hombre, para ello usan parámetros de evaluación de riesgos, cuyo valor se obtiene a partir de estudios dosis-respuesta. Se realiza una comparación entre los valores correspondientes a los parámetros con las dosis suministradas en los estudios de



exposición a tóxicos ambientales. Además, se basan en pruebas experimentales donde se observa los efectos de exposiciones de contaminantes controlados sobre animales de laboratorio. Para su medición se cuenta con varios parámetros que miden o determinan la toxicidad en la realización de los bioensayos: (Bartual Sánchez, 1984; Crites & Tchobanoglous, 2000; CSIC, 2003).

2.4.1 Concentración efectiva

Es la concentración de un efluente que trae consecuencias negativas apreciables en un porcentaje "x" de una población establecida (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.4.2 Concentración efectiva media

El CE50 o EC50, se puede describir como la concentración efectiva que afecta al 50 % de la población dada de organismos bajo condiciones definidas (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.4.3 Concentración letal

Es la concentración de un contaminante en un efluente que produce la muerte de un porcentaje "x" de la población de ensayo en un periodo de tiempo decretado (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.4.4 Concentración letal media

Representado por las siglas CL50 o LC50, que indica la concentración letal que produce la muerte del 50 % de la población dada de organismos bajo un conjunto específico de condiciones experimentales (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.4.5 Dosis letal absoluta

Denotada por DL100, muestra la cantidad o concentración más baja de una sustancia potencialmente tóxica que mata a 100% de los animales bajo prueba en condiciones estipuladas (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).



2.4.6 NEANO

Es el nivel de efectos agudos no observados que representa la mayor concentración de un efluente tóxico para la cual la mortalidad registrada es del 10 % o menor (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.4.7 CENO

Es la concentración de efectos no observables, indica que la mayor concentración continuada medida de un efluente para la cual no produce efectos crónicos en las especies experimentales después de 48 horas de exposición (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.4.8 MCEO

Es la menor concentración que produce efectos observables se determina por consecuencias que se encuentren en una población de organismos causadas por la menor concentración de un efluente. Para ello se establecen técnicas de análisis de varianzas (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.4.9 Valor crónico

Es una medida geométrica del CENO Y MCEO resultantes de ensayos practicados en ciclos parciales y completos, además en ensayos realizados con especies en sus primeras etapas de vida (Cardozo & Tapiero, 2010; Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.5 Toxicidad aguda

Este tipo de ensayo nos da la capacidad de obtener un resultado rápido. Estos ensayos nos permiten ver el punto de terminación de ensayo de mortalidad de los organismos; para la cual se utiliza la dosis letal media (CL50) o la concentración efectiva media (CE50), estos datos ayudarán para el estudio estadístico de las mismas ya sea de forma analítica o gráfica (Crites & Tchobanoglous, 2000).

El tiempo de duración de este tipo de pruebas debe ser entre 24 a 48 horas, para estos estudios se requiere neonatos de menos de 24 horas de nacidos que pertenezcan a la misma cepa los mismos que deben estar en las condiciones adecuadas, según los análisis requeridos, en este estudio, se somete a los organismos a condiciones extremas, es decir, sin alimento y únicamente en el medio



la concentración de tóxico previamente establecida, con el objetivo de determinar su respuesta; para el recuento de neonatos se coloca un número determinado antes de iniciar el ensayo y se vuelve a contar el número de dáfidos una vez transcurrido el tiempo estipulado, para determinar el porcentaje de inmovilidad o vida de los mismos (Villarroel Utrillas, 2004).

2.6 Toxicidad crónica

Este tipo de ensayo nos da una respuesta subletal a largo plazo, conforme a la décima parte de la vida media de las especies; los resultados de esta, nos ayuda a analizar y determinar de forma estadística la menor concentración que produce efectos observables (MCEO), la concentración de efectos no observables (CENO), y el valor crónico (VC). Los datos de los ensayos de toxicidad aguda como de la crónica nos ayudan para establecer límites de tolerancia de toxicidad (Crites & Tchobanoglous, 2000).

El tiempo de duración de este tipo de prueba dependerá del analista que requiera, se puede considerar desde 48 horas hasta 21 días (tres semanas), para este tipo de estudio se requiere neonatos de menos de 24 horas de nacidas las mismas que deben estar en las condiciones dadas, para toxicidad crónica es importante proporcionar a los organismos de su alimento, pues el objetivo es determinar su respuesta después de varios días. El recuento de neonatos se realiza registrando el número de estos que se colocan al inicio y luego de acuerdo al analista se determinan fechas de conteo, es decir, se debe llevar un control hasta que termine el tiempo estipulado (Villarroel Utrillas, 2004).

2.7 Daphnias magnas

Para realizar los ensayos de biotoxicidad una de las especies más comunes son las daphnias magnas, ver figura 5, denominadas también como “pulgas de agua”, siendo estos pequeños crustáceos pertenecientes al grupo de los *daphniidae* y estos del grupo *cladóceros* (García Sánchez & Zambrano Delgado, 2013).



Figura 5: *Daphnia*
Fuente: Elaboración propia

El microcosmos de las daphnias hace referencia a su hábitat o ecosistema en el que se desarrollan, a una temperatura de 18-22 °C, con presencia de luz ya que influye tanto para su madurez sexual como en el desarrollo de los huevos por su contenido de carotenoides, además, se pueden adaptar a diferentes cambios ambientales en periodos de tres a siete días, reproduciéndose partenogenéticamente. Los parámetros óptimos para el cultivo se pueden observar en la tabla 20 (García Sánchez & Zambrano Delgado, 2013).

Tabla 20: Parámetros para el Cultivo.

Parámetro	Rango
Temperatura	15 - 25 °C
Oxígeno	3 a 6 mg/l
pH	6.8 - 7.8
Grado de Oxidación	14.8 - 26.2 mg O ₂ /l

Fuente: Elaboración Propia.

La alimentación de las daphnias varía, ya que se pueden alimentar de bacterias, levaduras y microalgas; para los ensayos es común que se utilicen algas verdes, levadura de panadería y espirulina. Las algas verdes unicelulares que se utilizan son las que forman parte del plancton y benton del agua dulce como la *Selenastrum capricornutum*, *Ankistrodesmus falcatus*, *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp., entre otras, ya que presentan cloroplastos de color verde. Por otra parte, en laboratorio, se les alimenta con espirulina y levadura, se licua y se les coloca en las peceras, dando a estas una coloración medio rojiza, no se le debe colocar demasiada alimentación, ya que podrían matar al microorganismo (Cardozo & Tapiero, 2010; Plantas Acuario, 2010).



Las daphnias en condiciones óptimas de oxígeno, disponibilidad de alimentos y temperatura presentan una esperanza de vida entre 40 - 56 días, en algunos casos puede llegar hasta 120 días, su reproducción puede darse de forma sexual o asexual, usualmente habitan en poblaciones formadas únicamente por hembras, por tanto, su reproducción es asexual. En condiciones adecuadas una hembra puede producir más de 100 huevos por puesta, repitiendo este proceso cada 3 días, a lo largo de su vida podría poner hasta 25 veces, pero generalmente sólo pone 6 veces. La hembra puede comenzar a reproducirse desde los 4 días de edad, pero pone de 4 a 22 huevos, en caso de que comiencen a existir machos, comienza la reproducción sexual. En ocasiones pueden los huevos mantenerse en un estado latente y no eclosionar, hasta que las condiciones del medio mejoren o se regulen (Cardozo & Tapiero, 2010; García Sánchez & Zambrano Delgado, 2013).

Este género de crustáceos es muy utilizado en bioensayos toxicológicos, inclusive las daphnias son usadas por la legislación nacional y europea para la evaluación ecológica de nuevos productos químicos los efluentes urbanos y los ecosistemas de agua dulce. A pesar de que su presencia se da usualmente en aguas contaminadas, ha demostrado ser una especie sensible a condiciones pobres de agua y a un amplio rango de contaminantes como es el caso de concentraciones de hasta 0,005 mg de mercurio en agua, concentraciones menores de pesticidas y residuos industriales, haciéndola idónea para ensayos que prueben la calidad del agua (Cardozo & Tapiero, 2010; García Sánchez & Zambrano Delgado, 2013).

Las daphnias magnas se pueden aplicar a los dos tipos de bioensayos de toxicidad explicados anteriormente, siendo el primero la toxicidad aguda, en donde se evalúa la concentración del tóxico ya sea conocido o desconocido, el mismo que es capaz de matar o inmovilizar el 50 % de la población CL50 en 48 horas o el de toxicidad crónica, en donde se sigue un protocolo en donde se expone a los organismos a varios días o semanas proporcionándole comida y ciertas condiciones de vida, es decir que su muerte sea lenta. Además, esta especie es fácil de conseguir, se encuentran en empresas proveedoras de materiales biológicos, laboratorios especializados que realizan pruebas de toxicidad, se las puede recolectar directamente en cuerpos de agua o en lugares que vendan comida para peces (Cardozo & Tapiero, 2010; García Sánchez & Zambrano Delgado, 2013).



CAPÍTULO III: MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

3.1. Métodos estadísticos

3.1.1 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es un método que aplica diferentes técnicas para el análisis de grupos numeroso de datos facilitando su interpretación mediante la ordenación de tablas, tabulación de datos y gráficas. Es el primer paso dentro un análisis estadístico, pues de este se parte para posteriores análisis más detallados o complejos (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

El conjunto de los elementos de análisis u observación dentro de un experimento o proyecto de investigación se llama **población** y dentro de este conjunto se encuentran los **individuos**, los mismos que tienen subconjuntos los cuales representan las **muestras**, ver figura 6, cuyo tamaño dependerá del número de elementos que esta tenga (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).



Figura 6: Población, muestra e individuo
Fuente: Universidad de Guanajuato, 2013

Cuando se analizan variables cuantitativas siempre habrá un valor numérico asociado a estas a los cuales se les denomina **variables estadísticas**, las cuales se clasifican en dos tipos: las **variables discretas** siendo aquellas que poseen valores aislados, es decir, que no se le puede atribuir un valor cualquiera y **las variables continuas** cuyos valores pueden ser infinitos, pudiendo existir diferencias muy pequeñas entre sí (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).



i. Medidas de tendencia central

Para sintetizar la información, una vez agrupados los datos se procede a aplicar las medidas de tendencia central llamadas también promedios o medias de posición, debido a que indican la localización o posición de un valor específico entre los datos (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

Media aritmética: Es la más relevante dentro de las medidas de tendencia central, se puede aplicar para variables continuas o discretas. Indica el valor medio de todos los datos, los mismos que pueden o no estar agrupados (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

Variables discretas:

- *Para datos agrupados:* Sea X una variable estadística discreta que toma los valores x_1, x_2, \dots, x_k con frecuencias absolutas n_1, n_2, \dots, n_k , respectivamente. Se define la media aritmética como el valor: (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{N} \quad (4)$$

- *Para datos no agrupados:* En el caso particular de que uno de los k valores de la variable estadística aparezca una sola vez ($n_1=n_2=\dots=n_k$) como caso particular del anterior, la expresión de la media aritmética adopta la forma: (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k} \quad (5)$$

Mediana: En este caso el conjunto de datos debe ser ordenado en forma creciente, para luego dividirlo en dos partes iguales y ese valor representa la mediana (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

$$M_e = \frac{N}{2} \quad (6)$$



Moda: Este valor hace referencia a la variable estadística que se repiten un mayor número de veces, o con mayor frecuencia dentro del conjunto de datos. Existe la posibilidad de que no sea solo uno, pueden ser dos o más valores (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

- *Para intervalos que tienen la misma amplitud:* el valor de la moda debe estar más cerca del intervalo contiguo al intervalo modal de mayor frecuencia (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

$$M_o = e_{i-1} + \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_{i+1}} \cdot a_i \quad (7)$$

Donde:

e_{i-1} : es el extremo inferior de la clase modal

h_{i-1} : la diferencia de las frecuencias de la clase modal y de la clase inferior contigua

h_{i+1} : la diferencia de las frecuencias de la clase modal y de la clase superior contigua

a_i : la amplitud del intervalo modal

- *Para intervalos que no tienen la misma amplitud:* el intervalo modal es el de mayor frecuencia por unidad de amplitud, donde el valor de la moda es el punto del intervalo que estará más cerca del intervalo contiguo al que corresponda una mayor frecuencia media por unidad de amplitud (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

$$M_o = e_{i-1} + \frac{k_{i-1}}{k_{i-1} + k_{i+1}} \cdot a_i \quad (8)$$

Donde:

e_{i-1} : es el extremo inferior de la clase modal

k_{i-1} : la diferencia de las frecuencias medias por unidad de amplitud de la clase modal y de la clase inferior.



k_{i+1} : la diferencia de las frecuencias medias por unidad de amplitud de la clase modal y de la clase superior.

a : la amplitud del intervalo modal

ii. Medidas de dispersión

Las medidas de dispersión representan el grado de desviación o separación del conjunto de datos en referencia a las medidas de tendencia central. Cuando no existen valores extremos que puedan afectar el estudio, la muestra es pequeña y no sigue una distribución normal se puede ocupar el rango que es un índice cuyo cálculo indica la extensión del intervalo entre el menor y mayor valor observado del conjunto de datos. Pero si las muestras son muy grandes con variables normales, se debe aplicar la varianza y la desviación típica o estándar (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

- **Varianza:** es la variabilidad de los datos con respecto a su media, matemáticamente representa el promedio de los cuadrados de las desviaciones a la media y se denota por S^2 (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995; Saporta, 2006).

$$S^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^i (x_i - \bar{X})^2 \cdot n_i \quad (9)$$

Cuando la varianza es cero representa que los valores de las variables coinciden con la media, por tanto, mientras más alejada esté la media, mayor será la varianza (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995).

- **Desviación típica:** de forma matemática representa la raíz cuadrada de la varianza, por tanto, es una forma más sencilla de interpretar el resultado, pues si éste es baja los datos están más cerca de la media y si por el contrario es alta, indica que los datos corresponden a un rango más amplio. Se denota con la letra S (Fernández et al., 2002; Sabadías & Mancha, 1995; Saporta, 2006).

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^i (x_i - \bar{X})^2 \cdot n_i} \quad (10)$$



3.1.2 Estadística inferencial

Es una parte de la estadística que analiza el comportamiento y propiedades del conjunto de datos, para hacer generalizaciones en relación a la población de estudio. Es más complejo que la estadística descriptiva, pues se basa en una probabilidad matemática, haciéndola ideal para análisis de datos más detallados ya que se determina una prueba estadística más adecuada (Kuhar, 2010; Sabadías & Mancha, 1995).

Muestreo aleatorio: la selección de muestras, garantizando que todos estos elementos de cierta población tengan la misma probabilidad de ser escogidos para formar parte de una muestra, a esto se le llama *muestra aleatoria*. Cuando en la selección de muestra un elemento es devuelta a la población, y seleccionando otro para ser parte de la misma muestra, se llama *muestreo con reemplazamiento*; pero si este elemento no forma parte de la misma muestra, se le conoce como *muestreo sin reemplazamiento* (Comparación de medias, 2010.; Flores-Ruiz et al., 2017).

iii. Comparación de medias

Para realizar la comparación de medias de una variable continua entre más grupos del conjunto de datos se debe seleccionar dos muestras, siendo la primera la que consta de los individuos de la población sujeta al ensayo, denominado grupo experimental y la segunda que usa el método clásico para contrastar el resultado de la primera, denominado grupo de contraste (*Comparación de medias*, 2010.; Flores-Ruiz et al., 2017). Este análisis consta de tres aspectos importantes:

1. **Normalidad de las poblaciones:** hace referencia al hecho de que la población siga o no una distribución normal (Sabadías & Mancha, 1995).
2. **Homogeneidad de las poblaciones:** indica cuando existe una igualdad de las varianzas entre ambas poblaciones, denominada también *homocedasticidad*, para lo cual se puede aplicar la prueba F de Snedecor, donde se comprueba si existe una diferencia considerable entre las varianzas obteniendo su cociente (Laguna, 2008; Sabadías & Mancha, 1995).

$$F = \frac{\text{Varianza}_{\text{mayor}}}{\text{Varianza}_{\text{menor}}} \quad (11)$$



3. **Tamaño de los grupos experimental y de contraste:** dependerá del número de las muestras, siendo las pequeñas < 30 , por tanto, las que son >30 serían las grandes.

3.1.2.1 Pruebas paramétricas

Este grupo de pruebas requiere de ciertos requisitos en donde las muestras aleatorias se toman de poblaciones que tengan una normalidad en la distribución, homocedasticidad e independencia de las observaciones, debiendo cumplirse todos los supuestos o alguno de ellos, haciendo que su análisis sea más riguroso o potente, en caso de que no se pueda cumplir con estos requisitos se recurre a pruebas homólogas, llamadas no paramétricas (*Comparación de medias*, 2010.; Flores-Ruiz et al., 2017).

3.1.2.2 Pruebas no paramétricas

Como ya se mencionó, son pruebas homólogas a las paramétricas y se aplican cuando no se cumplen los requisitos con la finalidad de aproximar los datos a una normalidad en la distribución o directamente emplearlos como una distribución libre, para ello existen pruebas estadísticas con las que se comparan las medianas, como la de Wilcoxon para comparar el antes y después de un grupo, o el de Mann-Whitney para la comparación de grupos independientes (*Comparación de medias*, 2010.; Flores-Ruiz et al., 2017).

Muestras grandes

- La distribución en la T-student ofrece buenos resultados, aun teniendo en cuenta cuando estas no satisfacen las condiciones de homogeneidad y normalidad, por lo que se usa un estimador (Sabadías & Mancha, 1995).

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_{\bar{X}-\bar{Y}}} \quad (12)$$

Se distribuye con n_1+n_2-2 grados de libertad, donde:

$$S_{\bar{X}-\bar{Y}} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)} \quad (13)$$



- Si las varianzas son conocidas, se utiliza la variable tipificada, que sigue una distribución normal $N(0,1)$ (*Comparación de medias*, 2010.; Flores-Ruiz et al., 2017).

$$Z = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (14)$$

Muestras pequeñas

Se deben realizar las siguientes precisiones:

- Si las muestras tienen tamaño igual o muy parecidas al igual que su forma, la t-student, me proporciona resultados correctos.
- Si los tamaños de las muestras son distintos, pero las varianzas son iguales, usar la t-student es correcto
- Si el tamaño y la varianza de las muestras son distintas, no se debe utilizar la de t-student, por lo que se debe usar otro tipo de pruebas especialmente diseñada (Laguna Clara, 2010.; Flores-Ruiz et al., 2017).

i. T-student

La distribución t de Student se ha desarrollado con el propósito de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño. Por tanto, la t-student es una variable aleatoria cuya distribución tiene n grados de libertad, siendo n un número entero positivo, siendo Y una variable aleatoria que sigue una distribución normal $N(0,1)$ y X_n^2 otra variable aleatoria independiente de Y, que se distribuye según una X^2 con un grado de libertad. Como se indica en la fórmula: (Lucelly Reyes, 2010; Sabadías & Mancha, 1995).

$$T = \frac{Y}{\sqrt{X_n^2/n}} \quad (15)$$

A continuación, se presenta la figura 7 que muestra la t-student con 2 y 5 grados de libertad.

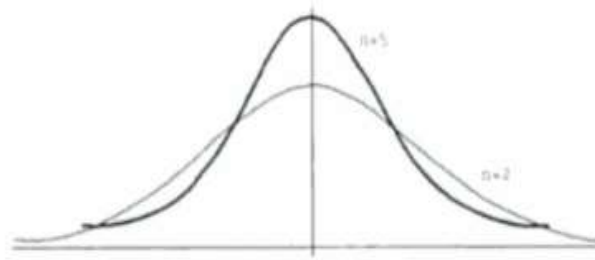


Figura 7: T-student
Fuente: (Sabadías & Mancha, 1995)

ii. Kruskal - Wallis

Esta prueba también se la conoce como la prueba H, se usa principalmente para comparar la localización de dos muestras que son independientes, es un análisis de contrastes paramétricos, que, al utilizar números enteros, los cálculos serán más sencillos (Sabadías & Mancha, 1995).

Cuando se pretende contrastar la diferencia de localización de k poblaciones por medio de k muestras independientes de tamaños respectivos N_i , $i= 1, 2, \dots, k$. El proceso que se sigue es similar a la suma de rangos (Sabadías & Mancha, 1995).

- Acomodar las observaciones de las muestras en orden ascendente, sustituyendo por el rango correspondiente (1 para la observación baja y N para la más alta, siendo $N = N_1 + N_2 + \dots + N_k$), cuando existen observaciones similares, se debe asignar un rango medio. T_i suma de los rangos, N_i observaciones de la muestra i
- Calcular la suma de los cuadrados intragrupo (SCA) de los rangos.

$$SCA = \frac{T_1^2}{N_1} + \frac{T_2^2}{N_2} + \dots + \frac{T_k^2}{N_k} - \frac{N(N+1)^2}{4} \quad (16)$$

Se utiliza para el contraste el estadístico H de Kruskal – Wallis

$$H = \frac{12 SCA}{N(N+1)} \quad (17)$$

La hipótesis nula va a ser:

H_0 = las k poblaciones tienen la misma localización



Donde el estadístico H se distribuye aproximadamente como una X^2 y con k-1 grados de libertad (Sabadías & Mancha, 1995).

Cuando las muestras son pequeñas, la eficiencia de la prueba de Kruskal - Wallis, con respecto a la prueba de Fisher es del 90%, y en caso de las grandes es del 95 % (Sabadías & Mancha, 1995).

