

**DETERMINACIÓN DE LA TASA CINÉTICA DE REAIREACIÓN MEDIANTE LA
EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA DEL
RÍO MOLINO EN SU RECORRIDO POR LA CIUDAD DE POPAYÁN**



PAUL SANTIAGO HOYOS MARTÍNEZ

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
PASANTÍA
POPAYÁN, 2018**

**DETERMINACIÓN DE LA TASA CINÉTICA DE REAIREACIÓN MEDIANTE LA
EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA DEL
RÍO MOLINO EN SU RECORRIDO POR LA CIUDAD DE POPAYÁN**



PAUL SANTIAGO HOYOS MARTÍNEZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

DIRECTOR

ING. RONALD EDINSON CERÓN

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

PASANTÍA

POPAYÁN, 2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y jurados del trabajo de grado, modalidad pasantía: “DETERMINACIÓN DE LA TASA CINÉTICA DE REAIREACIÓN MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA DEL RÍO MOLINO EN SU RECORRIDO POR LA CIUDAD DE POPAYÁN” realizado por PAUL SANTIAGO HOYOS MARTÍNEZ. Una vez revisado el informe final y aprobada la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar al título profesional de Ingeniero Ambiental y Sanitario.

FIRMA DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

DEDICATORIA

Este logro académico es la culminación satisfactoria de una etapa grata de mi vida, donde se demuestra que la perseverancia es esencial para convertir los objetivos de vida en realidad. En este propósito siempre existieron factores que confluyeron a favor y me llevaron a hacer realidad mi sueño.

Inicialmente a Dios por brindarme sabiduría acompañada de actitud, los cuales salieron a flote en momentos de dificultad. A la memoria de mi padre Elías Edgar Hoyos Q.E.P.D, que me enseñó las cosas básicas de la vida y que al final son las que forjan nuestro destino. A mi madre María Felicitas Martínez que fue quien siempre creyó en mí, es sinónimo de incondicionalidad y nobleza. A mis hermanos Denise Ibeth Hoyos Martínez, Darwin Eliutt Hoyos Martínez y Catherine Dayana Hoyos Martínez que son el legado y llevan impronta de superación en su alma. Y finalmente al ser que está en camino, y me enseñará el significado del amor más puro que podemos sentir, mi hija Isabella Hoyos Paz, este logro es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

El Acueducto y Alcantarillado de Popayán abrió sus puertas para que se realizara el presente trabajo de grado, la División Ambiental en representación de su jefe Liliana Recaman Mejía brindó la logística necesaria para cumplir los objetivos de la investigación. El apoyo consecuente del director organizacional, el Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga permitió culminar la pasantía de la mejor manera, gracias por su idoneidad como profesionales.

La Corporación Universitaria Autónoma del Cauca apoyando a sus futuros egresados profesionales dispuso al Ingeniero Ronald Edinson Cerón como Director de mi trabajo de grado, el demostró su profesionalismo mientras se moldeaba la tesis y siempre dispuso su tiempo para plasmar mis ideas con claridad en el documento, gracias por la colaboración.

Al Químico Darwin Eliutt Hoyos Martínez por colaborar con sus asesorías permanentes y brindarle el enfoque adecuado a la investigación.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPITULO I: PROBLEMA	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. JUSTIFICACIÓN	17
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. Objetivo general.....	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES	20
2.1. ANTECEDENTES	20
2.1.1. Parámetros fisicoquímicos del rio Molino	20
2.1.2. Tasa cinética de reaireación	20
2.1.2.1. Métodos predictivos (semi – empíricos).....	21
2.1.2.2. Métodos predictivos (empíricos).....	21
2.1.2.3. Métodos experimentales	22
2.2. BASES TEÓRICAS	22
2.2.1. Características del área de estudio.....	22
2.2.2. Características de muestreo a una fuente hídrica	27
2.2.3. Contaminación hídrica	32
2.2.4. Definición de parámetros fisicoquímicos medidos.....	33
2.2.5. Medición de parámetros fisicoquímicos	41
2.2.6. Aforo del caudal por el método área velocidad	42
2.2.7. Autodepuración de una fuente hídrica.....	46
2.2.7.1. Tasa cinética de desoxigenación.....	47
2.2.7.2. Tasa cinética de nitrificación.....	48
2.2.7.3. Tasa cinética de sedimentación	48
2.2.7.4. Tasa cinética de decaimiento de patógenos.....	48
2.2.7.5. Tasa cinética de reaireación.....	49
2.2.7.5.1. Tasas de reaireación semi empíricas y empíricas.....	50