Intensidad de la relación

Se da entre el hecho de formar parte de uno de los grupos y la ordenación de la variable se evalúa mediante el coeficiente (Sabadías & Mancha, 1995).

$$\varepsilon_R = \sqrt{\frac{H - k + 1}{N - k}} \quad (18)$$

iii. Wilcoxon

El análisis de Wilcoxon se usa cuando las dos muestras son dependientes, es decir, cuando existe cierta relación entre cada par de observaciones, para ello se sigue un proceso: (Sabadías & Mancha, 1995).

1. Establecer como hipótesis nula, que las dos muestras tienen la misma localización.
2. Encontrar las diferencias entre cada pareja de observaciones.
3. Eliminar las diferencias que den un valor de cero, ordenando de 1 en adelante los valores absolutos que no fueron anulados.
4. Establecer dos grupos, el primero con los rangos de las diferencias que son positivas y el segundo con las diferencias negativas.

La suma de ordinales esperada es:

$$T_E = \frac{N(N + 1)}{2} \quad (19)$$

Siendo la mitad de la suma:

$$U_E = \frac{N(N + 1)}{4} \quad (20)$$



Entonces, se procede a comparar la suma de los rangos correspondientes a las diferencias positivas indicadas en las dos fórmulas antes mencionadas.

5. El último paso consiste en encontrar la estimación de:

$$Z = \frac{T_i - T_E}{\sigma_v} \quad (21)$$

Si el valor de Z cae fuera de la región de crítica, se rechaza la hipótesis nula, caso contrario, se la acepta (Sabadías & Mancha, 1995).

Cuando las muestras son pequeñas, la eficiencia de la prueba de Wilcoxon, con respecto a la prueba de T-student es del 90%, y en caso de las grandes es del 95 % (Sabadías & Mancha, 1995).

Intensidad de la relación

Se da entre el signo y el ordinal correspondiente la proporción el coeficiente (Sabadías & Mancha, 1995).

$$r_c = \frac{4(T_i - T_E)}{N(N + 1)} \quad (22)$$

3.1.3 Estadística multivariada

3.1.3.1 Análisis de componentes principales

Cuando se tiene datos multidimensionales, sea que se dispone de un gran número de variables pudiendo ser decenas o miles sujetos al estudio, resulta difícil discernir tendencias de forma visual, por lo que se necesita reducir o resumir la dimensión de los datos, lo importante es recoger la mayor cantidad de información posible en las p variables. Es por ello que el análisis de componentes principales (ACP) es una técnica multivariante, en donde se transforman variables originales en un nuevo conjunto de variables de tal manera que se capture la mayor cantidad de variabilidad de los datos que tengan una tendencia discernible para que se puedan presentar en dos dimensiones. Un aspecto muy importante es que al condensar el conjunto de datos que presenta el problema exista la mínima pérdida de información (Díaz Rodríguez et al., 2016; González et al., 2008).

Como ya se había mencionado, el análisis dependerá de la tendencia que presentan los datos, pero resulta difícil conocer esta a priori, pues, usualmente los datos presentarán tres o más



variables, siendo estos componentes una combinación lineal de las variables originales y se ordenan de acuerdo a la información que recogen en relación al conjunto original, donde el primer componente es el que tiene la mayor información y así sucesivamente, para una mejor interpretación se debe calcular el porcentaje de variabilidad retenido por cada componente, para demostrar que la reducción será efectiva. Esta técnica permite simplificar otras técnicas como la de conglomerados (Díaz Rodríguez et al., 2016; González et al., 2008).

Para la aplicación del ACP, se procede a descomponer en valores iguales la matriz de covarianzas o de correlaciones, con el propósito de ir formando los componentes, para ello se determinan los *valores propios o autovalores* y los *vectores propios* que son los coeficientes de las combinaciones de los datos, donde se pueden formar tantos componentes como variables existentes (FUOC, 2013).

Donde el componente principal i -ésimo, CP_i , viene dado por:

$$CP_i = u_{i1}X_1 + \dots + u_{ip}X_p \quad (23)$$

Siendo el vector propio de la matriz de covarianzas o de correlaciones asociado al valor propio (λ_i).

En donde el valor propio es la suma de los cuadrados de las correlaciones sobre cada componente y deben ordenarse de mayor a menor, donde el componente principal i tiene una varianza igual al valor propio λ_i . Siempre el primer componente representa la mayor proporción de varianza de los datos y los demás componentes van presentando menores varianzas de forma progresiva, una característica importante es que los componentes no están correlacionados entre sí y la suma de las varianzas de los componentes principales debe ser igual a la suma de las varianzas de las variables originales (Universidad de Murcia, 2017).

Para la retención de r componentes se debe escoger los de mayor varianza que representen un porcentaje significativo de variabilidad total y en donde la suma de los cuadrados de las correlaciones para cada variable en todos los componentes sea la dispersión total de dicha variable, cuyo valor represente la adecuación del método ACP (Universidad de Murcia, 2017). Existen dos criterios que se deben aplicar para seleccionar el número de componentes a usar:



1. El primero se basa en el valor de la proporción de variabilidad total de cada componente, para ello se puede establecer un nivel mínimo y tomar un número de componentes que supere el valor mínimo establecido.
2. El segundo criterio consiste en observar la o los componentes desde los cuales ocurre un descenso considerable de la desviación estándar, con el propósito de conservar las componentes previas. Las componentes nuevas son una combinación de las variables originales (Díaz Rodríguez et al., 2016; González et al., 2008).

Para determinar el número de componentes a retener se puede escoger los componentes que presenten un valor propio superior a la unidad, otra forma es realizando un gráfico de sedimentación que represente los valores propios de cada componente ordenados de forma descendente, en el cual se retienen aquellos componentes que estén situados en la parte del gráfico que no tenga pendientes grandes y la última forma sería, fijando a priori el mínimo de varianza explicada que se quiera retener, en donde se recomienda que esta explique o represente al menos un 60% de la variabilidad de los datos. Finalmente, para su interpretación se analiza la correlación de cada componente con las variables originales, considerando aquellas que presenten el valor más elevado en valor absoluto, para comprender su significado e inclusive asignarle un nombre que lo determine. Se recomienda presentar los componentes en una gráfica para su mejor comprensión (Universidad de Murcia, 2017).

3.1.3.2 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados, también se le conoce como análisis clúster; es un método aplicado para clasificar el conjunto de datos en dos grupos, basándose en:

1. Cada grupo debe ser homogéneo en relación a las variables que lo caracterizan, de tal forma que cada característica observada en una variable de un grupo sea similar a las demás de ese mismo grupo. Es decir que el grupo esté cohesionado internamente (Aldas & Uriel, 2017).
2. Las características de las variables observadas en los grupos deben tener un distinto comportamiento, es decir, ser diferentes entre los otros grupos (Aldas & Uriel, 2017).

Medidas de disimilitud



Una vez formados los grupos se procede a medir la disimilitud o distancia entre ellos, la misma que cuantifica el grado de similitud entre pares de observaciones, lo cual es muy importante, pues da el punto de partida del análisis clúster. Un aspecto a tomar en consideración es la sensibilidad de las medidas de distancia con respecto a las escalas o magnitudes de las variables, por ellos se necesita estandarizar los datos correspondientes a variables cuantitativas (Aldas & Uriel, 2017).

Para obtener estas medidas se puede utilizar diferentes criterios cuyos resultados no son iguales, pero se puede llegar a conclusiones similares, para ello las medidas que más se usan son las siguientes, j y s representan los elementos para los cuales se calculará la disimilitud y X representa los valores de las variables de los datos (FUOC, 2013).

1. *Distancia euclidiana*

$$\sqrt{\sum_{j=1}^J (X_{rj} - X_{sj})^2} \quad (24)$$

2. *Distancia euclidiana al cuadrado*

$$\sum_{j=1}^J (X_{rj} - X_{sj})^2 \quad (25)$$

3. *Distancia de City-Block*

$$\sum_{j=1}^J |X_{rj} - X_{sj}| \quad (26)$$

Una vez determinadas las distancias se debe elegir un algoritmo que posibilite la clasificación de los elementos en clústeres, siendo el método jerárquico el más rápido y sencillo de aplicar, no obstante, existen otros métodos; todos estos pueden ser acumulativos, es decir, que forman grupos cada vez más grandes o a su vez, diminutivos, que parten de un grupo y forman otros más pequeños. Para el caso de los acumulativos, se basan en un proceso donde se disminuya el número de clústeres y al mismo tiempo se hagan más grandes al ir incorporando sub clústeres de la fase anterior (FUOC, 2013). En este tipo de algoritmos es importante conocer que existen los siguientes métodos según FUOC, 2013:



1. Método de las distancias mínimas: el cual consiste en la máxima semejanza entre los elementos o grupos más cercanos.
2. Método de las distancias máximas: que considera el cálculo de la mínima distancia entre los elementos más alejados.
3. Método de las distancias medias: calcula la media de las distancias entre elementos.

Otro aspecto importante a considerar, es la representación de la información, para ello lo más usual es una estructura jerárquica de los grupos de análisis clúster mediante una gráfica de dendrograma que se muestra en la figura 8, como se puede apreciar tiene forma de árbol invertido, de tal forma que se pueda observar desde 1 clúster hasta el número que se desee conseguir. Además, de acuerdo al número de grupos homogéneos que se hayan decidido formar, estos deben resultar de una segmentación horizontal del racimo de agrupaciones, cuyos datos presentan varianzas menores a la desviación global de todos los datos. Pero también, se puede interpretar desde tablas descriptivas que muestran los datos de media y desviación estándar, mostrando la razón por la que se han agrupado de tal manera y los rasgos característicos de todos los grupos (FUOC, 2013).

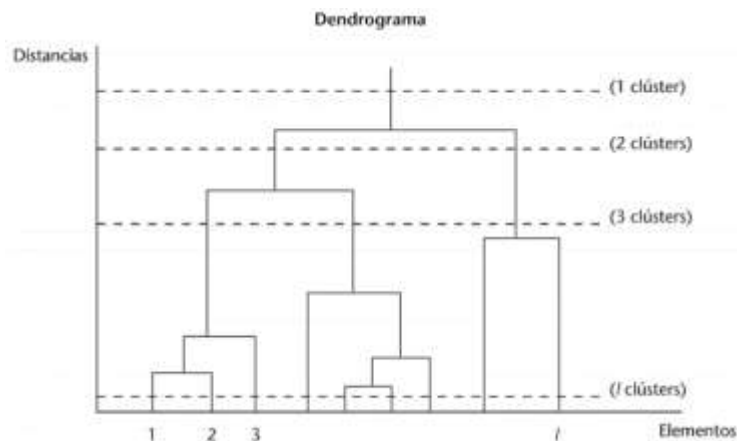


Figura 8: Representación de los clústeres (Dendrograma).

Fuente: UOC, 2013

Es importante considerar que se puede emplear el análisis de componentes principales, antes mencionado, sobre todas las observaciones ya que esta técnica homogeniza los datos y permite un posterior análisis clúster para los componentes seleccionados. También se puede trabajar con datos estandarizados que conlleva la eliminación de la escala de media, permitiendo realizar el análisis clúster para todas las variables que muestran el mismo valor medio y la misma desviación estándar (FUOC, 2013).

Clasificación de los métodos jerárquicos y no jerárquicos



iv. Métodos jerárquicos

Los métodos jerárquicos consisten en agrupar o clasificar los datos formando clústeres con el objetivo de formar uno nuevo o a su vez separar alguno que ya exista, dando origen a dos más, es decir, se puede maximizar una medida de similaridad o minimizar una distancia. Es importante poder clasificar los datos formando una estructura arborescente, es decir que se visualicen niveles jerárquicos y por tanto se dé la dependencia de unos con otros (Fernández, 2012; Calvo, 2018).

Para este tipo de análisis se puede tener tantos grupos iniciales como individuos que están en estudio, lo importante es que se vayan formando progresivamente los clústeres de acuerdo a su similaridad multivariante. Su representación gráfica, a modo de árbol invertido, se le llama dendograma (Fernández, 2012; Calvo, 2018). Estos métodos se clasifican como muestra la figura 9.



Figura 9: Esquema de los métodos jerárquicos
Fuente: Elaboración propia

v. Métodos no jerárquicos

Los métodos no jerárquicos o conocidos también como métodos partitivos o de optimización, se usan para clasificar a los individuos en k grupos, para ello se elige la participación de un número de individuos para k grupos y después se intercambian los miembros de los clústeres, logrando así una mejor participación de los mismos. Por tanto, al no existir una dependencia entre los grupos, tampoco se dan niveles de jerarquía (Fernández, 2012; Calvo, 2018).

Para este análisis es importante que el investigador tenga claro el número de clústeres en que desea agrupar sus datos, siendo esta la principal diferencia con los métodos jerárquicos. Se recomienda probar de diferentes formas, hasta hallar la que más se ajuste al objetivo de la



investigación (Fernández , 2012; Calvo, 2018). Los métodos no jerárquicos se clasifican según la figura 10.

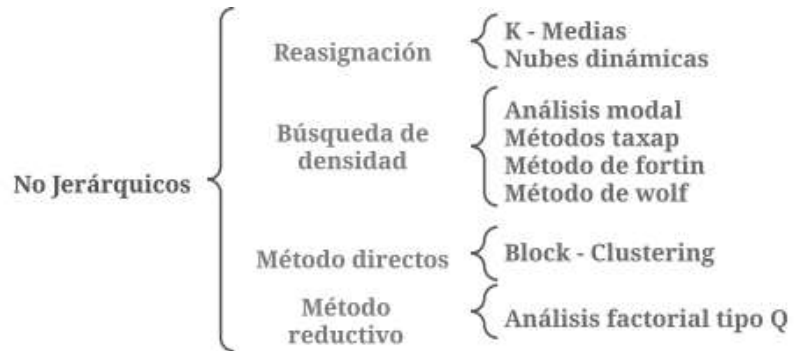


Figura 10: Esquema de los métodos no jerárquicos
Fuente: Elaboración propia



CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4.1 Organización del trabajo

Este proyecto de titulación se enmarca en el proyecto sobre la caracterización del agua potable en varias ciudades del Ecuador ejecutado entre la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), la Universidad San Francisco de Quito y la Universidad de Cuenca. Para iniciar la parte experimental de este proyecto de titulación, se procedió a coordinar las fechas y lugares de muestreo con el resto del equipo de investigación; luego se realizaron los oficios correspondientes para los permisos para el ingreso a las diferentes plantas potabilizadoras de agua de la ciudad de Cuenca, incluyendo también el permiso para la planta de tratamiento del agua residual.

Cabe mencionar que el protocolo de muestreo se siguió en base a lo establecido por las investigadoras de la PUCE, así también todos los recursos para desarrollar el muestreo, por tanto, la coordinación de los puntos de muestreo como el número de muestras estuvo previamente establecida, se habían escogido las cuatro principales plantas de la ciudad de Cuenca y algunos puntos dentro de su distribución exceptuando la planta de San Pedro, detallados en la tabla 21, ya que el equipo de investigadores no consideró necesario; la medición de los parámetros físico-químicos se realizó in situ, mientras que las muestras para la determinación de metales fueron llevadas por parte de las investigadoras a la Universidad San Francisco de Quito y cuyos resultados serían posteriormente compartidos para su uso y análisis en el presente proyecto de titulación. Cabe mencionar que el transporte de estas muestras siguió los protocolos establecidos por la norma INEN 2226, agua, calidad del agua, muestreo, diseño de los programas de muestreo, primera revisión 2013.

Por otra parte, para las pruebas de toxicidad, se procedió a coordinar con el Dr. Geovanny Larriva encargado del laboratorio de calidad del agua del campus de Balzay de la Universidad de Cuenca para el uso de las instalaciones y material de laboratorio para realizar las pruebas correspondientes, así también se solicitó el permiso para la compra de los reactivos necesarios para dichas pruebas.



4.2 FASE I: MUESTREO Y ANÁLISIS

4.2.1 Toma de muestras de las plantas de potabilización

Según la organización del trabajo, se comenzó por la fase de muestreo y análisis de las plantas de tratamiento de agua seleccionadas, durante la primera semana de diciembre del año 2019, cuya estacionalidad corresponde a una época seca con poca precipitación.

1. Planta de potabilización de Tixán

- La planta de tratamiento de Tixán se encuentra cercana a la población de Tixán en la parroquia de Chiquintad del cantón Cuenca. Ver figura 11.
- La fuente de abastecimiento para la planta de tratamiento es el río Machángara.
- Se tomaron 4 muestras, dos en la captación y dos a la salida de la planta.
- Después, se tomaron 5 muestras en la distribución del sistema de agua potable.

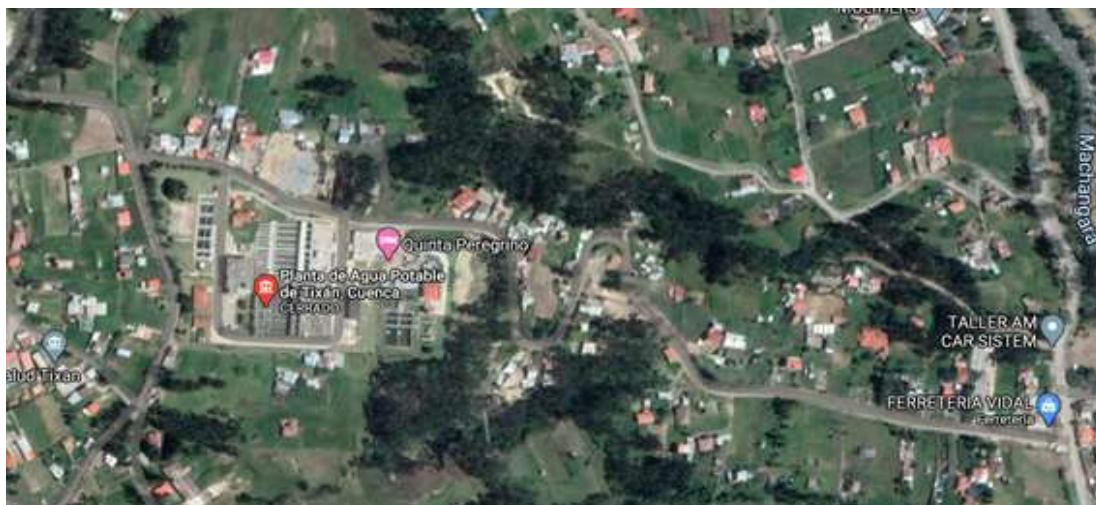


Figura 11: Ubicación planta de agua potable Tixán
Fuente: Google Maps

2. Planta de potabilización de Sustag

- Se encuentra en la zona de San Joaquín, y abastece a los sectores occidentales de la ciudad de Cuenca. Ver figura 12.
- La fuente de abastecimiento de la planta de tratamiento es el río Yanuncay.
- Se tomaron 4 muestras, dos en la captación y dos a la salida de la planta.
- Después, se tomaron 5 muestras en la distribución del sistema de agua potable.



Figura 12: Ubicación planta de agua potable Sustag
Fuente: Google Maps

3. Planta de potabilización de El Cebollar

- Se encuentra en la zona Tomebamba-Machángara, y abastece a los sectores principales de la ciudad de Cuenca. Ver figura 13.
- La fuente de abastecimiento de la planta de tratamiento es el río Tomebamba
- Se tomaron 4 muestras, dos en la captación y dos a la salida de la planta.
- Después, se tomaron 5 muestras en la distribución del sistema de agua potable.



Figura 13: Ubicación planta de agua potable El Cebollar
Fuente: Google Maps



4. Planta de potabilización de San Pedro

- Se encuentra en la zona de Racar, y abastece a los sectores noroccidentales de la ciudad de Cuenca. Ver figura 14.
- La fuente de abastecimiento de la planta de tratamiento es el río Culebrillas
- Se tomaron 4 muestras, dos en la captación y dos a la salida de la planta.
- Después, se tomaron 5 muestras en la distribución del sistema de agua potable.



*Figura 14: Ubicación planta de agua potable San Pedro
Fuente: Google Maps*

4.2.2 Toma de muestra de la planta de tratamiento de aguas residuales

Planta de tratamiento de aguas residuales Ucubamba

- Se encuentra ubicada al noreste de la ciudad de Cuenca, en el sector Ucubamba, en el Km 8.5 de la autopista Cuenca-Azogues. Ver figura 15.
- Su fuente de abastecimiento son las aguas residuales de todo el cantón Cuenca.
- Se tomaron 4 muestras, dos en la entrada del agua residual y dos en la última piscina de aireación.



Figura 15: Ubicación planta de tratamientos de aguas residuales de Ucubamba
Fuente: Google Maps

4.2.3 Toma de muestra dentro de la ciudad de Cuenca

En la figura 16, se muestra el mapa de distribución del sistema de agua potable en la ciudad de Cuenca, según ETAPA EP.

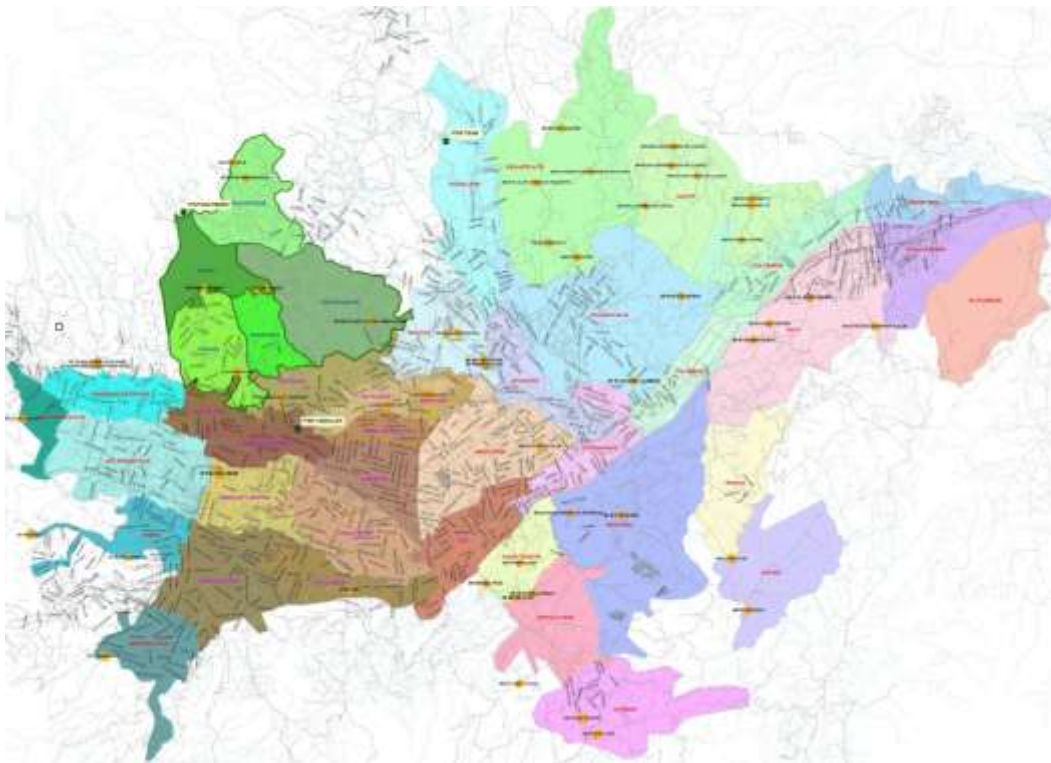


Figura 16: Mapa de distribución del sistema de agua potable
Fuente: ETAPA EP. Agua potable



A continuación, se muestran los cinco puntos de muestreo correspondientes a los sistemas Tomebamba, Yanuncay y Machángara. Ver tabla 21.

Tabla 21: Puntos de la toma de muestra

Zona de la toma de muestra	Ubicación
Tomebamba	1. Supermaxi Las Américas
	2. Gasolinera Terpel
	3. Hotel Selina
	4. Milenium Plaza
	5. UPC de Miraflores
Yanuncay	1. Gasolinera Clyan
	2. Plaza Marquet Trujillo
	3. Gasolinera Terpel Control Sur
	4. Supermaxi Don Bosco
	5. Gasolinera Primax
Machángara	1. Gasolinera Petróleos y Servicios Quinta Chica
	2. Gasolinera PC
	3. Gasolinera Primax Vidal
	4. Estación de Servicio Patamarca
	5. Terminal Terrestre

Fuente: Elaboración propia

La figura 17, corresponde al sistema Tomebamba, muestra los 5 puntos de muestreo del agua en distribución y la ubicación de la planta de tratamiento de agua potable El Cebollar.

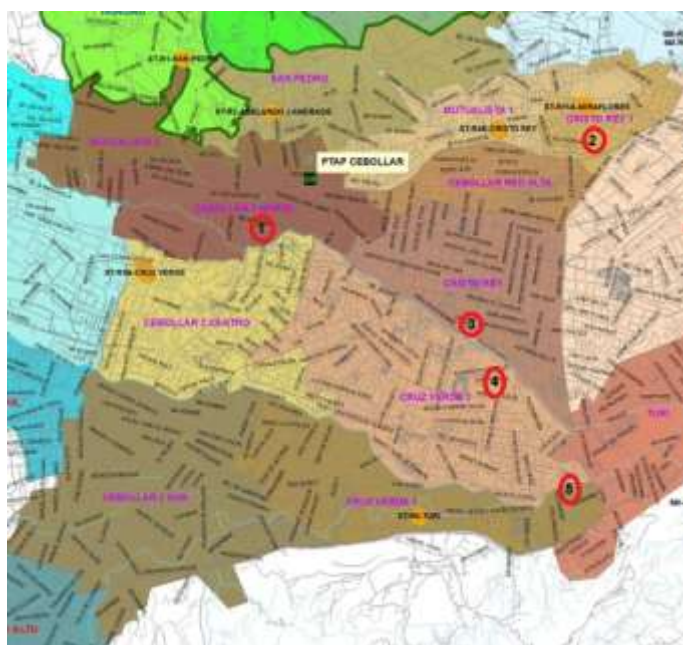
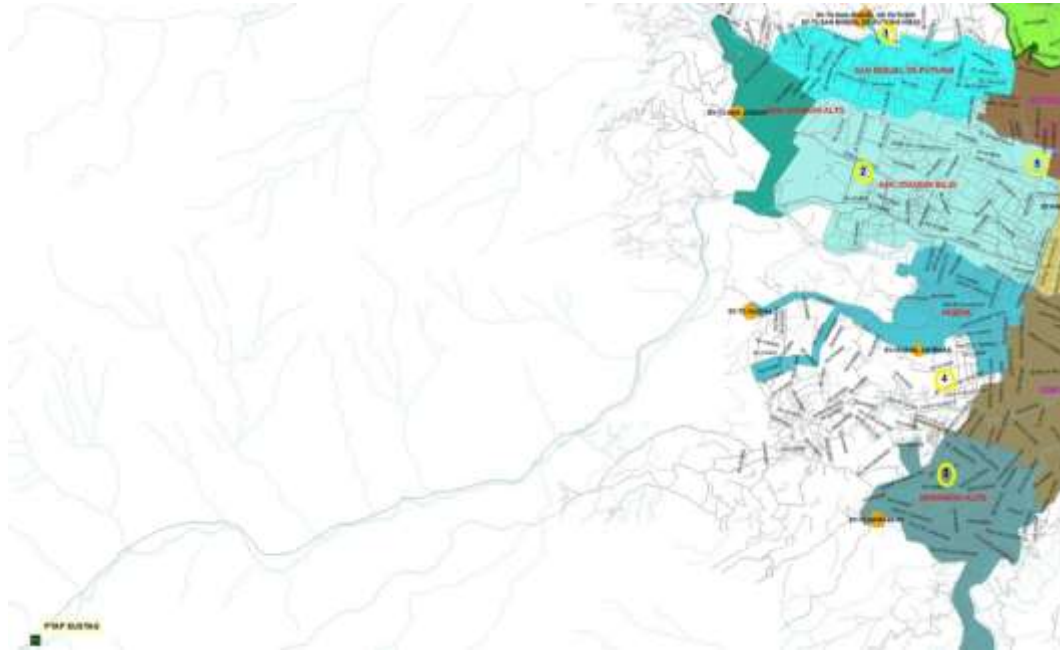


Figura 17: Puntos de muestreo del sistema Tomebamba
Fuente: ETAPA EP. Agua potable



La figura 18, corresponde al sistema Yanuncay, se muestra los 5 puntos de muestreo del agua en distribución y la ubicación de la planta de tratamiento de agua potable de Sustag.



*Figura 18: Puntos de muestreo del sistema Yanuncay
Fuente: ETAPA EP. Agua potable*

En la figura 19, se presenta al sistema Machángara que muestra los 5 puntos de muestreo del agua en distribución y la ubicación de la planta de tratamiento de Tixán.

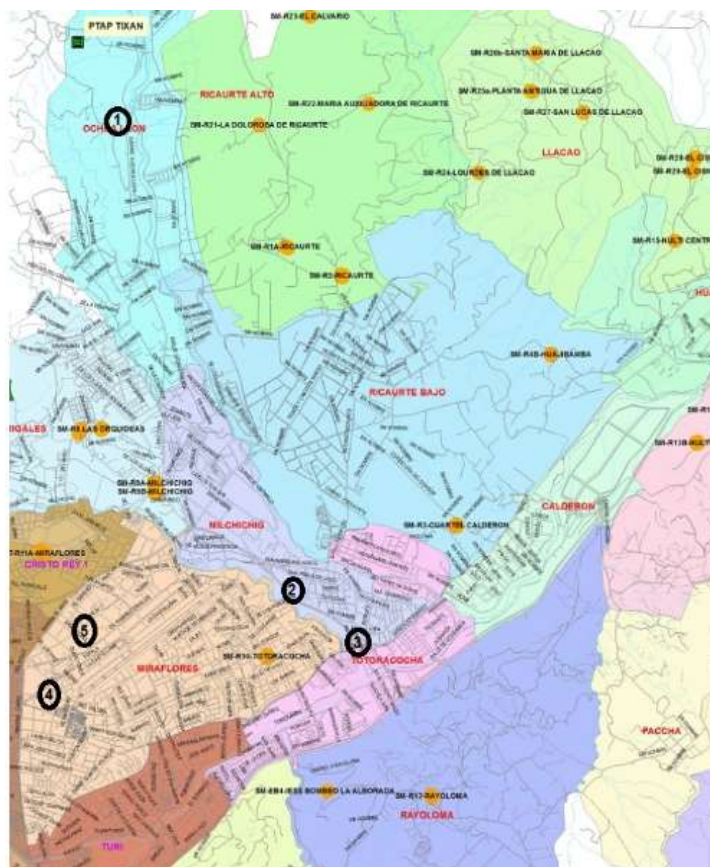


Figura 19: Puntos de muestreo del sistema Machángara
Fuente: ETAPA EP. Agua potable

4.2.4 Análisis físico – químico

De las muestras tomadas de 1000 ml en cada punto se procedió a separar 900 ml para el análisis físico-químico in situ, tanto en las cuatro plantas como en los puntos seleccionados para el muestreo, los parámetros físico-químicos medidos proporcionan valores que ayudan a determinar y evaluar la calidad del agua según la normativa ecuatoriana INEN 1108, agua para consumo humano, requisitos, sexta revisión 2020 y TULSMA para lo cual se utilizaron los siguientes equipos:

- El multímetro portátil HQ40D marca HACH y el PRO 3-in-1 pH, EC, TDS Combo Meter marca Milwaukee MW802; con este equipo se realizó la medición de los parámetros de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura.
- El colorímetro DR/850 marca HACH; con este equipo se midió el cloro residual y turbidez.



4.2.5 Análisis de metales usando (ICP-OES)

Para este análisis se tomó los 100 ml de agua restantes de los 1000 ml iniciales, en todos los puntos y plantas potabilizadoras, para que se conserve la muestra se colocó 5 ml de ácido nítrico HNO_3 de 0.7 M en todos los frascos de muestreo y se conservó a una temperatura de 4°C , para su posterior análisis en el laboratorio de ingeniería ambiental de la universidad San Francisco de Quito, Ecuador, mediante un espectrómetro de emisión atómica con acoplamiento inductivo de plasma (ICP-OES). Para ello prepararon curvas de calibración de una solución estándar de elementos múltiples ICP Merck-Millipore mezcla de varios analitos a una concentración de 100 mg/l (grado Certipur para ICP, Merck-Millipore). Los límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ) fueron calculados analizando al menos 12 réplicas independientes de muestras en blanco y multiplicando la desviación estándar por tres y por diez para obtener el LOD y LOQ, respectivamente. Las concentraciones de cada metal se corrigieron de acuerdo al porcentaje de recuperación para cada analito, de este modo se analizaron los siguientes metales: aluminio, arsénico, calcio, sodio, cromo, cobre, cobalto, níquel, bario, cadmio, manganeso, zinc, plomo, hierro y mercurio. Cada muestra fue medida al menos tres veces, el resultado obtenido del promedio de las réplicas instrumentales y su respectiva desviación estándar es reportada en las tablas 22, 23, 24, 25 y 26.

4.3 FASE II: Ensayos de biotoxicidad

4.3.1 Preparación del agua reconstituida ASTM

Según la norma brasilera ABNT NBR 12713: ecotoxicología acuática - toxicidad aguda - método de prueba con daphnia spp (Crustacea, Cladocera). Cuarta edición, 2016; indica que se debe usar agua tipo ASTM con el objetivo de que las daphnias suplan sus requerimientos de minerales (Norma brasilera, 2016).

Para obtener el agua tipo ASTM, primero se preparó las soluciones madre de los cuatro componentes, se usó una luna de reloj y una balanza digital para pesar cada uno de los siguientes reactivos: 24.57 g de sulfato de magnesio heptahidratado $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.8 g de cloruro de potasio KCl , 2.4 g de sulfato de calcio dihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 19.20 g de bicarbonato de sodio NaHCO_3 , ver anexos: figura A1. Cada uno de los reactivos fue colocado en un balón de aforo de 1 litro y se añadió agua destilada a cada uno hasta su aforo. Se colocó cada una de las soluciones en un frasco



de almacenamiento individual, ver anexos: figura A2. Para la preparación del agua ASTM se tomó una alícuota de 10 ml de cada una de las soluciones preparadas: sulfato de magnesio heptahidratado, cloruro de potasio y bicarbonato de sodio. Cada alícuota se agregó en el balón de aforo de 1 L. A lo anterior se le añadió una alícuota de 1 ml de solución de sulfato de calcio. Finalmente se aforó con agua destilada. Se colocó la solución en un vaso de precipitación de 1 L y después se midió el pH regulándolo con ácido clorhídrico ya que la solución se debe encontrar en un pH de 7.6 ± 0.3 , ver anexos: figura A3. Finalmente, se colocó el agua en cada una de las peceras de las daphnias y se cambió el 20 % de agua, pasando 1 día. La temperatura se mantuvo constante aproximadamente a 20 °C. Ver figura 20.

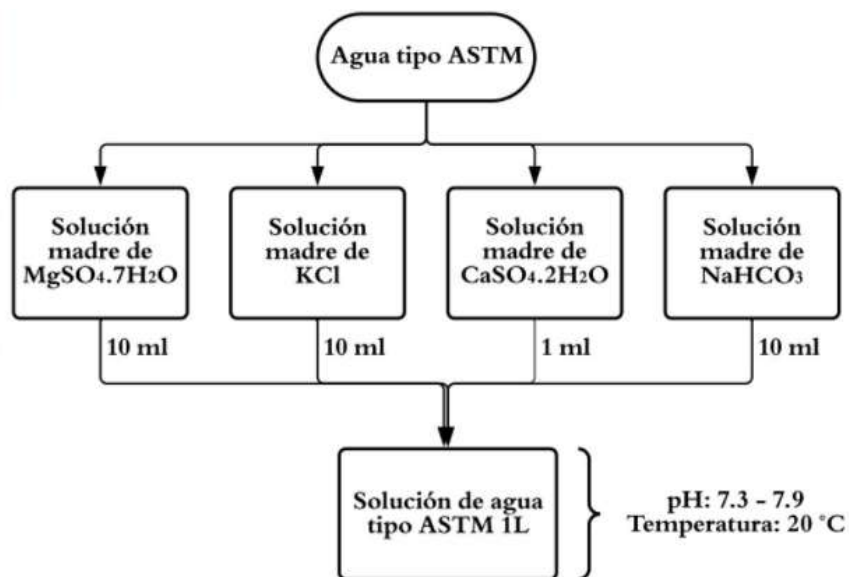


Figura 20: Preparación del agua tipo ASTM
Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Determinación de la alimentación para las daphnias

Para determinar la alimentación óptima de las daphnias se procedió a testear 7 diferentes alimentos durante 4 semanas, las daphnias magnas se obtuvo a través de la compra en línea a un proveedor de la ciudad de Quito, las mismas que fueron entregadas a las 48 horas desde su compra. La alimentación adecuada de las daphnias es fundamental para su estandarización y posterior empleo en los ensayos de toxicidad.

Para las pruebas se introdujo en cada frasco el aireador de agua y se cubrió con una tela de malla nylon para que no ingresen organismos exteriores. Se conservaron a temperatura ambiente 18-



20°C, en un lugar fresco y seco en el laboratorio de calidad de agua en el campus de Balzay de la Universidad de Cuenca. Tres veces a la semana se procedió a cambiar el 50 % del agua y añadir el alimento. Ver anexos: figura A4.

Para cada prueba se colocaron 10 daphnias magnas en un recipiente de vidrio en 50 ml con agua tipo ASTM. Posteriormente, salvo en los ensayos 2, 6 y 7, se añadieron 2,5 ml del alimento preparado de acuerdo al ensayo; se alimentaba a los dáfnidos tres veces a la semana. Antes de colocar el alimento, se procedía a cambiar el 50% del agua. Las preparaciones de alimento se detallan a continuación.

Ensayo 1: Para el preparado del concentrado de avena, se colocaron las hojuelas de avena en agua y se hirvieron por aproximadamente 2 horas a fuego bajo, luego se filtraron y conservaron con el líquido en un recipiente de vidrio en el refrigerador. Ver anexos: figura A5.

Ensayo 2: En este ensayo se ocupó lechuga, para la cual no es necesario realizar un procedimiento previo, solo se necesita que la misma esté fresca, previamente lavada y seca. Ver anexos: figura A5. Se colocó 5 g de lechuga cada vez y se retiraba los residuos de la anterior.

Ensayo 3: Se preparó un concentrado de levadura, para ello se colocó la levadura activa seca de pan en un recipiente de vidrio con agua y se procede a agitar hasta que se disuelva por completo, conservar el concentrado en el refrigerador. Ver anexos: figura A5.

Ensayo 4: Se preparó un concentrado de espirulina, para ello se colocó la espirulina en polvo en la licuadora junto con agua y se procedió a licuar hasta que se forme un líquido homogéneo, luego se filtra y conserva el líquido concentrado en un recipiente en el refrigerador. Ver anexos: figura A5.

Ensayo 5: Se preparó un concentrado de trigo, se colocó los granos de trigo en agua para hervir por aproximadamente 2 horas a fuego bajo, luego se filtró y se conservó el líquido en un recipiente de vidrio en el refrigerador. Ver anexos: figura A6.

Ensayo 6: Para este ensayo se ocupó dos concentrados de espirulina y de levadura, bajo el mismo procedimiento antes mencionado. Luego, se añadió 1,5 ml del concentrado de espirulina y 1 ml del concentrado de levadura al recipiente de vidrio, tres veces a la semana. Antes de colocar el alimento se procede a cambiar el 50% del agua. Ver anexos: figura A7.



Ensayo 7: Para este ensayo se combinó los concentrados de espirulina y trigo, bajo los procedimientos antes mencionados. Se añadió 1,5 ml del concentrado de espirulina y 1 ml del concentrado de trigo al recipiente de vidrio, tres veces a la semana. Antes de colocar el alimento se procede a cambiar el 50% del agua. Ver anexos: figura A7.

En cada uno de los 7 ensayos, se analizó la supervivencia y el comportamiento reproductivo de las daphnias en función del alimento. Una vez determinado el mejor alimento para las daphnias se mantuvo este y se trabajó con su cuarta generación, para las pruebas de estandarización y ensayos de toxicidad. Ver figura 21.

En todos los ensayos se verificó que el aireador siempre esté funcionando adecuadamente, además, de considerarse necesario se retiraba con una pipeta la mayor cantidad de suciedad del agua.

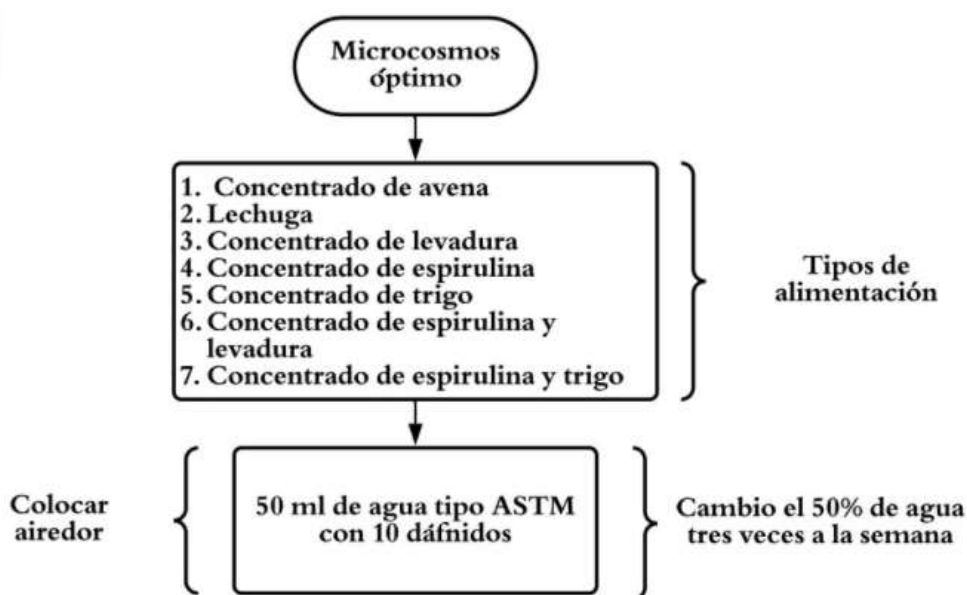


Figura 21: Determinación del alimento óptimo
Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Pruebas de sensibilidad de las daphnias magnas

Para comprobar que las daphnias se comportan de manera estándar, se realizaron pruebas de biotoxicidad con soluciones de dicromato de potasio con diferentes concentraciones de acuerdo a la norma chilena NCh 2083: aguas - bioensayo de toxicidad aguda mediante la determinación de la inhibición de la movilidad de daphnia magna o daphnia pulex (crustacea, cladocera), 1999. Esto



nos permitió determinar la sensibilidad de esta especie de microorganismo durante un tiempo de 48 horas a un tóxico conocido a una concentración dada y compararla con los resultados estándar esperados. Se realiza esta prueba con el fin de establecer la sensibilidad de los organismos antes de realizar las pruebas con el tóxico que contiene aluminio (Norma mexicana, 2010; Normalización (INN), 1999).