2.2.7.5.2. Tasa de reaireación experimental	50
2.3. BASES LEGALES	52
CAPITULO III: METODOLOGÍA	53
3.1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	53
3.1.1. Descripción sub- cuenca rio Molino	53
3.1.2. Monitoreo sobre el río Molino.....	54
3.1.3. Selección y ubicación de las estaciones de muestreo.....	54
3.1.4. Tipo de muestreo y frecuencia de muestreo	56
3.2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS MEDIDOS	56
3.3. TASAS DE REAIREACION PREDICTIVAS CALCULADAS	58
3.3.1. Variables hidráulicas.....	58
3.3.2. Tasa de reaireación predictiva	62
3.3.2.1. Tasa de reaireación por Tsivoglou y Neal.....	62
3.3.2.2. Tasa de reaireación por O´Connor y Dobbins.....	63
3.3.2.3. Tasa de reaireación por Churchill	64
3.3.2.4. Tasa de reaireación por Owens y Gibbs.....	64
3.3.2.5. Corrección de Tasa de reaireación para T° hídrica de campo	64
3.4. TASA DE REAIREACION EXPERIMENTAL	65
3.5. DESARROLLO ESTADÍSTICO.	65
CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
4.1. RESULTADOS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	66
4.1.1. Resultados de parámetros fisicoquímicos de campo	66
4.1.2. Análisis de resultados parámetros fisicoquímicos de campo.....	67
4.1.3. Resultados de parámetros fisicoquímicos de laboratorio	74
4.1.4. Análisis de resultados parámetros fisicoquímicos de laboratorio.....	75
4.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE TASAS DE REAIREACION PREDICTIVA	83
4.2.1. Estación de muestreo uno, río Molino en Pueblillo.....	83
4.2.1.1. Variables hidráulicas río Molino en Pueblillo.....	83
4.2.1.2. Resultados de Ka predictivas río Molino en Pueblillo.....	84
4.2.1.3. Análisis de resultados Ka predictivas río Molino en Pueblillo	84
4.2.2. Estación de muestreo dos, río Molino en el barrio centro.....	85

4.2.2.1. Variables Hidráulicas río Molino en barrio Centro.....	85
4.2.2.2. Resultados de Ka predictivas río Molino en barrio Centro	86
4.2.2.3. Análisis de resultados Ka predictivas río Molino en el barrio Centro	86
4.2.3. Estación de muestreo tres, río Molino en el barrio Junín.....	87
4.2.3.1. Variables hidráulicas río Molino en el barrio Junín.....	87
4.2.3.2. Resultados de Ka predictivas río Molino en barrio Junín	88
4.2.3.3. Análisis de resultados Ka predictivas río Molino en el barrio Junín	88
4.2.4. Análisis estadístico a las Ka obtenidas con métodos predictivos en las estaciones muestreadas.....	89
4.3. RESULTADOS DE TASA DE REAIREACION EXPERIMENTAL	90
4.3.1. Resultados de Ka experimental en las estaciones de muestreo.....	90
4.3.2. Análisis de resultados de Ka experimental en las estaciones de muestreo.....	90
4.3.3. Análisis estadístico para Ka predictivas respecto a las Ka experimental	94
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
5.1. CONCLUSIONES.....	96
5.2. RECOMENDACIONES	97
IV. BIBLIOGRAFIA	98
ANEXOS	102

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Localización de la subcuenca del río Molino en el Cauca.	24
Imagen 2. Densidad de la población por veredas, corregimientos y zona urbana.	26
Imagen 3. Vista de la sección transversal de un río con los puntos de observación.	43
Imagen 4. Figuras geométricas necesarias para obtener el área en la fuente hídrica.	44
Imagen 5. Ciclo de autodepuración.	47
Imagen 6. Subcuenca del río Molino en Popayán.	54
Imagen 7. Estaciones de muestreo en el río Molino.	55
Imagen 8. Vista del seccionamiento de la fuente hídrica a muestrear.	60
Imagen 9. Velocidad media en la sección.	61
Imagen 10. Caudales parciales y caudal total.	62