Para la estandarización de las daphnias magnas se necesitó preparar 4 soluciones de 0.3, 0.8, 1.0 y 1.5 ppm de dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$. Para ello se esterilizaron los 20 vasos de 50 ml en la autoclave, ver anexos: figura A8, luego, se pesa en la balanza usando lunas de reloj el $K_2Cr_2O_7$, ver anexos: figura A9, según la concentración deseada para después diluir en un vaso de precipitación y aforar con agua tipo ASTM. Se colocó 20 ml de cada solución en vasos de 50 ml. Se hicieron 4 réplicas con cada una de las concentraciones, incluyendo el blanco; finalmente se colocaron 10 neonatos en cada vaso, ver anexos: figura A10.

Respetando los lineamientos de la prueba, no se colocó alimento en ninguna de las réplicas. La prueba se realizó a 20 °C. Se registró el comportamiento de los dáfidos transcurridas las 48 horas, es decir, se hizo el conteo de muertes en cada una de las soluciones. Ver figura 22.

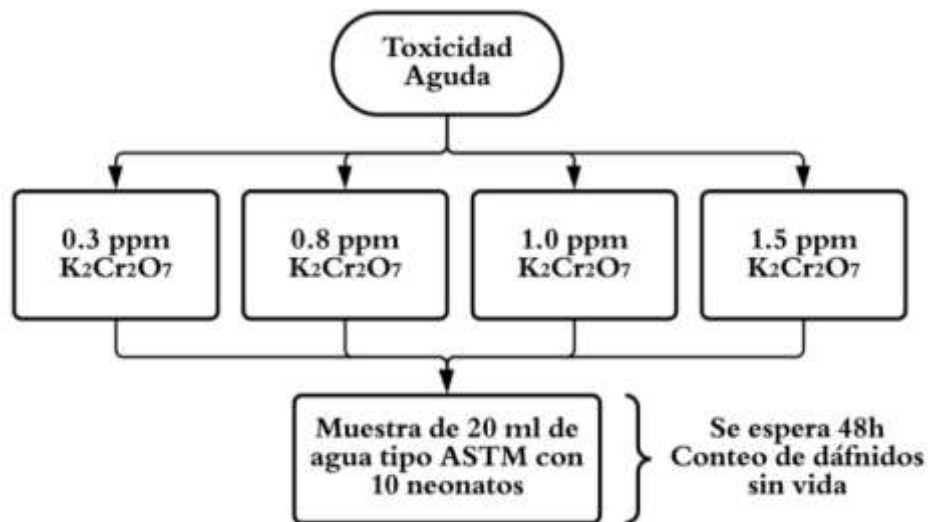


Figura 22: Ensayos de toxicidad aguda
Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Bioensayo de Toxicidad

Se realizó este tipo de prueba para determinar la toxicidad del aluminio cuando está presente en el agua a diferentes concentraciones con y sin efecto letal, durante 3 semanas aproximadamente.



Para la toxicidad crónica, se usó la sal de cloruro de aluminio (Al_2Cl_3) para obtener las siguientes concentraciones de aluminio: 0.1, 0.5, 1.0 y 2.5 ppm, por tanto, se determinó el peso de la sal necesario para que corresponda a cada una de las concentraciones, ver tabla en anexos; una vez calculados los pesos de la sal se procedió al esterilizado de los vasos de 50 ml en la autoclave, ver anexos: figura A11. Después, se procedió a pesar el cloruro de aluminio en la balanza analítica usando una luna de reloj, de acuerdo a la concentración que se iba preparando. Posteriormente, se diluyó en un vaso de precipitación y se pasó a un balón de aforo de 100 ml y aforándolo con agua tipo ASTM, repitiendo el proceso para cada concentración. Luego se colocó 20 ml de cada una de las 4 concentraciones preparadas en los vasos esterilizados, haciendo 4 réplicas para cada una, también se preparó 4 blancos. En este análisis se incluyó los ensayos con el agua de la distribución de cada uno de los sistemas de agua potable: Yanuncay, Machángara, Tomebamba y Culebrillas, colocando de igual forma 20 ml de cada uno, en los vasos esterilizados y haciendo las 4 réplicas. Ver anexos: figura A12.

En estos ensayos crónicos, si fue necesario colocar la alimentación en todas las réplicas, tanto las que llevan las diferentes concentraciones del cloruro de aluminio, los blancos y los de las aguas correspondientes a las diferentes plantas de potabilización. Este ensayo duró 3 semanas, se conservó a una temperatura aproximada de 20°C y se fue registrando el comportamiento o conteo de muertes de los dáfidos cada 2 días. Ver figura 23.

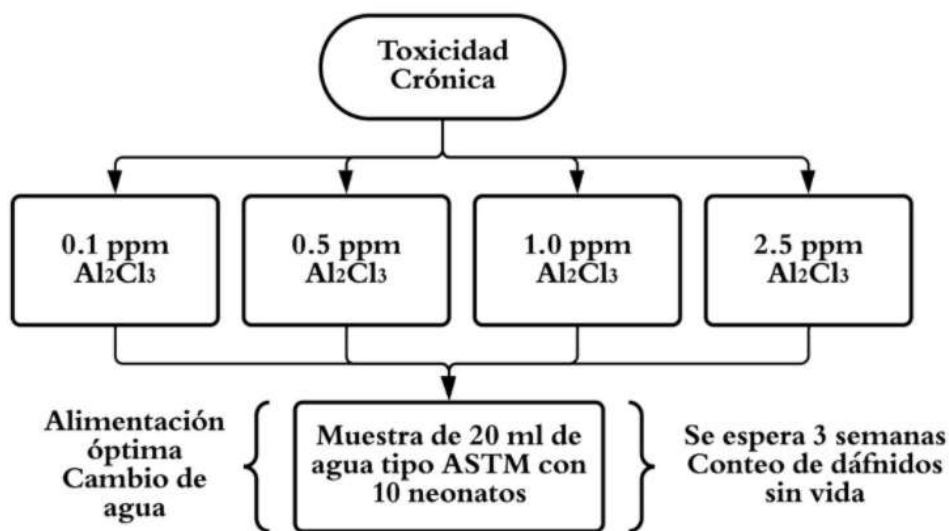


Figura 23: Ensayos de toxicidad crónica
Fuente: Elaboración propia



4.4 FASE III: Análisis de datos

4.4.1 Análisis estadístico descriptivo, inferencial y multivariado

En este punto se procedió a recopilar la información sobre la concentración de metales obtenida a través del ICP-OES de la Universidad de San Francisco de Quito para comparar las concentraciones de los metales con las normas nacionales vigentes para el agua potable en el Ecuador. El análisis estadístico se realizó con el software R 4.0.3.

- Se procedió a organizar y codificar los datos de acuerdo al tipo de agua, su fuente y estado de tratamiento.
- Análisis descriptivo: se realizaron tablas para comparar los parámetros físico-químicos y las concentraciones de metales detectados en la muestra, con los límites permitidos en la norma técnica INEN 1108:2020, y de esta manera determinar si las muestras cumplen o no cumplen con la norma. Además, se calculó la desviación estándar para tener una idea general del comportamiento de los datos, es decir, que tan dispersos se encuentran respecto a la media. Cabe mencionar que para el agua residual solo se realizó este análisis.
- Análisis inferencial: para una mejor interpretación de datos se procedió a realizar inferencias de los parámetros obtenidos entre las aguas al inicio y al final del proceso y en el caso de las aguas potables en la distribución para determinar diferencias. Primero se ocupó las pruebas de normalidad y homocedasticidad, para elegir entre pruebas paramétricas y no paramétricas, de acuerdo a los resultados, se tomó la decisión de aplicar las pruebas no paramétricas. Se aplicó como primera prueba la de rango de Wilcoxon, la misma que nos dice si existe o no una diferencia significativa entre un determinado parámetro medido en el agua fuente y en el agua tratada. Luego se realizó la prueba H de Kruskal Wallis para hacer una comparación entre un determinado parámetro por fuente de circulación.
- Estadística multivariada: en esta última etapa del análisis estadístico se analizaron todos los datos físico químicos y la concentración de metales con el método ACP (Análisis de Componentes Principales), el mismo que establece la correlación existente entre variables y permite reducir las dimensiones entre los parámetros al hacer agrupaciones de acuerdo al comportamiento de los diferentes sistemas de agua potable. Así también se aplicó el método



de clústeres para determinar similitudes entre las características de los sistemas de agua potable, para ello se ocupó un dendograma, correspondiente a clúster jerárquico.

4.4.2 Determinación del índice de HPI

- Se calculó el índice HPI con el contenido de metales para cada uno de los sistemas de agua potable con el objetivo de determinar la calidad del agua con respecto al contenido de metales.
- Por otra parte, con los ensayos de biotoxicidad aguda de las Daphnias Magnas frente a diferentes concentraciones de aluminio se obtuvo el valor de la concentración letal media (CL50), para la cual, se utilizó el programa IBM SPSS Statistics 22.



CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Subsistemas de análisis

En la ciudad de Cuenca el sistema de agua potable se encuentra dividido en 4 subsistemas principales, todos cuentan con una planta de tratamiento, almacenamiento y redes de distribución. El sistema Tomebamba cuenta con la planta de tratamiento el Cebollar, Machángara con la planta de tratamiento Tixán, Yanuncay con la planta de tratamiento de Sustag y el sistema Culebrillas con la planta de tratamiento de San Pedro. Para el análisis de las aguas de cada planta de tratamiento, se tomaron dos muestras de agua antes del tratamiento, dos del agua tratada y cinco del agua potable distribuida en la ciudad en puntos públicos. Además, para el análisis de agua residual, se muestreó a la entrada y a la salida de la planta de Ucubamba, la cual trata el 95% del agua residual de la ciudad. A todas las muestras se les midió in situ los siguientes parámetros físico-químicos: pH, turbidez, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y cloro residual. Por otra parte, se tomaron muestras que fueron acidificadas y llevadas al laboratorio para determinar la presencia de los siguientes metales: aluminio, arsénico, cadmio, cromo, hierro, plomo, mercurio, bario, calcio, cobalto, cobre, manganeso, sodio, níquel y zinc usando la técnica ICP-OES, los detalles del proceso se explican con más detalles en la metodología (capítulo IV).

5.2 Resultados del análisis descriptivo

En la tabla 22 se puede observar los resultados de los parámetros físico-químicos y concentración de metales presentes en el sistema Tomebamba, en general: el pH, conductividad, turbiedad, temperatura y O.D, en el agua fuente se encontraron dentro de los parámetros establecidos por el TULSMA ver tabla 17, sin embargo, el % de O.D no cumple con esta norma; con respecto al agua tratada y en distribución se encontraron dentro de los parámetros establecidos por la INEN 1108:2020, ver tabla 16.

Por otra parte, en los análisis para determinación de la concentración de metales en el agua potable y en fuente no se detectaron por el equipo (ICP-OES) ya que su concentración estaba por debajo de los límites de detección del equipo, los siguientes metales: arsénico, cadmio, cobalto, cobre, cromo, sodio, níquel, plomo y mercurio; mientras que la concentración de bario, calcio, manganeso y hierro (antes del tratamiento) fue detectada por el equipo en muy bajas concentraciones, cumpliendo con el TULSMA ver tabla 17, al igual que el zinc (después del



tratamiento) en la distribución cumplió con la norma INEN 1108:2020 ver tabla 16. Finalmente, la concentración detectada del aluminio en el agua tratada y en distribución cumple según la guía para la calidad del agua potable de la OMS que establece el límite de < 0.1 mg/l.

En el sistema Machángara, se encontró que los parámetros físico-químicos del agua fuente cumplían con lo estipulado en el TULSMA ver tabla 17, a excepción del % O.D que se encuentra fuera del límite. Por otra parte, el agua tratada y su distribución cumple con la INEN 1108:2020 ver tabla 16. En lo referente a las concentraciones de metales se vio que el aluminio en el agua fuente cumple con el límite permitido inferior a 0.2 mg/l según el TULSMA, en agua tratada y en distribución cumple con el límite permitido inferior a 0.1 mg/l según la OMS, además, la presencia de: bario, calcio, manganeso, hierro y zinc se encontraron también dentro de la norma. La concentración de arsénico, cadmio, cobre, cromo, sodio, níquel, plomo y mercurio, estaba por debajo del índice de detección del equipo. Detalles en la tabla 23.

En la tabla 24, se pueden observar los resultados del sistema Yanuncay, el agua fuente cumplía con lo estipulado en el TULSMA ver tabla 17, a excepción del % O.D que se encuentra fuera del límite, en cambio los parámetros físico-químicos en el agua tratada y en distribución cumplen en su totalidad los límites establecidos en la INEN 1108:2020, mientras que en la concentración de metales el aluminio cumple según el TULSMA en agua fuente y según la OMS en agua tratada y en distribución. Mientras que la concentración de: bario, calcio, hierro, manganeso y zinc estaban muy por debajo del límite permitido, el resto de metales analizados estaban por debajo del índice de detección del equipo.

Del sistema culebrillas se tomaron muestras únicamente de la planta de tratamiento, se encontró los parámetros físico-químicos cumplían según el TULSMA en el agua fuente, menos el % de O.D que no cumple; con respecto al agua tratada y en su distribución cumple en su totalidad con los parámetros normados en la INEN 1108:2020 tanto en el análisis físico-químico como en la concentración de metales; además se encontró una ligera concentración de bario, hierro y calcio, mientras que el manganeso estaba presente únicamente al inicio del tratamiento. Detalles en la Tabla 25.



Tabla 22: Sistema Tomebamba.

Característica	Planta de tratamiento El Cebollar								Norma INEN 1108: 2020	Condición
	Fuente		TULSMA	Condición	Tratada		En distribución			
	Media	DE			Media	DE	Media	DE		
pH	7.00	0.00	6 - 9	Cumple	6.8	0.00	6.84	0.11	6.5 - 8	Cumple
Conductividad (µs/cm)	110.00	0.00			150.00	0.00	98.00	4.47		
Turbiedad (UTN)	5.00	0.00	100	Cumple	0.00	0.00	0.80	1.79	< 5	Cumple
Temperatura (°C)	14.50	0.00	Natural ±3	Cumple	15.70	0.00	19.32	1.34		
O.D (mg/l)	7.75	0.00	> 6	Cumple	-	-	-	-		
O. D (%)	78.32	0.00	> 80	No cumple	-	-	-	-		
Cl ₂ (mg/l)	-	-			0.79	0.00	0.44	0.16	0.3 – 1.5	Cumple
Aluminio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.2	Cumple	0.0116	0.00	0.0116	0.07	<0.1 (OMS,2017)	Cumple
Arsénico (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple
Bario (mg/l)	0.0290	0.00	< 1	Cumple	0.0257	0.00	0.0266	0.00	< 1.3	Cumple
Calcio (mg/l)	0.0270	0.00			0.0300	0.00	0.0268	0.00		
Cadmio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.003	Cumple
Cobalto (mg/l)	0.0000	0.00			0.0000	0.00	0.0000	0.00		
Cobre (mg/l)	0.0000	0.00	< 1	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 2	Cumple
Cromo (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple
Hierro (mg/l)	0.0004	0.00	< 1	Cumple	0.0006	0.00	0.0001	0.00		
Manganeso(mg/l)	0.0107	0.00	< 0.1	Cumple	0.0043	0.00	0.0034	0.00		



Sodio (mg/l)	0.0000	0.00	< 200	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00		Cumple
Níquel (mg/l)	0.0000	0.00			0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.07	Cumple
Plomo (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple
Zinc (mg/l)	0.0023	0.00	< 5	Cumple	0.0000	0.00	0.0019	0.04		Cumple
Mercurio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.001	Cumple	0.0000	0.00	0.00	0.00	< 0.006	Cumple

DE: Desviación estándar de las subdivisiones de las muestras en el análisis instrumental
Fuente: Elaboración propia.



Tabla 23: Sistema Machángara.

Característica	Planta de tratamiento de Tixán								Norma INEN 1108: 2020	Condición
	Fuente		TULSMA	Condición	Tratada		En distribución			
	Media	DE			Media	DE	Media	DE		
pH	7.90	0.00	6 - 9	Cumple	7.40	0.14	7.24	0.13	6.5 - 8	Cumple
Conductividad (µs/cm)	70.00	0.00			85.00	7.07	84.00	5.48		
Turbiedad (UTN)	7.00	0.00	100	Cumple	0.50	0.71	0.00	0.00	< 5	Cumple
Temperatura (°C)	17.30	0.00	Natural ±3	Cumple	16.00	0.57	20.94	0.30		
O.D (mg/l)	7.03	0.00	> 6	Cumple	-	-	-	-		
O. D (%)	75.18	0.00	> 80	No cumple	-	-	-	-		
Cl ₂ (mg/l)	-	-			1.07	0.12	0.41	0.24	0.3 – 1.5	Cumple
Aluminio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.2	Cumple	0.0042	0.00	0.0042	0.00	<0.1 (OMS,2017)	Cumple
Arsénico (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple
Bario (mg/l)	0.0183	0.00	< 1	Cumple	0.0193	0.00	0.0184	0.00	< 1.3	Cumple
Calcio (mg/l)	0.0232	0.00			0.0209	0.00	0.0239	0.00		
Cadmio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.003	Cumple
Cobalto (mg/l)	0.0000	0.00			0.0000	0.00	0.0000	0.00		Cumple
Cobre (mg/l)	0.0000	0.00	< 1	Cumple	0.0000	0.00	0.0042	0.00	< 2	Cumple
Cromo (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple
Hierro (mg/l)	0.0002	0.00	< 1	Cumple	0.0001	0.00	0.0002	0.00		Cumple
Manganeso(mg/l)	0.0897	0.00	< 0.1	Cumple	0.1223	0.02	0.0199	0.01		Cumple



Sodio (mg/l)	0.0000	0.00	< 200	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00		Cumple
Níquel (mg/l)	0.0000	0.00			0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.07	Cumple
Plomo (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple
Zinc (mg/l)	0.0111	0.00	< 5	Cumple	0.0079	0.00	0.0162	0.01		Cumple
Mercurio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.001	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.006	Cumple

DE: Desviación estándar de las subdivisiones de las muestras en el análisis
Fuente: Elaboración propia.



Tabla 24: Sistema Yanuncay.

Característica	Planta de tratamiento de Sustag								Norma INEN 1108: 2020	Condición
	Fuente		TULSMA	Condición	Tratada		En distribución			
	Media	DE			Media	DE	Media	DE		
pH	7.65	0.07	6 - 9	Cumple	6.95	0.07	6.88	0.22	6.5 - 8	Cumple
Conductividad (µs/cm)	40.00	0.00			65.00	7.07	94.00	20.74		
Turbiedad (UTN)	3.50	4.95	100	Cumple	0.00	0.00	2.60	3.29	< 5	Cumple
Temperatura (°C)	14.95	0.64	Natural ±3	Cumple	15.70	0.00	21.06	3.15		
O.D (mg/l)	7.59	0.06	> 6	Cumple	-	-	-	-		
O. D (%)	77.41	0.44	> 80	No cumple	-	-	-	-		
Cl ₂ (mg/l)	-	-			1.07	0.20	0.23	0.31	0.3 – 1.5	Cumple
Aluminio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.2	Cumple	0.0042	0.00	0.0042	0.00	<0.1 (OMS,2017)	Cumple
Arsénico (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple
Bario (mg/l)	0.0326	0.00	< 1	Cumple	0.0304	0.00	0.0283	0.00	< 1.3	Cumple
Calcio (mg/l)	0.0114	0.00			0.0161	0.00	0.0226	0.01		
Cadmio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.003	Cumple
Cobalto (mg/l)	0.0000	0.00			0.0000	0.00	0.0000	0.00		Cumple
Cobre (mg/l)	0.0000	0.00	< 1	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 2	Cumple
Cromo (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple
Hierro (mg/l)	0.0002	0.00	< 1	Cumple	0.0002	0.00	0.0003	0.00		Cumple
Manganeso(mg/l)	0.0116	0.00	< 0.1	Cumple	0.0103	0.01	0.0037	0.00		Cumple



Sodio (mg/l)	0.0000	0.00	< 200	Cumple	0.0000	0.00	0.00	0.00		Cumple
Níquel (mg/l)	0.0000	0.00			0.0000	0.00	0.00	0.00	< 0.07	Cumple
Plomo (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	0.00	0.00	< 0.01	Cumple
Zinc (mg/l)	0.0093	0.01	< 5	Cumple	0.0132	0.00	0.369	0.26		Cumple
Mercurio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.001	Cumple	0.00	0.00	0.0000	0.00	< 0.006	Cumple

DE: Desviación estándar de las subdivisiones de las muestras en el análisis

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 25: Sistema Culebrillas.

Característica	Fuente		TULSMA	Condición	Tratada		Norma	Condición
	Media	DE			Media	DE		
	pH	7.30			0.00	6 - 9		
Conductividad (µs/cm)	80.00	0.00			80.00	0.00		
Turbiedad (UTN)	0.00	0.00	100	Cumple	0.00	0.00	< 5	Cumple
Temperatura (°C)	16.40	0.00	Natural ±3	Cumple	16.00	0.00		Cumple
O.D (mg/l)	6.53	0.00	> 6	Cumple	-	-		
O.D (%)	68.60	0.00	> 80	No cumple	-	-		
Cl ₂ (mg/l)	-	-			0.55	0.00	0.3 – 1.5	Cumple
Aluminio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.1	Cumple	0.0000	0.00	<0.1 (OMS,2017)	Cumple
Arsénico (mg/l)	0.0000	0.00		Cumple	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple
Bario (mg/l)	0.0183	0.00	< 1	Cumple	0.0149	0.00	< 1.3	Cumple
Calcio (mg/l)	0.0202	0.00			0.0207	0.00		
Cadmio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.001	Cumple	0.0000	0.00	< 0.003	Cumple
Cobalto (mg/l)	0.0000	0.00	<0.2		0.0000	0.00		Cumple
Cobre (mg/l)	0.0000	0.00	< 1	Cumple	0.0000	0.00	< 2	Cumple
Cromo (mg/l)	0.0000	0.00		Cumple	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple
Hierro (mg/l)	0.0005	0.00	< 0.3	Cumple	0.0004	0.00		Cumple
Manganeso(mg/l)	0.0061	0.00	< 0.1	Cumple	0.0000	0.00		Cumple
Sodio (mg/l)	0.0000	0.00	< 200	Cumple	0.0000	0.00		Cumple



Níquel (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.025		0.0000	0.00	< 0.07	Cumple
Plomo (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.05	Cumple	0.0000	0.00	< 0.01	Cumple
Zinc (mg/l)	0.0000	0.00	< 5	Cumple	0.0000	0.00		Cumple
Mercurio (mg/l)	0.0000	0.00	< 0.001	Cumple	0.0000	0.00	< 0.006	Cumple

DE: Desviación estándar de las subdivisiones de las muestras en el análisis

Fuente: Elaboración propia.



Al hacer un análisis general de todos los sistemas se puede observar valores de cero en la turbiedad, lo que significa que el equipo no pudo detectar su valor, por tanto, este sería menor a la unidad, cumpliendo con los límites establecidos por la OMS y por la INEN 1108:2020, que indican que la turbiedad para el agua tratada y en distribución debe tener un valor inferior a uno. Además, existen algunos estudios de las plantas de potabilización de agua de la ciudad de Cuenca que indican valores que oscilan a una turbiedad de 0.33-0.66 UTN, lo que nos indica que los valores obtenidos de las muestras son correctos (Arévalo, 2015; Gárate, 2015).

Con respecto al % de oxígeno disuelto, se puede observar que el valor de este no cumple con el TULSMA en todos los sistemas, esto se asume que podría deberse a la época en la que se realizó el muestreo, siendo ésta una época seca (verano), por tanto, la temperatura aumenta y el movimiento del agua disminuye, haciendo que también disminuya el % de oxígeno (Orozco, Flores, Durán & Ruíz, 2011). Al comparar con el estudio ambiental (ExPost) del sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Cuenca en su etapa de operación y mantenimiento realizado por ETAPA en el 2017, este muestra valores de 77% O.D en el sistema Machángara y Yanuncay que también son inferiores al 80% O.D que es el límite establecido por el TULSMA, sin embargo, al no ser una diferencia muy significativa no se considera muy relevante, pues el agua se va auto depurando y también dependería el punto de muestreo.

La presencia de hierro y manganeso se da por la filtración del agua en el suelo, por tanto, siempre existirá una concentración en el agua fuente (McFarland & Dozier, 2004); en el agua tratada o en distribución el valor del hierro aumenta lo que podría asumirse a la presencia de oxidación en las tuberías dentro del proceso de potabilización sin embargo se sigue encontrando dentro de la INEN 1108:2020. En el estudio de ETAPA EP antes mencionado, también se detectó el mismo comportamiento de estos metales.

Como se puede observar en el caso del zinc, el proceso de potabilización disminuye la concentración de este metal, por lo que pudo ser detectable por el equipo ICP-OES, mostrando que en la distribución aumento su concentración, se puede atribuir que su presencia se da por algunas tuberías que presentan en su composición este metal.

En el sistema de Machángara se detectó la presencia de cobre en la distribución la misma que cumple la normativa, pero al no presentarse en el agua tratada, se atribuye a que el muestreo fue realizado en la zona central antigua de la ciudad de Cuenca y esta parte podría tener tuberías de cobre.



Es importante mencionar que en el primer estudio realizado, el aluminio estaba por fuera de los límites establecidos según el TULSMA y la OMS, por ello, se tomó la decisión de realizar un nuevo muestreo para verificar las concentraciones detectadas, obteniendo valores que si cumplen las normativas, tanto en agua fuente, tratada y en distribución.

5.3 Análisis estadístico inferencial

Para determinar si existen diferencias significativas entre los parámetros físico-químicos y concentración de cada metal en el agua antes y después del tratamiento por cada planta y también sin discriminar entre plantas, siendo un total de 16 muestras, se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales. Para elegir el tipo de prueba, se determinaron las normalidades y homocedasticidades. La prueba de normalidad de datos para muestras pequeñas, Shapiro Wilk considerando un nivel de significancia del 5%, reveló una distribución normal ($p>0.05$) en los datos de : pH, bario y calcio; mientras que encontró una distribución no normal en el resto ($p<0.05$); por lo que se tomó la decisión de trabajar con pruebas no paramétricas, además la prueba de Levene utilizada para establecer la homogeneidad y homocedasticidad reveló que: la conductividad, temperatura, bario, calcio, hierro, manganeso y zinc tenían un comportamiento homogéneo en cuanto a sus varianzas. Ver tabla 26.



Tabla 26: Pruebas de normalidad y homocedasticidad.

Característica	Normalidad				Homocedasticidad	
	Fuente		Tratada		F	p
	W	p	W	p		
pH	0.894	0.256*	0.934	0.133*	4.495	0.043
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	0.893	0.248*	0.866	0.005	0.412	0.526**
Turbiedad (UTN)	0.766	0.012	0.490	0.000	8.894	0.006
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0.853	0.853*	0.918	0.045	2.337	0.136**
Cl_2 (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Aluminio (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Arsénico (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Bario (mg/l)	0.790	0.022	0.943	0.204*	2.593	0.118**
Calcio (mg/l)	0.962	0.831*	0.967	0.616*	0.351	0.558**
Cadmio (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Cobalto (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Cobre (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Cromo (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Hierro (mg/l)	0.875	0.169*	0.815	0.001	0.276	0.603**
Manganeso (mg/l)	0.627	0.000	0.530	0.000	0.902	0.350**
Sodio (mg/l)	0.510	0.510*	0.309	0.000	4.925	0.033
Níquel (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Plomo (mg/l)	-	-	-	-	-	-
Zinc (mg/l)	0.870	0.152*	0.339	0.000	1.558	0.222**
Mercurio (mg/l)	-	-	-	-	-	-

Nota: *Comportamiento normal ($p > 0.05$), ** Comportamiento homogéneo ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

W = valor de la prueba Shapiro Wilk

F = valor del test de Levene

p = significancia estadística de la prueba Shapiro Wilk y el test de Levene, indica si los datos son normales o no normales.



5.3.1 Contraste de igualdad en medias en muestras relacionadas

En aguas fuente y tratadas.

El análisis reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) de medianas en: pH con una disminución de 0.4, en la turbiedad con una disminución de 5 UTN, una disminución de temperatura de 0.2°C, 0.86 mg/l de cloro residual y en cuanto a los metales, el aluminio tiene una diferencia de 0.0042 mg/l. Mientras que el resto de los parámetros a pesar de haber disminuido después del tratamiento, las medianas no fueron significativamente diferentes. Detalles en la tabla 27.

Tabla 27: Diferencia de medias entre la fuente y la tratada.

Característica	Fuente		Tratada		Diferencia	W	p
	Mediana	DE	Mediana	DE			
pH	7.4500	0.3662	7.0500	0.2446	-0.4000	30	0.005**
Conductividad ($\mu\text{s/cm}$)	75.0000	26.7261	80.0000	35.0510	5.0000	127	0.114
Turbiedad (UTN)	5.0000	3.3139	0.0000	0.3536	-5.0000	47	0.015*
Temperatura (°C)	15.9000	1.2218	15.7000	0.2673	-0.2000	36	0.011*
Cl ₂ (mg/l)	0.0000	0.0000	0.8600	0.2471	0.8600	166	0.001***
Aluminio (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0042	0.0043	0.0042	176	0.001***
Arsénico (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-
Bario (mg/l)	0.0234	0.0068	0.0224	0.0064	-0.0010	88	0.877
Calcio (mg/l)	0.0212	0.0045	0.0210	0.0074	-0.0002	109	0.464
Cadmio (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-
Cobalto (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-
Cobre (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-
Cromo (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-
Hierro (mg/l)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0000	81	0.628
Manganeso(mg/l)	0.0113	0.0373	0.0047	0.0550	-0.0066	56	0.109
Sodio (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-
Níquel (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-
Plomo (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-



Zinc (mg/l)	0.0055	0.0056	0.0031	0.0063	-0.0024	131	0.080
Mercurio (mg/l)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-

Nota: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Fuente: *Elaboración propia.*

Entre redes de distribución

La comparación entre las redes de distribución con la prueba no paramétrica, H-Kruskall Wallis reveló diferencias de pH ($p = 0.017$) entre las fuentes de los tres sistemas, haciendo la prueba post hoc para determinar entre que pares se encontraron las diferencias, se encontró que el pH del Machángara tiene un valor significativamente mayor al del Tomebamba ($p = 0.034$) y similar al de Yanuncay ($p = 0.70$); mientras que Yanuncay y Tomebamba presentaron resultados equivalentes ($p = 1.00$).

La presencia de bario entre sistemas también fue diferente ($p = 0.017$), en la prueba de comparación por pares se encontró que los sistemas Yanuncay y Tomebamba fueron significativamente superiores al de Machángara ($p = 0.024$) en cuanto al contenido de Ba, mientras que Tomebamba y Yanuncay presentaron una similitud de concentración ($p = 0.421$).

La concentración de aluminio varía entre fuentes ($p = 0.001$), en la prueba de comparación por pares se encontró que el sistema de Machángara con respecto al de Tomebamba presentó una concentración significativamente superior de Al ($p = 0.008$) así también, entre Tomebamba y Yanuncay presentó la misma significancia.

La presencia de manganeso fue distinta entre las fuentes ($p = 0.009$), en la prueba de comparación por pares se encontró que el sistema Machángara presentó una concentración significativamente superior de Mn al Tomebamba y al Yanuncay ($p = 0.024$) mientras que entre Tomebamba y Yanuncay no se revelaron diferencias ($p = 0.690$). Los demás parámetros físico-químicos y de concentración de metales no presentaron diferencias significativas entre sistemas.



Tabla 28: Comparación de medias entre redes de distribución.

Características	Machángara		Yanuncay		Tomebamba		H	p
	Mediana	DE	Mediana	DE	Mediana	DE		
pH	7.300	0.134	6.800	0.217	6.800	0.114	8.114	0.017*
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	80.000	5.477	100.000	20.736	100.000	4.472	5.232	0.073
Turbiedad (UTN)	0.000	0.000	2.000	3.286	0.000	1.789	4.085	0.130
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	20.800	0.305	21.600	3.145	19.600	1.337	2.951	0.229
Cl_2 (mg/l)	0.500	0.237	0.050	0.305	0.400	0.161	1.591	0.451
Aluminio (mg/l)	0.004	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000	14.000	0.001*
Arsénico (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Bario (mg/l)	0.019	0.002	0.028	0.003	0.026	0.001	9.780	0.008*
Calcio (mg/l)	0.025	0.003	0.024	0.006	0.028	0.004	1.220	0.543
Cadmio (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Cobalto (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Cobre (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Cromo (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Hierro (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.765	0.414
Manganeso(mg/l)	0.018	0.009	0.004	0.001	0.003	0.002	9.500	0.009*
Sodio (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Níquel (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Plomo (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-
Zinc (mg/l)	0.013	0.011	0.027	0.257	0.016	0.043	0.380	0.827
Mercurio (mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Análisis estadístico multivariado

5.4.1 Análisis de las correlaciones más relevantes entre variables

Se encontraron correlaciones importantes entre los parámetros analizados en sentidos inverso ($-0.31 \leq r \leq -0.57$) y sentidos directo ($0.36 \leq r \leq 0.66$), las principales correlaciones se dieron entre la conductividad, el aluminio y calcio; el pH con la conductividad y manganeso; el O.D % con la temperatura y el aluminio con el calcio. Los detalles se pueden observar en la figura 24.



Tabla 29: Matriz de componentes del agua fuente en los 4 sistemas

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
pH	-0.154	-0.682	0.444	-0.044	-0.337	0.124
Conductividad	0.322	0.008	-0.070	-0.069	0.068	0.138
Turbiedad	0.319	-0.096	-0.102	-0.054	0.084	0.136
OD	-0.306	0.086	-0.208	-0.343	-0.545	0.322
T	0.286	-0.224	0.457	0.135	0.149	-0.101
Al	0.315	-0.007	-0.115	-0.228	-0.270	-0.735
Ba	0.310	-0.087	-0.260	-0.166	0.190	0.418
Ca	0.312	0.113	0.023	-0.356	-0.388	-0.041
Fe	0.291	0.065	-0.170	0.774	-0.510	0.127
Mn	0.313	-0.184	0.079	-0.172	-0.122	0.162
Zn	0.317	-0.133	-0.085	-0.119	0.116	0.181

PC: componente

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 25, se puede apreciar que los componentes se distribuyen en los 4 cuadrantes, el primer cuadrante se denomina “características de elementos metálicos” ya que tenemos al hierro y calcio; el segundo cuadrante se lo ha denominado como “características de elementos metálicos-químicosfísicos” ya que está constituido por: conductividad, turbiedad, temperatura, bario, aluminio, zinc y manganeso; el tercer componente se lo ha nombrado “elemento químicofísico I” ya que se articuló únicamente por el pH; por último el cuarto cuadrante por presentar solo el oxígeno disuelto recibió el nombre de “elemento químicofísico II”. Se encontró que los elementos del primer y segundo cuadrante están altamente correlacionados ya que el ángulo entre estos es pequeño, mientras que el pH al presentar un ángulo recto en relación a los otros vectores indica la ausencia de correlación, por otra parte el O.D presenta una correlación negativa con el primer y segundo cuadrante al ser opuesto a estos vectores, pero con el tercer cuadrante no presenta correlación alguna; además al presentar una mayor longitud de los vectores indica una mayor relevancia y de acuerdo a la puntuación del color se puede denotar la contribución de los elementos.

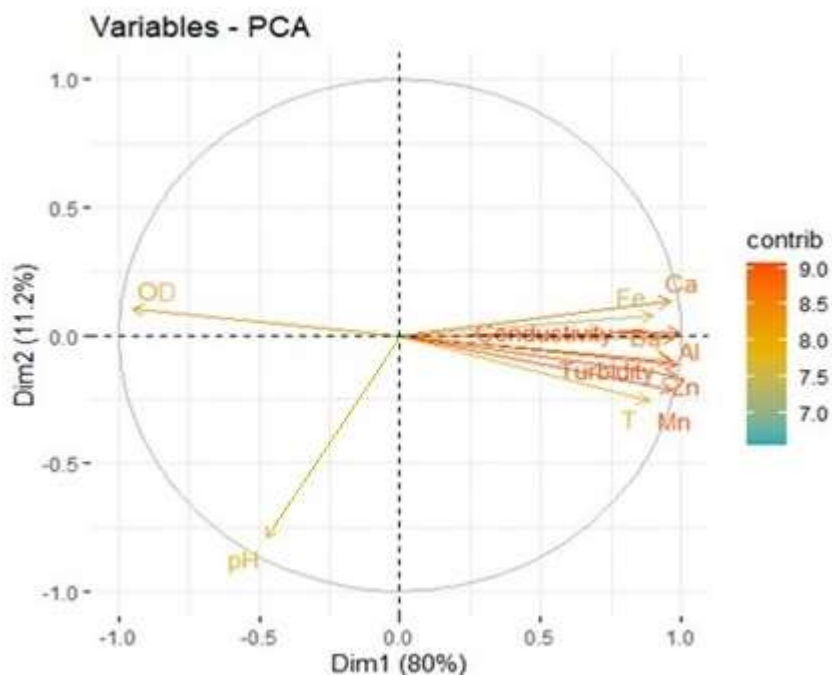


Figura 25: ACP (agrupación de parámetros)-análisis agua fuente
Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 Análisis de los componentes principales en el agua tratada

La tabla 30, muestra los componentes principales para el agua tratada, en donde al igual que el agua fuente, es de mayor relevancia el primer componente PC1, representando el 85.5 % de la varianza acumulada, donde todos los componentes son igual de importantes. La gráfica de representación se podrá observar en la figura 26.



Tabla 30: Matriz de componentes del agua tratada en los 4 sistemas

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
pH	0.275	-0.340	0.333	-0.355	0.441	0.350
Conductividad	0.309	0.072	-0.029	0.098	-0.160	0.414
Turbiedad	0.310	-0.039	-0.034	0.158	0.069	0.199
OD	0.311	-0.019	-0.008	0.153	0.1	0.193
Cl ₂	-0.268	-0.335	-0.573	-0.399	-0.296	0.371
T	0.310	-0.053	0.016	0.140	0.064	0.060
Al	0.304	-0.024	-0.018	-0.169	-0.422	0.010
Ba	0.300	-0.058	-0.376	0.311	-0.108	0.145
Ca	0.283	0.270	0.284	-0.184	-0.585	-0.153
Fe	0.206	0.697	-0.402	-0.424	0.358	-0.015
Mn	0.282	-0.344	0.042	-0.505	-0.003	-0.391
Zn	0.288	-0.285	-0.415	0.209	0.138	-0.539

PC=componente

Fuente: Elaboración propia.

En el agua tratada se puede observar 3 cuadrantes, en donde el primero recibe el nombre de “características de elementos metálicos-químico-físicos” ya que tenemos al hierro, calcio y conductividad; el segundo cuadrante se lo ha nombrado “características de elementos químico-físicos-metálicos” ya que está conformado por: turbiedad, temperatura, pH, oxígeno disuelto, bario, aluminio, zinc y manganeso; el tercer componente se denomina “elemento químico-físico” ya que presenta solo el cloro residual. Se encontró que los elementos del primer y segundo cuadrante están altamente correlacionados ya que el ángulo entre estos es pequeño, mientras que el Cl₂ al estar opuesto a los demás vectores presenta una correlación negativa, asimismo al presentar una mayor longitud de los vectores indica una mayor relevancia y de acuerdo a la puntuación del color se puede denotar la contribución de los elementos. Ver figura 24.

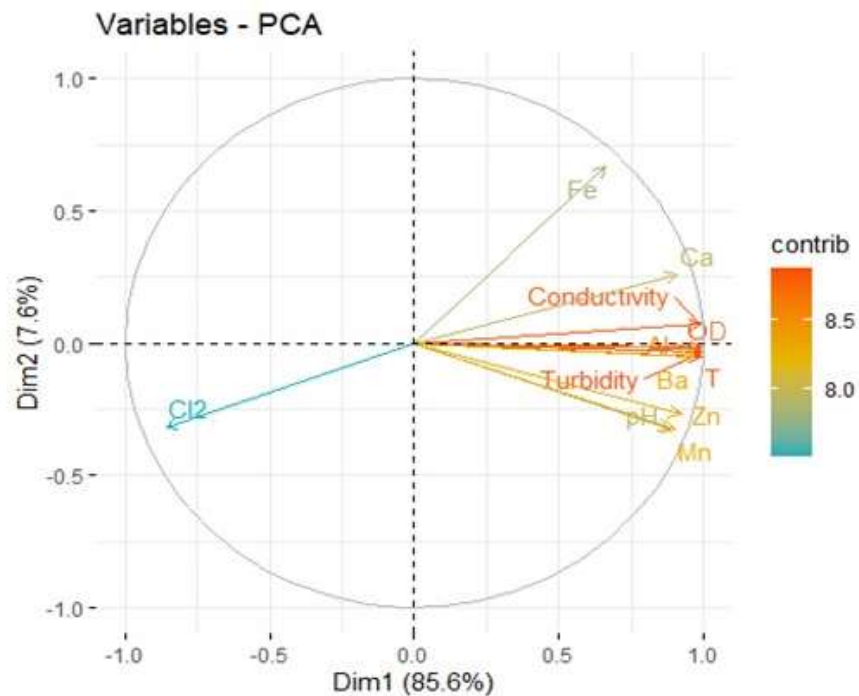


Figura 26: ACP (agrupación de parámetros)-análisis agua tratada
Fuente: Elaboración propia.

5.4.4 Análisis de los componentes principales en el agua en distribución

Para el agua en distribución se detalla los componentes principales en la tabla 31, siendo de mayor relevancia los tres primeros componentes con un 66.14 % de varianza acumulada; en donde el PC1 presenta a la conductividad, turbiedad, aluminio y manganeso como valores mas relevantes, para el PC2 la mayor proporción se encuentra el O.D, cloro residual, hierro y zinc, mientras que el PC3 muestra mayor relevancia con la temperatura, bario y calcio. La gráfica de representación se podrá observar en la figura 27.



Tabla 31: Matriz de componentes del agua en distribución de los 3 sistemas

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
pH	-0.350	-0.124	0.370	0.324	-0.033	0.216
Conductividad	0.385	0.087	0.265	0.207	0.340	-0.346
Turbiedad	0.369	0.013	0.321	-0.213	-0.349	0.000
OD	0.204	-0.451	-0.189	0.126	-0.331	-0.233
Cl ₂	0.055	-0.503	0.027	-0.277	0.375	-0.263
T	0.046	0.310	0.484	-0.216	-0.179	-0.480
Al	0.413	-0.203	0.124	-0.048	0.487	0.265
Ba	0.322	0.327	-0.399	0.034	-0.143	-0.148
Ca	0.268	-0.240	0.351	-0.082	-0.370	0.446
Fe	-0.119	0.338	0.077	-0.565	0.232	0.275
Mn	-0.422	-0.198	0.247	-0.058	0.007	-0.327
Zn	0.089	0.256	0.235	0.579	0.176	0.078

PC=componente

Fuente: Elaboración propia.

En este último análisis ACP que presenta la figura 27, se puede observar que los componentes están distribuidos en los 4 cuadrantes, en donde el primer cuadrante se denomina “características de elementos químicos-físicos-metálicos I” ya que tenemos la presencia de temperatura, conductividad, turbiedad, zinc y bario; el segundo cuadrante se lo ha denominado como “características de elementos químicos-físicos-metálicos II” ya que está constituido por oxígeno disuelto, cloro residual, aluminio y calcio; el tercer componente se lo ha nombrado “características de elementos metálico-químico-físico” ya que está formado por el manganeso y pH; el último cuadrante al presentar solo el hierro recibe el nombre de “elemento metálico”. Con respecto a los ángulos formados entre los vectores de los cuadrantes, se correlacionan de acuerdo a cuán distantes están entre ellos, si forman un ángulo pequeño presentan una alta correlación, si presentan un ángulo recto se da una ausencia de correlación y si son opuestos presentan una correlación negativa; de acuerdo a su longitud mientras mayor sea esta, los vectores indican una mayor relevancia y finalmente con respecto a su color aportan mayor contribución de acuerdo a la puntuación.

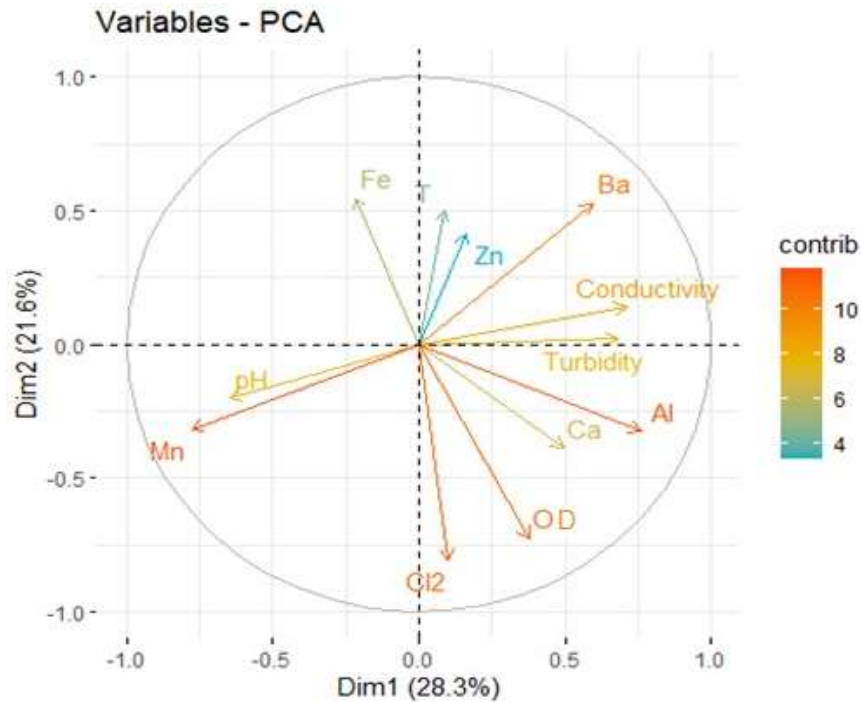


Figura 27: ACP (agrupación de parámetros)-análisis agua en distribución
Fuente: Elaboración propia.

5.4.5 Análisis del clúster para el sistema Tomebamba

Se ha tomado la decisión de establecer 4 dendogramas clústeres de cada sistema por separado para determinar los agrupamientos por características similares. En el caso del sistema Tomebamba se obtuvo dos grupos, como se puede observar en la figura 28, donde el primero solo presenta una muestra del agua fuente, mientras que el segundo grupo se divide en dos subgrupos, siendo el primero la otra muestra del agua fuente y el segundo se subdivide en varios grupos pequeños, donde todos corresponden a las muestras de agua tratada y en distribución.

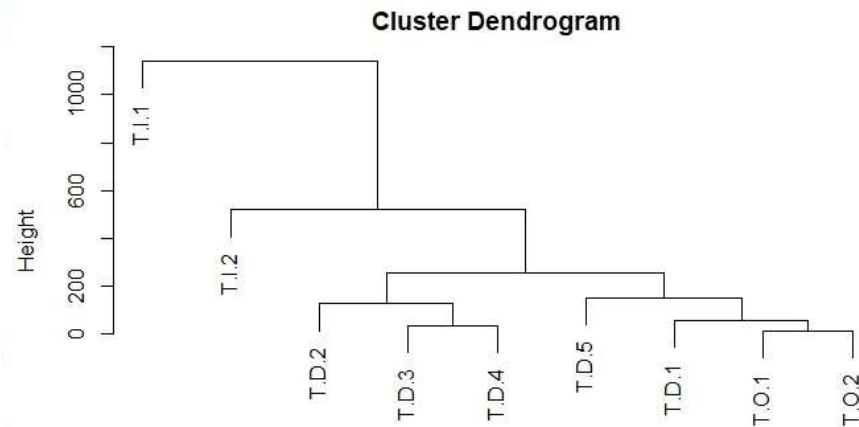


Figura 28: Dendrograma, sistema Tomebamba
Fuente: Elaboración propia.

5.4.6 Análisis del clúster para el sistema Machángara

Para el sistema Machángara se obtuvo dos grupos, el primero está formado por las dos muestras del agua fuente como se puede observar en la figura 29, mientras que el segundo grupo se subdivide en dos grupos más pequeños, que corresponden a todas las muestras del agua tratada y en distribución.

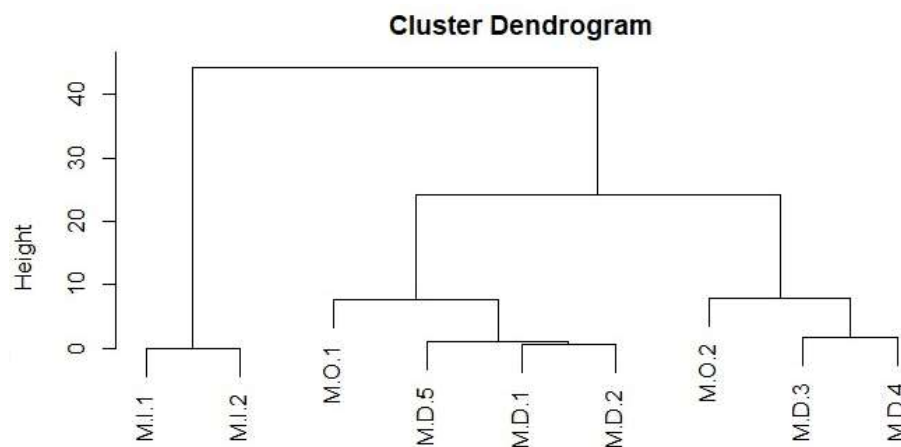


Figura 29: Dendrograma, sistema Machángara
Fuente: Elaboración propia.

5.4.6 Análisis del clúster para el sistema Yanuncay

En la figura 30, se puede observar el clúster del sistema Yanuncay, donde se obtuvo dos grandes grupos, el primero está formado por las muestras del agua en distribución, mientras que el segundo grupo se subdivide en dos grupos, donde el primero está formado por las muestras de agua fuente y el otro subgrupo se divide en pequeños grupos formados por las muestras de agua tratada y en distribución.

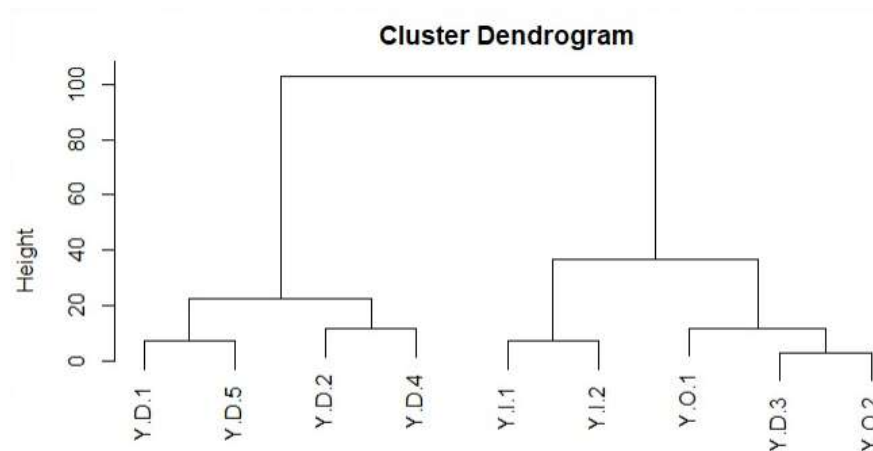


Figura 30: Dendrograma, sistema Yanuncay
Fuente: Elaboración propia.

5.4.6 Análisis del clúster para el sistema de Culebrillas

El último clúster correspondiente al sistema de Culebrillas presenta dos subgrupos, el primero corresponde a las muestras de agua en la fuente y el segundo a las muestras de agua tratada, en este caso no existen las muestras de agua en distribución. Ver figura 31.

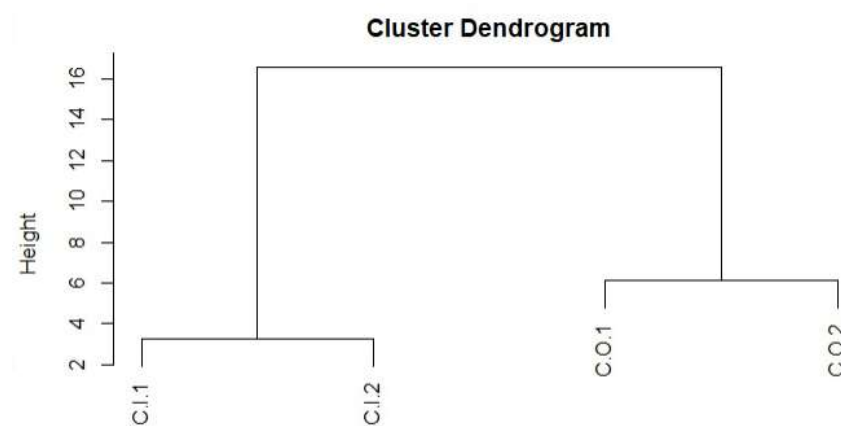


Figura 31: Dendrograma, sistema Culebrillas
Fuente: Elaboración propia.

Agua residual

La tabla 32 muestra el análisis de agua residual, en donde todos los parámetros físico-químicos y de concentración de metales, cumplen con todos los límites establecidos por el TULSMA ver tabla 19, una vez terminado el tratamiento del agua, previo a la descarga de la misma a un cuerpo de agua dulce.



Tabla 32: Características de Ucubamba.

Característica	Inicial		Final		TULSMA	Condición
	Media	DE	Media	DE		
pH	7.10	0.00	8.00	0.00	5-9	Cumple
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	540.00	0.00	550.00	0.00		
Turbiedad (UTN)	166.00	0.00	67.00	0.00		
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	20.40	0.00	23.60	0.00	< 35 $^{\circ}\text{C}$	Cumple
O.D (mg/l)	4.19	0.00	13.50	0.00		
O.D (%)	47.54	0.00	162.28	0.00		
Cl ₂ (mg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	< 0.5	Cumple
Aluminio (mg/l)	3.5394	0.23	1.6599	0.17	< 5	Cumple
Arsénico (mg/l)	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 100	Cumple
Bario (mg/l)	0.1143	0.01	0.0809	0.00	< 2	Cumple
Calcio (mg/l)	0.0468	0.00	0.0489	0.00		
Cadmio (mg/l)	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.02	Cumple
Cobalto (mg/l)	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.5	Cumple
Cobre (mg/l)	0.0342	0.00	0.0165	0.01	< 1	Cumple
Cromo (mg/l)	0.0052	0.01	0.0115	0.00	< 0.5	Cumple
Hierro (mg/l)	0.0016	0.00	0.0011	0.00	< 10	Cumple
Manganeso(mg/l)	0.3650	0.01	0.2502	0.00	< 2	Cumple
Sodio (mg/l)	0.0395	0.00	0.0359	0.00		
Níquel (mg/l)	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 2	Cumple
Plomo (mg/l)	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.2	Cumple
Zinc (mg/l)	0.1629	0.01	0.0422	0.00	< 5	Cumple
Mercurio (mg/l)	0.0000	0.00	0.0000	0.00	< 0.005	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Resultados del índice de toxicidad de metales

Para los cálculos correspondientes se aplicó las fórmulas expresadas en el capítulo II, literal 2.3.

Análisis de toxicidad de los metales.



Como se puede observar en las tablas 33, 34 y 35, se ha calculado el factor de ponderación de la unidad y el subíndice del metal para determinar el HPI de los tres sistemas en los que se ha muestreado el agua en distribución para las concentraciones de 13 metales, no ha se ha considerado el cobalto y calcio ya que no tienen una máxima concentración permitida en la INEN 1108:2020 y en la OMS.

Tabla 33: Cálculo del HPI para el sistema Tomebamba

Metal	Norma	Mi(mg/l)	Si (mg/l)	Ii (mg/l)	Wi (l/mg)	Qi	Wi*Qi
Al	OMS	0.01	0.10	0.00	10.00	11.60	116.00
As	INEN	0.00	0.01	0.00	100.00	0.00	0.00
Ba	INEN	0.03	1.30	0.00	0.77	2.05	1.57
Cd	INEN	0.00	0.00	0.00	333.33	0.00	0.00
Cu	INEN	0.00	2.00	0.00	0.50	0.00	0.00
Cr	INEN	0.00	0.05	0.00	20.00	0.00	0.00
Fe	OMS	0.00	0.30	0.00	3.33	0.03	0.11
Mn	OMS	0.00	0.10	0.00	10.00	3.40	34.00
Na	OMS	0.00	200.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ni	INEN	0.00	0.07	0.00	14.29	0.00	0.00
Pb	INEN	0.00	0.01	0.00	100.00	0.00	0.00
Zn	OMS	0.02	0.10	0.00	10.00	18.70	187.00
Hg	INEN	0.00	0.01	0.00	166.67	0.00	0.00
Σ					768.89		338.69

Wi: factor de ponderación de la unidad

Qi: subíndice del metal

Mi: concentración medida

Si: máxima concentración permitida

Ii: concentración máxima deseable

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 34: Cálculo del HPI para el sistema Yanuncay

Metal	Norma	Mi(mg/l)	Si (mg/l)	Ii (mg/l)	Wi (l/mg)	Qi	Wi*Qi
Al	OMS	0.00	0.10	0.00	10.00	4.20	42.00
As	INEN	0.00	0.01	0.00	100.00	0.00	0.00
Ba	INEN	0.03	1.30	0.00	0.77	2.18	1.67
Cd	INEN	0.00	0.00	0.00	333.33	0.00	0.00
Cu	INEN	0.00	2.00	0.00	0.50	0.00	0.00
Cr	OMS	0.00	0.05	0.00	20.00	0.00	0.00
Fe	OMS	0.00	0.30	0.00	3.33	0.10	0.33
Mn	OMS	0.00	0.10	0.00	10.00	3.70	37.00
Na	INEN	0.00	200.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ni	INEN	0.00	0.07	0.00	14.29	0.00	0.00
Pb	OMS	0.00	0.01	0.00	100.00	0.00	0.00
Zn	INEN	0.04	0.10	0.00	10.00	36.90	369.00
Hg	INEN	0.00	0.01	0.00	166.67	0.00	0.00
					Σ	768.89	450.01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35: Cálculo del HPI para el sistema Machángara

Metal	Norma	Mi(mg/l)	Si (mg/l)	Ii (mg/l)	Wi (l/mg)	Qi	Wi*Qi
Al	OMS	0.00	0.10	0.00	10.00	4.20	42.00
As	INEN	0.00	0.01	0.00	100.00	0.00	0.00
Ba	INEN	0.02	1.30	0.00	0.77	1.42	1.09
Cd	INEN	0.00	0.00	0.00	333.33	0.00	0.00
Cu	INEN	0.00	2.00	0.00	0.50	0.21	0.11
Cr	INEN	0.00	0.05	0.00	20.00	0.00	0.00
Fe	OMS	0.00	0.30	0.00	3.33	0.10	0.33
Mn	OMS	0.02	0.10	0.00	10.00	19.90	199.00
Na	OMS	0.00	200.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ni	INEN	0.00	0.07	0.00	14.29	0.00	0.00
Pb	INEN	0.00	0.01	0.00	100.00	0.00	0.00
Zn	OMS	0.02	0.10	0.00	10.00	16.20	162.00
Hg	INEN	0.00	0.01	0.00	166.67	0.00	0.00
					Σ	768.89	404.50

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 36, se puede observar las categorías del HPI según Mahato, Singh, Ashwani, y Tiwari (2014) que nos permiten determinar la relevancia de su valor.



Tabla 36: Categorías del HPI

<i>Categorías del HPI</i>	
<i>HPI</i>	<i>Clase</i>
<15	Bajo
15-30	Medio
>30	Alto

HPI = índice de contaminación parcial de metales pesados
Fuente: Mahato, Singh, Ashwani, y Tiwari (2014)

Una vez calculado el HPI para cada sistema se procedió a comparar con las categorías de la tabla 36, mostrando que para los 3 sistemas el índice de contaminación parcial de metales pesados es bajo. Ver tabla 37.

Tabla 37: HPI de los sistemas

<i>Sistema</i>	<i>HPI de Sistemas</i>	<i>HPI</i>
Tomebamba	0.44	Bajo
Machángara	0.53	<15
Yanuncay	0.59	Bajo

HPI = índice de contaminación parcial de metales pesados
Fuente: Elaboración propia.

Según la evaluación de metales pesados en aguas potables de Ecuador: Quito, Ibarra y Guayaquil, realizado por Cipriani, Molinero, Jara y Barrado, nos indica que la ciudad de Guayaquil presenta un alto HPI, mientras que Ibarra y Quito muestran valores bajos al igual que la ciudad de Cuenca.

5.6 Resultados de la determinación del microcosmos óptimo

Al realizar los siete ensayos se pudo observar un comportamiento diferente entre cada uno de estos microcosmos, obteniendo los siguientes resultados:

Para el primer ensayo, realizado con la avena se observó un comportamiento bueno, pues de las 10 daphnias magnas colocadas en el recipiente, se vio que a los 7 días que es el tiempo aproximado para su reproducción, la gran mayoría ya tenía neonatos y se continuaron reproduciendo durante las 4 semanas. El segundo ensayo con la lechuga, no fue tan favorable como el primero, pues se vio que la lechuga al ser colocada directamente en el agua comenzaba enseguida el proceso de putrefacción haciendo que el agua se contamine lo cual no favorece la reproducción de la especie, hubo pocas daphnias al final de la cuarta semana.



Con respecto al tercer ensayo, correspondiente a la levadura, fue bueno, las daphnias se reprodujeron, pero al final de la semana 4 se obtuvo menos que en el ensayo 1, ocurriendo lo mismo para el cuarto ensayo con la espirulina. El quinto ensayo, con el trigo presentó un comportamiento muy similar al primer ensayo de la avena, obteniendo un mayor número de daphnias al final de la cuarta semana.

Mientras que el sexto ensayo de la espirulina con la levadura, presentó el mejor comportamiento con respecto a todos los ensayos, se vio que las daphnias se adaptaron rápidamente a este medio y su reproducción fue bastante buena, al final de la cuarta semana se obtuvo un gran número. Finalmente, para el séptimo y último ensayo, con la espirulina y trigo, se obtuvo también un comportamiento bueno, no tan favorable como el ensayo 6, pero también se vio una buena reproducción al final de la cuarta semana.

Debido a la respuesta de las daphnias frente a los diferentes alimentos, se decidió mantener la comida del ensayo 6, con las mismas condiciones mencionadas, es decir, a temperatura ambiente, con el oxigenador de pecera y cambiando el 50% del agua tres días a la semana, los mismos en los que se les proporcionaba su alimento.

5.7 Resultados de los ensayos de biotoxicidad

Para la evaluación biotóxica del agua potable mediante el uso de daphnias se realizaron dos pruebas que mostraron los siguientes resultados:

5.7.1 Toxicidad aguda

Los resultados de la toxicidad aguda, correspondiente a la estandarización de las daphnias magnas se puede observar en la tabla 38, que son cuatro ensayos con cuatro replicas, es decir, la misma concentración de dicromato de potasio, considerando un blanco en cada replica, con 10 dáfidos por ensayo, el conteo se realizó a las 48 horas mostrando que los blancos y la concentración de 0.3 ppm no presento ningún organismo muerto, mientras que a la concentración de 0.8 y 1.5 ppm, ya se pudo visualizar dáfidos sin vida y a la concentración de 2 ppm ya no se encontró ningún organismo con vida. También se visualiza en la tabla el porcentaje de mortalidad de cada concentración con respecto a la totalidad de daphnias.



Tabla 38: Número de daphnias magnas muertas en dicromato de potasio

Concentración nominal	Número de organismos muertos				Total	% de mortalidad
	Réplicas	1	2	3		
Blanco	0	0	0	0	0/40	0
0.3 ppm	0	0	0	0	0/40	0
0.8 ppm	2	0	4	2	8/40	20
1.5 ppm	6	8	8	6	30/40	75
2.0 ppm	10	10	10	10	40/40	100

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 39, muestra el análisis realizado en el programa SPSS, en donde se calculó la concentración letal media CL50 mediante una regresión PROBIT que brinda el mismo programa, en donde se muestra las concentraciones letales desde el 1-99%, en este caso se necesita el 50% que dio como resultado una CL50 = 1.121 ppm, con un límite de confianza del 95%, mostrando un intervalo de 0.999 – 1.24 ppm.

Tabla 39: Tabla de resultados de la regresión Probit

Probabilidad	95% de límites de confianza para concentración			
	Estimación	Límite inferior	Límite superior	
PROBIT	.010	.491	.338	.611
	.020	.541	.386	.660
	.030	.575	.419	.694
	.040	.602	.447	.720
	.050	.625	.470	.743
	.060	.645	.491	.762
	.070	.664	.509	.780
	.080	.681	.527	.796
	.090	.696	.543	.812
	.100	.711	.559	.826
	.200	.832	.688	.942
	.300	.931	.795	1.040



.400	1.025	.897	1.136
.500	1.121	.999	1.240
.600	1.227	1.105	1.363
.700	1.351	1.221	1.519
.800	1.512	1.361	1.739
.900	1.768	1.565	2.123
.910	1.805	1.594	2.182
.920	1.847	1.625	2.248
.930	1.894	1.661	2.324
.940	1.948	1.700	2.412
.950	2.011	1.747	2.516
.960	2.088	1.802	2.646
.970	2.187	1.873	2.815
.980	2.325	1.970	3.057
.990	2.562	2.131	3.485

Fuente: Elaboración propia.

La figura 32, presenta de forma gráfica los datos mostrados en la tabla 40, es decir indica la CL50 = 1.121 ppm.

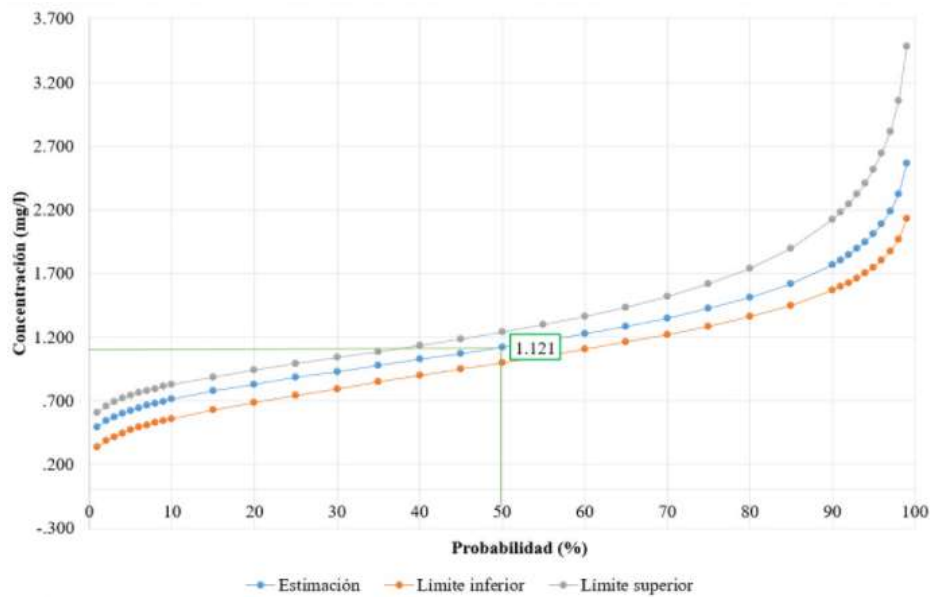


Figura 32: Regresión Probit CL50 para el dicromato de potasio
Fuente: Elaboración propia.



5.7.2 Toxicidad crónica

Para la toxicidad crónica, correspondiente al bioensayo de toxicidad con el aluminio, se muestra el registro de resultados en la tabla 40, estos ensayos se realizaron con cloruro de aluminio, para determinar el CL50 del aluminio como tal, consta de 4 réplicas para las diferentes concentraciones, con su respectivo blanco en cada una, la tabla también muestra el conteo de los dáfnidos para las 4 réplicas de cada muestra de agua de los cuatro sistemas de agua en su distribución, correspondientes a las cuatro plantas potabilizadoras de agua. El conteo se basa en los 10 dáfnidos que fueron colocados para cada ensayo, éste conteo se realizó durante un tiempo de 3 semanas, registrando las muertes cada 48 horas, pero la tabla presenta únicamente los datos al final de la tercera semana con el respectivo porcentaje de mortalidad, en donde se puede observar que a la concentración de 2.5 ppm se presenta un 98% de mortalidad de esta especie, mientras que los blancos, a la concentración de 0.1 ppm y en el sistema de distribución de agua de Culebrillas no se registra ningún dáfnido sin vida.

Tabla 40: Registro de muertes de daphnias con el cloruro de aluminio y en cada sistema de distribución

Concentración nominal del Al	Número de organismos muertos				Total	% de mortalidad
	1	2	3	4		
Réplicas	1	2	3	4		
Blanco	0	0	0	0	0/40	0
0.1 ppm	0	0	0	0	0/40	0
0.5 ppm	5	4	5	5	19/40	48
1.0 ppm	8	6	7	7	28/40	70
2.5 ppm	9	10	10	10	39/40	98
S. Yanuncay	1	2	1	1	5/40	13
S. Machángara	0	1	0	0	1/40	3
S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40	0
S. Tomebamba	3	3	2	3	11/40	28

Fuente: Elaboración propia.

El análisis realizado en el programa SPSS para calcular la CL50 para el aluminio se muestra en la tabla 41, el mismo que presenta las concentraciones del 1-99% para la letalidad de la especie, mediante una regresión Probit con un límite de confianza del 95%, únicamente para los blancos y



las cuatro concentraciones con sus réplicas correspondientes, mostrando para el 50% de letalidad una CL50 = 0.594 ppm, en un intervalo de confianza del 0.467 - 0.726 ppm.

Tabla 41: Tabla de resultados de la regresión Probit de las concentraciones de aluminio

Probabilidad	95% de límites de confianza para concentración			
	Estimación	Límite inferior	Límite superior	
PROBIT	.010	.101	.042	.164
	.020	.124	.056	.193
	.030	.141	.067	.214
	.040	.156	.077	.232
	.050	.169	.087	.247
	.060	.181	.096	.261
	.070	.192	.104	.274
	.080	.203	.112	.287
	.090	.213	.120	.298
	.100	.223	.128	.309
	.200	.312	.203	.407
	.300	.398	.281	.501
	.400	.490	.368	.603
	.500	.594	.467	.726
	.600	.721	.584	.888
	.700	.887	.726	1.125
	.800	1.130	.915	1.520
	.900	1.581	1.228	2.370
	.910	1.655	1.276	2.519
	.920	1.738	1.329	2.693
	.930	1.834	1.390	2.899
	.940	1.949	1.461	3.149
	.950	2.087	1.546	3.462
	.960	2.263	1.651	3.871
	.970	2.500	1.790	4.443
	.980	2.853	1.990	5.340



.990	3.513	2.350	7.145
------	-------	-------	-------

Fuente: Elaboración propia.

La figura 33, muestra de forma gráfica los datos presentados en la tabla 42, donde se puede observar que $CL_{50} = 0.594$ ppm.

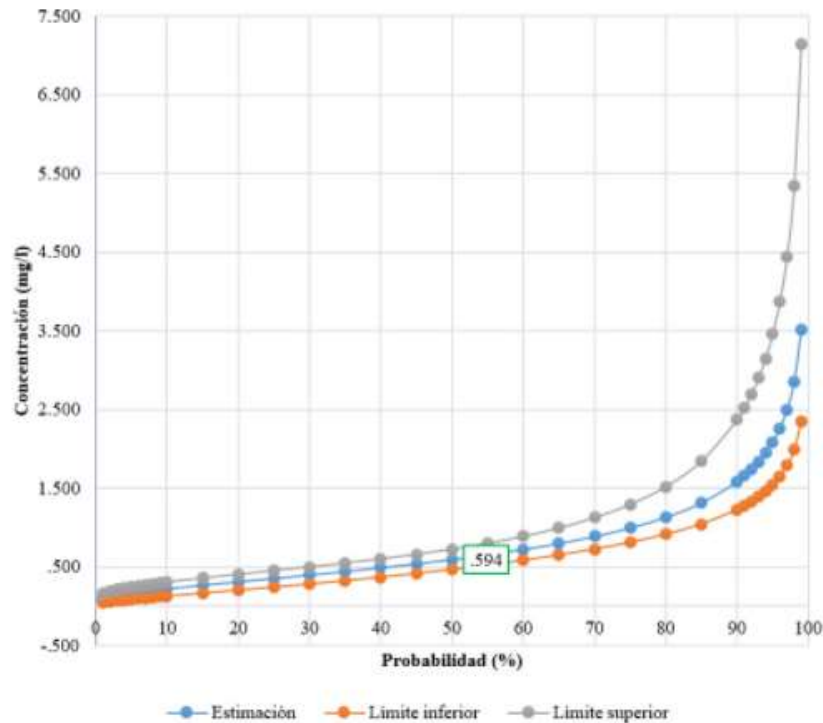


Figura 33: Regresión Probit CL_{50} para el aluminio
Fuente: Elaboración propia.

Para los ensayos realizados con las muestras de agua de cada uno de los sistemas de distribución se mostrará una gráfica que representa el número de muertes de los dáfidos al cabo de las tres semanas, ver en la figura 34. El sistema que no presentó ningún organismo muerto es el sistema de Culebrillas, el sistema de Machángara presenta 1 organismos sin vida, el sistema de Yanuncay presenta 5 dáfidos muertos y finalmente el sistema de Tomebamba fue el que presentó un mayor número de organismos sin vida, siendo de 12, de tal modo que no se pudo presentar el final de la curva en la gráfica.

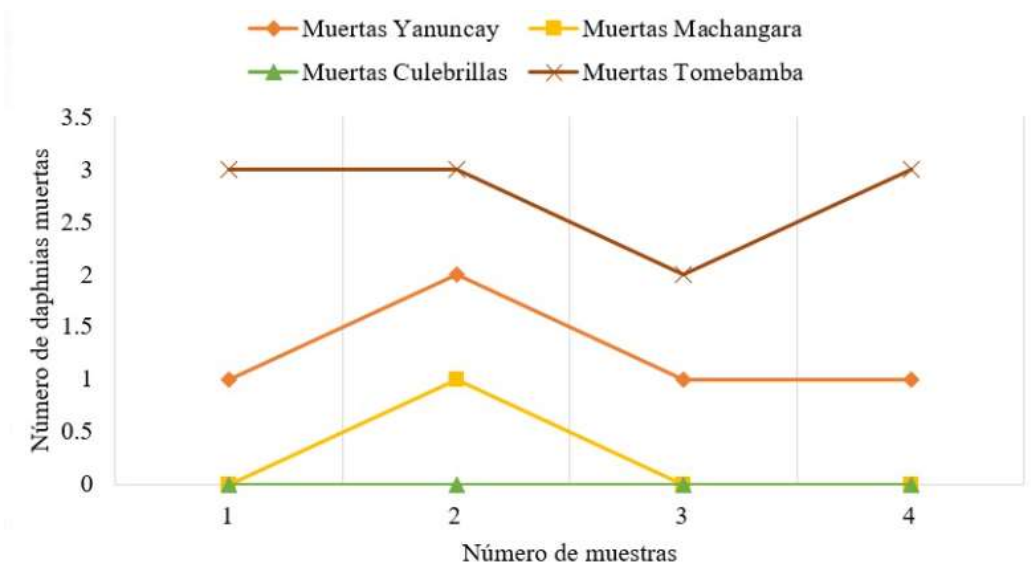


Figura 34: Muertes en cada sistema de distribución.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de CL50 en el caso del cromo nos indica que posee una sensibilidad de 1.121 ppm $K_2Cr_2O_7$ que comparando con la “Evaluación de la sensibilidad del cladóceros tropical *ceriodaphnia cornuta* a metales pesados” realizado por Perez Lagaspi et al. (2012) que indica una CL50 de 1.16 ppm $K_2Cr_2O_7$ y con la “Determinación de la concentración letal media CL50 48 de aluminio y arsénico mediante bioensayos de toxicidad acuática sobre daphnia magna” realizado por Torres y Quintero (2010) que muestra una CL50 0.99 ppm $K_2Cr_2O_7$ nos indica que el ensayo realizado para la estandarización de las daphnias magnas utilizadas en este estudio fue correcto ya que sus valores no son tan distantes, cierta varianza se pudo dar por condiciones ambientales que pudieron alterar las muestras. Por otra parte, la CL50 del aluminio correspondiente a 0.594 ppm Al se compara con los estudios antes mencionados que nos indican concentraciones de 1.54 ppm Al_2Cl_3 y 0.86 ppm Al_2NO_3 respectivamente, cabe mencionar que este estudio ocupó el Al_2Cl_3 sin embargo las concentraciones fueron preparadas en base al aluminio, lo que nos muestra que este estudio presenta una menor sensibilidad de las daphnias magnas, no obstante, su variación podría deberse a que los estudios aplicaron pruebas de toxicidad aguda, por la sal en el caso del Al_2NO_3 y por la especie de daphnia en el caso de la *ceriodaphnia cornuta*.

El ensayo de toxicidad aplicado para los cuatro sistemas muestra que para todas la plantas de tratamiento de agua potables, las concentraciones de Al detectadas no son significativas, por lo que



este número de organismos sin vida no es representativo considerando que es menos de la mitad del total de las daphnias magnas.



CONCLUSIONES

Este proyecto de titulación tuvo como objetivo determinar y analizar los parámetros físico-químicos, concentraciones de metales y la biotoxicidad en el agua potable de la ciudad de Cuenca proveniente de las 4 plantas potabilizadoras y el agua residual de la planta de tratamiento Ucubamba a través de métodos instrumentales, también estadísticos descriptivos, inferenciales y multivariados, para lo cual:

- Se determinó los parámetros físico-químicos y la concentración de metales en el agua potable y residual de la ciudad de Cuenca, los mismos que se compararon con los límites establecidos por el TULSMA para agua fuente y residual mientras que para el agua tratada y en distribución se usó la INEN 1108:2020 y la OMS; este proceso ayudó a encontrar los parámetros que estaban fuera de las normas y buscar sus posibles causas, donde se encontró que la mayoría de los parámetros estaban cumpliendo las normativas, sin embargo, el % O.D. estuvo fuera de los límites del TULSMA, pero este valor fue calculado usando una ecuación ya que el equipo daba un resultado erróneo. Además, la turbiedad en algunos casos presentó un valor de 0 UTN, es decir, el valor estuvo fuera de los límites de detección del equipo, ya que eran menores a la unidad. Por otra parte, se observó que el agua residual de Ucubamba cumplió con todos los límites establecidos por el TULSMA, mostrando que el proceso de tratamiento realizado por ETAPA EP es bastante óptimo, tanto para el agua potable como residual.
- Se realizó el análisis estadístico descriptivo, inferencial y multivariado de los parámetros físico-químicos y la concentración de metales del agua potable de la ciudad de Cuenca, los que mostraron que en algunos casos el agua fuente presentó características similares con el agua tratada y en distribución, además, mostró que existió fuertes correlaciones entre la mayoría de los parámetros físico-químicos y de metales, sin embargo, el cloro residual, el O.D y ciertos metales presentaron correlaciones negativas u opuestas, haciendo que su correlación sea inversamente proporcional o que no tengan correlación alguna.
- Debido al uso de sulfato de aluminio como coagulante en el proceso de potabilización en los cuatro sistemas se detectó bajas concentraciones de Al después del tratamiento por lo que se determinó la biotoxicidad del agua potable de la ciudad de Cuenca mediante ensayos de toxicidad crónica con daphnias magnas las cuales presentaron una CL50 de 0.594 ppm



Al lo que mostró que la sensibilidad es baja y con respecto al análisis por sistemas al presentar un bajo número de dáfnidos sin vida y asumiendo que su muerte pudo atribuirse a otros efectos ambientales no específicamente por la concentración del aluminio se concluyó que los cuatro tipos de aguas potables pueden considerarse seguras para el consumo.



RECOMENDACIONES

- Al observar la presencia de metales en el agua potable en los sistemas se recomienda hacer un estudio para optimizar el proceso de potabilización y revisar las redes de distribución en toda la ciudad.
- Se recomienda hacer un seguimiento de este estudio y realizar un mayor número de muestras, es decir en más puntos dentro de su distribución y en las diferentes épocas del año con el objetivo de tener un mayor número de datos que permitan un estudio estadístico más específico, por tanto, queda abierto a más investigaciones.
- Se recomienda que en el transcurso de la carrera se imparta más el uso de diferentes softwares para análisis de datos, ya que existen muchos con diferentes enfoques de acuerdo al estudio.



BIBLIOGRAFÍA

- Aldas Manzano, J., & Uriel Jimenez, E. (2017). *Análisis multivariante aplicado con R. 2ª ed.* Paraninfo Thomson Learning. <https://books.google.com.ec/books?id=FyE3DwAAQBAJ>
- Aguilar, O., & Navarro, B. (2018). Evaluación de la calidad de agua para consumo humano de la comunidad de Llañucancha del distrito de Abancay, provincia de Abancay 2017. *Universidad Tecnológica de los Andes*. <http://repositorio.utea.edu.pe/jspui/handle/utea/130>
- Arévalo Molina, A. (2015). Determinación de la eficiencia de los procesos de potabilización en la remoción de la carga microbiológica (coliformes totales y fecales) en la planta de tratamiento de Cebollar. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5149>
- ATSDR. (2004). *ATSDR - Declaración de salud pública: Cobalt*. <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=371&tid=64>
- ATSDR. (2015). *ATSDR - Public Health Statement: Barium*. <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=325&tid=57>
- ATSDR. (2019). *Resumen de Salud Pública: | PHS | ATSDR*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html
- Avila, R. (2013). *Sistemas de agua potable y aguas residuales de la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30007>
- Bartual Sanchez, J. (1984). *NTP 108: Criterios toxicológicos generales para los contaminantes químicos*. https://www.insst.es/documents/94886/326801/ntp_108.pdf/85c93b7e-b2e9-4e55-8bd6-f40fffbcc005
- Calvo, D. (2018, marzo 9). Clúster Jerárquicos y No Jerárquicos. *Diego Calvo*. <https://www.diegocalvo.es/cluster-jerarquicos-y-no-jerarquicos/>
- Cardozo, S. L. T., & Tapiero, V. A. Q. (2010). *Determinación de la concentración letal media CL50 48 de aluminio y arsénico mediante bioensayos de toxicidad acuática sobre daphnia magna*. 302.
- Chaturvedi, A., Bhattacharjee, S., Mondal, G. C., Kumar, V., Singh, P. K., & Singh, A. K. (2019).



Exploring new correlation between hazard index and heavy metal pollution index in groundwater. *Ecological Indicators*, 97, 239-246.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.023>

Cipriani-Ávila, I., Molinero, J., Jara-Negrete, E., Barrado, M., Arcos, C., Mafla, S., Custode, F., Vilaña, G., Carpintero, N. & Ochoa-Herrera, V. (2020). *Heavy metal assessment in drinking waters of Ecuador: Quito, Ibarra and Guayaquil*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/344887229>

Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistema de Manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados* (Vol. 1). Mc Graw Hill.

CSIC. (2003). *Toxicidad de Productos Químicos*.
<http://w1.iata.csic.es/IATA/seg1/Riesgos/TOXICIDAD%20DE%20AGENTES%20QUIMICOS.pdf>

Díaz Rodríguez, M., León, Á., Alvin, H., & Díaz Mora, M. E. (2016). *Introducción al análisis estadístico multivariado aplicado. Experiencia y casos en el Caribe colombiano*. Universidad del Norte. <https://books.google.com.ec/books?id=x3daDwAAQBAJ>

Espinal, P., & Edgardo, C. (2016). Riesgo ecológico del sulfato de bario. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2716>

ETAPA.EP. (2020). Recuperado de:

<https://www.etapa.net.ec/principal/agua-potable/operacion-y-mantenimiento/plantas-de-potabilizacion>

Fernández, S. F., Sánchez, J. M. C., Córdoba, A., & Largo, A. C. (2002). *Estadística Descriptiva*. ESIC. <https://books.google.com.ec/books?id=31d5cGxXUnEC>

Fernández Santiago. *ANÁLISIS CLUSTER*. (2012). 83. Recuperado de: https://estadistica.net/Master-Econometria/Analisis_Cluster.pdf

Flores, J. (2016). Evaluación fisicoquímica y bacteriológica de las aguas subterráneas de consumo humano con y sin ebullición de zonas aledañas a la Universidad Nacional de Cajamarca. *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1298>



- Flores-Ruiz, E., Miranda-Navales, M. G., & Villasís-Keever, M. Á. (2017). El protocolo de investigación VI: Cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Revista Alergia México*, 64(3), 364. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>
- FUOC. (2013). Análisis Cluster. En *Análisis múltiple de datos*. http://cv.uoc.edu/moduls/UW03_84003_01131/web/nwin/m1/analisis_cluster.pdf
- Gárate, E., & Diego, J. (2015). Determinación de la eficiencia de los procesos de potabilización en la remoción de la carga microbiológica (coliformes totales y fecales) en la planta de tratamiento de Tixán. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5145>
- García Sánchez, R. A., & Zambrano Delgado, L. E. (2013). *Cultivo de daphnia magna (straus, 1820) y su aplicación como alimento vivo para fines piscícolas, laboratorio de plancton facultad ciencias del mar*. (Tesis de Pregrado). Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. <https://repositorio.ulead.edu.ec/handle/123456789/569>
- González, Á. L., Solano, H. L., & Tilano, J. (2008). *Análisis multivariado aplicando componentes principales al caso de los desplazados*. 24.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Kuhar, C. W. (2010). Experimental Design: Basic Concepts. En M. D. Breed & J. Moore (Eds.), *Encyclopedia of Animal Behavior* (pp. 693-695). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045337-8.00224-2>
- Laguna Clara. *Comparación de medias*. (2010). Recuperado 22 de octubre de 2020, de <https://www.revistasden.org/files/12-CAP%2012.pdf>
- Laguna Clara. (2010). *Inferencia paramétrica: relación entre variables cualitativas y cuantitativas*. 23.
- Lenntech. (2014). *Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm>
- Lucelly Reyes. (2010). *Distribución de t Student*. 5.



- Mahato, Dr. M., Singh, A., Ashwani, & and Tiwari, A. (2014). Evaluation of Metals in Mine Water and Assessment of Heavy Metal Pollution Index of East Bokaro Coalfield Area, Jharkhand, India. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 07, 1611-1618.
- Mandal, A. (2011, febrero 24). *Riesgos para la salud del calcio*. News-Medical.Net. [https://www.news-medical.net/health/Calcium-Health-Risks-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/health/Calcium-Health-Risks-(Spanish).aspx)
- McFarland, M.L. & Dozier, M.C. (2004). *Problema del agua potable: el hierro y el manganeso*. Corporación de Texas, sistema universitario. Recuperado de: <https://texaswater.tamu.edu/resources/factsheets/15451sironandman.pdf>
- Mora Orozco, Celia de la, Flores López, Hugo Ernesto, Durán Chávez, Álvaro, & Ruiz Corral, José Ariel. (2011). Cambio climático y el impacto en la concentración de oxígeno disuelto en el Lago de Chapala. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), 381-394. Recuperado en 25 de marzo de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800016&lng=es&tlng=es.
- NIH. (2019). *Office of Dietary Supplements—Potasio*. <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Potassium-DatosEnEspañol/>
- Nordberg, G. (2011). *Metales: propiedades químicas y toxicidad*. 76.
- Norma Brasileira. (2016). *Ecotoxicologia aquatica—Toxicidade aguda—Método de ensaio com Daphnia spp (Crustacea, Cladocera) (ABNT NBR 12713)*. <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/nbr12713-2016-toxic-aguda-daphnia.pdf>
- Norma Mexicana. (2010). *Análisis de Agua—Evaluación de toxicidad aguda con Daphnia Magna, Straus (Crustacea—Cladocera)—Método de prueba (NMX-AA-087-SCFI-2010)*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166797/NMX-AA-087-SCFI-2010.pdf?fbclid=IwAR0t4y4jpbgqdLmvampx9qhtlkC8POy-RUBIFyLcDQ1Ircsy7DENa5zDcjM>
- Normalización (INN), I. N. de. (1999). *Aguas—Bioensayo de toxicidad aguda mediante la determinación de la inhibición de la movilidad de Daphnia magna o Daphnia pulex*



(Crustacea, Cladocera) (NCh 2083.Of1999).
<https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/59316>

TULSMA. (2017). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua*. Libro VI. Anexo I. 50.

OMS (2003). *Guías para la calidad de agua potable*. Primer apéndice. Tercera edición. Vol 1.
https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gwq3_es_full_lowred.pdf

OSHA. (2015). *Toxic Metals—Overview | Occupational Safety and Health Administration*.
<https://www.osha.gov/toxic-metals>

Perez Lagaspi, I. Garatachia Vargas, M. Garcia Villar, A. Rubio Franchini, I. (2017). Sensitivity of the tropical Cladoceran *Cerio Daphnia* Cornuta to the heavy metal. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33(1).
<https://www.redalyc.org/jatsRepo/370/37050971004/html/index.html>

Piedra Aguilera, A. (2017). *Estudio ambiental (ExPost) del sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Cuenca en su etapa de operación y mantenimiento*.
<https://maezuay.files.wordpress.com/2017/03/estudio-ambiental-expost-del-sistema-de-abastecimiento-de-agua-potable-para-la-ciudad-de-cuenca-en-su-etapa-de-operacion-y-mantenimiento.pdf?fbclid=IwAR3lM4GjvORMaoIQ9YxT2jXB6YvaIFAI9u122H4iTb1wB9LZ2KI7Ma6gI>

Planet, T. S., News for life. (2013). *Cloruro de potasio, otro gran problema para el medio ambiente*. <https://www.sustentartv.com/cloruro-de-potasio-otro-gran-problema-para-el-medio-ambiente/>

Plantas Acuario. (2010). *Las Daphnias en el acuario, cultivo, reproducción y alimentación*.
https://plantasacuariao.es/blog/19_daphnia-alimentacion

Quintuña, J. M., & Samaniego, M., (2016). *Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua potable de la planta potabilizadora del cantón Chordeleg*.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24847>

Sabadías, A. V., & Mancha, U. de C.-L. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. Universidad



- de Castilla-La Mancha. <https://books.google.com.ec/books?id=RbaC-wPWqjsC>
- Saporta, G. (2006). *Probabilidades, analyse des données et statistique*. Editions Technip. <https://books.google.com.ec/books?id=rprNjztQYPAC>
- Schlumberger. (2013). *Contaminación por calcio / Oilfield Glossary*. https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/calcium_contamination.aspx
- TULSMA. (2017). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua*. 50. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- Universidad de Murcia. (2017). *Resumen teórico*. https://www.um.es/estadempresa/multivarianteR/ACP/resumen_ACP.html
- Universidad de Oregon. (2014, mayo 20). *Magnesio*. Linus Pauling Institute. <https://lpi.oregonstate.edu/es/mic/minerales/magnesio>
- Vaquero, M. P. (Ed.). (2012). *Agua para la salud: Pasado, presente y futuro*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Vera, C. & Camilloni, I., (2015). *Ciencias Naturales El Ciclo del Agua*. 16.
- Villarreal Utrillas, M. J. (2004). *Alteraciones fisiológicas en el crustáceo Daphnia Magna por exposición a plaguicidas* [Doctoral, Universidad de Valencia]. https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/9488/villarreal.pdf;jsessionid=3A7E7D31B4A6BB7BEA86EA7B64134E4B?sequence=1&fbclid=IwAR3II-SdtEejWbVVG_mjmxZoNte9gORQAJeR87X879sBK4QJzTcrwHSKCMY
- WHO. (2007). *Health risk of heavy metals from long-range transboundary air pollution*. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0007/78649/E91044.pdf



ANEXOS

ANEXO 1. FIGURAS



Figura A1: a) Sulfato de calcio dihidratado, b) Cloruro de potasio, c) Bicarbonato de sodio y d) Sulfato de magnesio heptahidratado



Figura A2: Soluciones de 1 L.



Figura A3: Solución aforada y medición del pH.



Figura A4: Frascos de 5L, con la siembra de las daphnias magnas.



Figura A5: Ensayos 1, 2, 3 y 4.



Figura A6: Ensayo 5.



Figura A7: Ensayo 6 y 7.



Figura A8: Esterilización de los vasos de 50 ml.



Figura A9: Dicromato de potasio.



Figura A10: Soluciones de dicromato de potasio con sus réplicas y blancos.



Figura A11: Esterilización de los vasos de 50 ml.



Figura A12: Soluciones de cloruro de aluminio y muestras de agua.

ANEXO 2. REGISTRO DE TABLAS

Tabla de registro de mortandad de las *Daphnias Magnas* durante las tres semanas del ensayo.

	Concentración nominal	Número de organismos muertos día 1				Total	
		Réplicas	1	2	3		4
Semana 1	Blanco		0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm		0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm		0	0	0	0	0/40
	1.0 ppm		0	0	0	0	0/40
	2.5 ppm		0	0	0	0	0/40
	S. Yanuncay		0	0	0	0	0/40
	S. Machángara		0	0	0	0	0/40
	S. Culebrillas		0	0	0	0	0/40
	S. Tomebamba		0	0	0	0	0/40
			Número de organismos muertos día 2				
		Réplicas	1	2	3	4	
	Blanco		0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm		0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm		1	0	1	0	2/40
	1.0 ppm		2	3	2	1	8/40
	2.5 ppm		3	4	3	3	13/40
	S. Yanuncay		0	0	0	0	0/40
	S. Machángara		0	0	0	0	0/40
	S. Culebrillas		0	0	0	0	0/40



	S. Tomebamba	0	0	0	0	0/40
	Número de organismos muertos día 3					
	Réplicas	1	2	3	4	
	Blanco	0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm	0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm	1	1	2	2	6/40
	1.0 ppm	3	4	2	3	12/40
	2.5 ppm	5	4	5	4	18/40
	S. Yanuncay	1	0	0	0	1/40
	S. Machángara	0	0	0	0	0/40
	S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40
	S. Tomebamba	0	0	0	1	1/40
	Concentración nominal	Número de organismos muertos día 1				Total
	Réplicas	1	2	3	4	
	Blanco	0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm	0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm	2	3	2	2	9/40
	1.0 ppm	5	4	4	5	18/40
	2.5 ppm	6	5	7	5	23/40
	S. Yanuncay	1	0	1	0	2/40
	S. Machángara	0	0	0	0	0/40
	S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40
	S. Tomebamba	1	0	0	1	2/40
	Número de organismos muertos día 2					
	Réplicas	1	2	3	4	
	Blanco	0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm	0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm	3	3	2	3	11/40
	1.0 ppm	5	4	5	5	19/40
	2.5 ppm	6	7	8	6	27/40
	S. Yanuncay	1	0	1	0	2/40
	S. Machángara	0	0	0	0	0/40
	S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40
	S. Tomebamba	1	1	0	2	4/40
	Número de organismos muertos día 3					
	Réplicas	1	2	3	4	
	Blanco	0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm	0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm	3	4	3	3	13/40
	1.0 ppm	5	5	6	6	22/40
	2.5 ppm	8	9	8	7	31/40
	S. Yanuncay	1	1	1	0	3/40
	S. Machángara	0	0	0	0	0/40
	S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40

Semana 2



Semana 3	S. Tomebamba	2	2	1	2	7/40
	Concentración nominal	Número de organismos muertos día 1				Total
	Rélicas	1	2	3	4	
	Blanco	0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm	0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm	4	4	4	4	16/40
	1.0 ppm	7	5	6	7	25/40
	2.5 ppm	9	10	10	9	38/40
	S. Yanuncay	1	2	1	0	4/40
	S. Machángara	0	0	0	0	0/40
	S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40
	S. Tomebamba	2	2	1	2	7/40
	Número de organismos muertos día 2					
	Rélicas	1	2	3	4	
	Blanco	0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm	0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm	4	4	4	5	17/40
	1.0 ppm	7	6	7	7	26/40
	2.5 ppm	9	10	10	10	39/40
	S. Yanuncay	1	2	1	0	4/40
	S. Machángara	0	1	0	0	1/40
	S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40
	S. Tomebamba	3	3	2	2	10/40
	Número de organismos muertos día 3					
	Rélicas	1	2	3	4	
	Blanco	0	0	0	0	0/40
	0.1 ppm	0	0	0	0	0/40
	0.5 ppm	5	4	5	5	19/40
	1.0 ppm	8	6	7	7	28/40
	2.5 ppm	9	10	10	10	39/40
	S. Yanuncay	1	2	1	1	5/40
	S. Machángara	0	1	0	0	1/40
	S. Culebrillas	0	0	0	0	0/40
	S. Tomebamba	3	3	2	3	11/40



Tablas de resultados de los parámetros físico-químicos y de metales proporcionadas por la PUCE.

Sistemas	Fase	COD	pH	Cond.	Turb.	O. D	O.D %	Cl ₂	T
Machangara	Distribución	M.D.1	7.1	80	0	7.42	84.82	0.58	20.8
Machangara	Distribución	M.D.2	7.3	80	0	7.5	85.58	0.43	20.7
Machangara	Distribución	M.D.3	7.4	90	0	7.33	83.64	0	20.7
Machangara	Distribución	M.D.4	7.3	90	0	6.68	76.78	0.5	21.1
Machangara	Distribución	M.D.5	7.1	80	0	7.49	86.57	0.55	21.4
Yanuncay	Distribución	Y.D.1	7.2	110	2	7.07	82.01	0	21.6
Yanuncay	Distribución	Y.D.2	7	90	3	7.6	81.92	0.68	17.7
Yanuncay	Distribución	Y.D.3	6.8	60	0	7.22	78.74	0	18.3
Yanuncay	Distribución	Y.D.4	6.7	100	0	6.6	77.53	0.05	22.3
Yanuncay	Distribución	Y.D.5	6.7	110	8	7.52	93.25	0.41	25.4
Tomebamba	Distribución	T.D.1	7	100	0	8.07	90.21	0.34	19.6
Tomebamba	Distribución	T.D.2	6.8	100	0	7.43	85.09	0.3	20.9
Tomebamba	Distribución	T.D.3	6.9	90	4	7.55	83.92	0.4	19.3
Tomebamba	Distribución	T.D.4	6.8	100	0	7.54	84.29	0.45	19.6
Tomebamba	Distribución	T.D.5	6.7	100	0	7.89	84.22	0.71	17.2
Tixan_CAPT	Fuente	M.I.1	7.9	70	7	7.03	75.18	0.01	17.3
Tixan_CAPT	Fuente	M.I.2	7.9	70	7	7.03	75.18	0.01	17.3
Tixan_SALIDA-01	Tratada	M.O.1	7.5	80	0	7.55	78.04	0.98	15.6
Tixan_SALIDA-02	Tratada	M.O.2	7.3	90	1	7.5	78.79	1.15	16.4
Sustag_CAPT_01	Fuente	Y.I.1	7.7	40	0	7.55	77.76	0.02	15.4
Sustag_CAPT_02	Fuente	Y.I.2	7.6	40	7	7.63	77.1	0.04	14.5
Sustag_SALIDA-01	Tratada	Y.O.1	7	70	0	7.38	76.44	1.21	15.7
Sustag_SALIDA-02	Tratada	Y.O.2	6.9	60	0	7.47	77.37	0.93	15.7
El Cebollar_CAPT	Fuente	T.I.1	7	110	5	7.75	78.32	0	14.5
El Cebollar_CAPT	Fuente	T.I.2	7	110	5	7.75	78.32	0	14.5
El Cebollar_SALIDA	Tratada	T.O.1	6.8	150	0	7.57	78.41	0.79	15.7
El Cebollar_SALIDA	Tratada	T.O.2	6.8	150	0	7.57	78.41	0.79	15.7
San Pedro_CAPT	Fuente	C.I.1	7.3	80	0	6.53	68.59	0	16.4
San Pedro_CAPT	Fuente	C.I.2	7.3	80	0	6.53	68.59	0	16.4
San Pedro_SALIDA	Tratada	C.O.1	7.1	80	0	7.55	78.67	0.55	16
San Pedro_SALIDA	Tratada	C.O.2	7.1	80	0	7.55	78.67	0.55	16
Ucubamba_ANTES	Fuente	U.I.1	7.1	540	166	4.19	62.5	0	20.4
Ucubamba_ANTES	Fuente	U.I.2	7.1	540	166	4.19	62.5	0	20.4
Ucubamba_DESPUES	Tratada	U.O.1	8	550	67	13.5	213.9	0	23.6
Ucubamba_DESPUES	Tratada	U.O.2	8	550	67	13.5	213.9	0	23.6



Sistema	Fase	CO															
		D	Al	As	Ba	Ca	Cd	Co	Cu	Cr	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	Hg
Machangara	Trata	M.D	0.004	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.03	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	da	.1	2	00	92	47	00	00	00	00	55	55	0	00	00	85	00
Machangara	Trata	M.D	0.004	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.02	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00
	da	.2	2	00	96	35	00	00	00	00	79	14	0	00	00	32	00
Machangara	Trata	M.D	0.004	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.000	0.00	0.00	0.03	0.00
	da	.3	2	00	91	81	00	00	00	00	00	31	0	00	00	32	00
Machangara	Trata	M.D	0.004	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.69	0.01	0.000	0.00	0.00	0.02	0.00
	da	.4	2	00	46	45	00	00	11	00	93	76	0	00	00	90	00
Machangara	Trata	M.D	0.004	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.12	0.01	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00	
	da	.5	2	00	00	96	00	00	00	40	77	0	00	00	04	00	
Yanuncay	Trata	Y.D.	0.004	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.59	0.00
	da	1	2	00	70	39	00	00	00	00	63	0	00	00	61	00	
Yanuncay	Trata	Y.D.	0.004	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	da	2	2	00	42	54	00	00	00	00	40	0	00	00	57	00	
Yanuncay	Trata	Y.D.	0.004	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.000	0.00	0.00	0.02	0.00	
	da	3	2	00	04	08	00	00	00	84	36	0	00	00	56	00	
Yanuncay	Trata	Y.D.	0.004	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00	0.000	0.00	0.00	0.02	0.00	
	da	4	2	00	31	45	00	00	00	93	31	0	00	00	96	00	
Yanuncay	Trata	Y.D.	0.004	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.000	0.00	0.00	0.02	0.00	
	da	5	2	00	76	22	00	00	00	47	24	0	00	00	70	00	
Tomebamba	Trata	T.D.	0.011	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	
	da	1	6	00	81	19	00	00	00	00	35	0	00	00	70	00	
Tomebamba	Trata	T.D.	0.011	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00	0.000	0.00	0.00	0.10	0.00	
	da	2	6	00	71	93	00	00	00	67	31	0	00	00	75	00	
Tomebamba	Trata	T.D.	0.011	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00	
	da	3	6	00	62	19	00	00	00	49	26	0	00	00	58	00	
Tomebamba	Trata	T.D.	0.011	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	
	da	4	6	00	55	80	00	00	00	00	23	0	00	00	46	00	
Tomebamba	Trata	T.D.	0.011	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.04	0.00	
	da	5	6	00	61	40	00	00	00	00	70	0	00	00	22	00	
Tixan_CAPT	Fuent	M.I.	0.000	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.30	0.08	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00	
	e	1	0	00	83	51	00	00	00	53	74	0	00	00	12	00	
Tixan_CAPT	Fuent	M.I.	0.000	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00	
	e	2	0	00	83	13	00	00	00	00	23	0	00	00	10	00	
Tixan_SALIDA-01	Trata	M.O	0.004	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.27	0.11	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	
	da	.1	2	00	87	92	00	00	00	00	11	0	00	00	61	00	



Tixan_SALIDA-02	Tratada	M.O.2	0.004	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00
	Fuente		0.000	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.01	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00
Sustag_CAPT_01	Fuente	Y.I.1	0	00	31	68	00	00	00	00	93	19	0	00	00	38	00
	Fuente		0.000	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.01	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
Sustag_CAPT_02	Fuente	Y.I.2	0	00	20	54	00	00	00	00	44	14	0	00	00	62	00
	Fuente		0.000	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.01	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
Sustag_SALIDA-01	Tratada	Y.O.1	0.004	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00
	Fuente		0.000	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.02	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00
Sustag_SALIDA-02	Tratada	Y.O.2	0.004	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.02	0.000	0.00	0.00	0.01	0.00
	Fuente		0.000	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.01	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
El Cebollar_CAPT	Fuente	T.I.1	0	00	81	83	00	00	00	00	73	03	0	00	00	47	00
	Fuente		0.000	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.01	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
El Cebollar_CAPT	Fuente	T.I.2	0	00	00	59	00	00	00	00	72	12	0	00	00	00	00
	Fuente		0.000	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.01	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
El Cebollar_SALIDA	Tratada	T.O.1	0.011	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fuente		0.000	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
El Cebollar_SALIDA	Tratada	T.O.2	0.011	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fuente		0.000	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
San Pedro_CAPT	Fuente	C.I.1	0	00	80	93	00	00	00	00	33	61	0	00	00	00	00
	Fuente		0.000	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
San Pedro_CAPT	Fuente	C.I.2	0	00	86	10	00	00	00	00	00	61	0	00	00	00	00
	Fuente		0.000	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
San Pedro_SALIDA	Tratada	C.O.1	0.000	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fuente		0.000	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
San Pedro_SALIDA	Tratada	C.O.2	0.000	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fuente		3.383	0.00	0.10	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	1.76	0.35	39.39	0.00	0.00	0.15	0.00
Ucubamba_ANTES	Fuente	U.I.1	0	00	77	63	00	00	50	00	34	68	31	00	00	31	00
	Fuente		3.703	0.00	0.12	0.04	0.00	0.00	0.03	0.01	1.41	0.37	39.58	0.00	0.00	0.17	0.00
Ucubamba_ANTES	Fuente	U.I.2	2	00	13	74	00	00	35	04	49	34	41	00	00	32	00
	Fuente		1782.	0.00	83.1	52.1	0.00	0.00	23.6	0.00	252.	0.00	0.00	0.00	0.00	44.2	0.00
Ucubamba_DESPUES	Tratada	U.O.1	72	0	2	2	0	0	2	8.63	0.89	87	36.55	0	0	2	0
	Fuente		1545.	0.00	78.8	46.0	0.00	0.00	11.5	15.2	247.	0.00	0.00	0.00	0.00	40.3	0.00
Ucubamba_DESPUES	Tratada	U.O.2	61	0	0	5	0	0	8	1	1.39	54	35.40	0	0	3	0

COD:codificación de la muestra.

Cond.: conductividad

Turb: turbiedad



Tabla de concentraciones del cloruro de aluminio

Concentración	Gramos de sal Al_2Cl_3
0.1 ppm	0.002 mg
0.5 ppm	0.010 mg
1.0 ppm	0.020 mg
2.5 ppm	0.050 mg

Ejemplo de cálculo de HPI

$$Q_i = \frac{[M_i - I_i]}{[S_i - I_i]} \times 100$$

$$Q_i = \frac{[0.34 - 0]}{[0.10 - 0]} \times 100 = 340.7$$

$$W_i = \frac{1}{S_i}$$



$$W_i = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ l/mg}$$

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$HPI = \frac{3407 + 1.57 + 0.11 + 34 + 187}{10 + 100 + 0.77 + 333.33 + 0.5 + 20 + 3.33 + 10 + 0.01 + 14.29 + 100 + 10 + 166.67}$$

$$HPI = 4.72$$



Universidad de Cuenca