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultados de temperatura hídrica Vs Norma de preservación flora y fauna.....	67
Gráfica 2. Resultados de pH Vs Norma para preservación flora y fauna del agua.....	68
Gráfica 3. Resultados de Conductividad en el río Molino.....	69
Gráfica 4. Resultados de Oxígeno Disuelto in situ, saturación de oxígeno y norma para preservación de flora y fauna en el agua.....	71
Gráfica 5. Resultados de Porcentaje de saturación de Oxígeno Vs Norma para preservación flora y fauna del agua.....	73
Gráfica 6. Resultados de color aparente en las estaciones de muestreo.....	75
Gráfica 7. Resultados de turbiedad en las estaciones de muestreo.....	76
Gráfica 8. Resultados de DBO ₅ expresados en carga contaminante Vs Porcentaje de saturación de O ₂ en las estaciones de muestreo.....	77
Gráfica 9. Resultados de sólidos disueltos totales en las estaciones de muestreo.....	79
Gráfica 10. Resultados de Nitratos en las estaciones de muestreo.....	80
Gráfica 11. Resultados de Nitritos en las estaciones de muestreo.....	81
Gráfica 12. Resultados de Dureza total en las estaciones de muestreo.....	82
Gráfica 13. Valores de Oxígeno disuelto en el tramo de la estación uno.....	91
Gráfica 14. Valores de Oxígeno disuelto en el tramo de la estación dos.....	92
Gráfica 15. Valores de Oxígeno disuelto en el tramo de la estación tres.....	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Delimitación del río Molino, municipio de Popayán.	25
Tabla 2. Requerimientos para la conservación y almacenamiento de muestras de agua.....	31
Tabla 3. Fundamentos generales para la gestión del recurso hídrico.	52
Tabla 4. Estaciones de muestreo y sus coordenadas.	56
Tabla 5. Variables fisicoquímicas medidas, método estándar y unidades de medición.	57
Tabla 6. Variables hidráulicas necesarias para tasa de reaireación predictiva.	58
Tabla 7. Ancho recomendado de la franja.	59
Tabla 8. Ecuaciones de reaireación para ríos con poca pendiente.	63
Tabla 9. Variables medidas in situ.	66
Tabla 10. Valores promedio de OD en cada estación de muestreo	70
Tabla 11. Variables medidas en laboratorio.	74
Tabla 12. DBO ₅ expresada en valores de carga contaminante.	77
Tabla 13. Variables hidráulicas en la estación de muestreo uno.....	83
Tabla 14. Tasas de reaireación predictivas en la estación de muestreo uno	84
Tabla 15. Variables hidráulicas en la estación de muestreo dos.....	85
Tabla 16. Tasas de reaireación predictivas en la estación de muestreo dos	86
Tabla 17. Variables hidráulicas en la estación de muestreo tres.....	87
Tabla 18. Tasas de reaireación predictivas en la estación de muestreo tres	88
Tabla 19. Resultados de Ka predictivas en las tres estaciones de muestreo.....	89
Tabla 20. Tasas de reaireación experimentales en las estaciones de muestreo ..	90
Tabla 21. Resultados de Ka predictivas Vs Ka experimentales en las estaciones muestreadas.	94

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Parámetros fisicoquímicos del río Molino en Popayán (2005 - 2014) ..	102
Anexo 2. Mortalidad por (IRA) y (EDA) en menores de cinco años en Cauca	111
Anexo 3. Resultados de parámetros fisicoquímicos en el año 2016.	113
Anexo 4. Ecuaciones predictivas de K_a a partir de sus parámetros hidráulicos.	115
Anexo 5. Resultados de parámetros fisicoquímicos en el año 2018.	118
Anexo 6. Metodología para hallar variables Hidráulicas, K_a predictivas y experimental en las estaciones de muestreo.	122
Anexo 7. Pruebas estadísticas no paramétricas de Moses.	144
Anexo 8. Imágenes del proceso metodológico.	146

RESUMEN

El trabajo de investigación determinó la tasa cinética de reaireación del río Molino mientras recorre el sector poblado de la ciudad de Popayán Colombia, evaluando las características fisicoquímicas de la calidad del agua. Inicialmente se realizó un recorrido sobre el río, desde un punto alto respecto a la interacción geográfica con la ciudad, hasta la parte baja justo antes de unirse el río Molino con el río Ejido en el área urbana. Se identificaron y localizaron tres estaciones de muestreo que son: La vereda Pueblillo, el barrio Centro y finalmente el barrio Junín, en cada estación se efectuó un análisis fisicoquímico in situ, además se extrajo una muestra simple y se midieron las variables hidráulicas en la sección. Con la información del análisis fisicoquímico se halló la tasa de reaireación experimental con el método del balance de oxígeno en estado estable, mientras que los datos hidráulicos se utilizaron en la obtención de la tasa de reaireación predictiva con las fórmulas de Tsivoglou, O'Connor y Owens.

Los resultados de la caracterización fisicoquímica muestran que el agua de este río cumple con la normativa para la conservación de flora y fauna en una fuente hídrica de temperatura cálida.

De las ecuaciones predictivas de tasa de reaireación (K_a) por Tsivoglou, O'Connor y Owens la que brinda los valores de K_a reales a las características hidráulicas medidas en el río Molino es la de Tsivoglou.

Por otro lado, al obtener los datos de K_a predictiva hallados con el método de Tsivoglou y compararlos con los datos de K_a experimental, se concluye que no hay diferencias significativas en los cálculos estadísticos, ya que los resultados K_a predictiva tiene una significancia de 0,8 respecto con el dato experimental, lo que valida la utilización de la K_a predictiva.

Palabras clave: Tasa cinética de reaireación, análisis fisicoquímico, muestreo simple, variables hidráulicas.

ABSTRACT

The work of investigation determined the kinetics rate of re aeration of the Molino river while it go through the populated sector of Popayán, Colombia, evaluating the physico-chemical characteristics of the quality of the water. In the begin, it was made a route around the river, starting from a high point respect to the geographical interaction with the city until the bottom, right before joining the Molino river with the Ejido river in the urban área. It was identified and located three sampling stations that are: The sidewalk Pueblillo, the Centro neighborhood and finally the Junin neighborhood, at each station was made a physicochemical analysis in situ, although it was extracted a simple sample and hydraulic variables were measured in the section. With the information of the physicochemical analysis was found the rate of experimental reaeration with the balance sheet method of oxygen in stable state, whereas the hydraulic data was used to obtain the predictive re aeration rate with the formulas of Tsivoglov, O'Connor and Owens.

The results of the physicochemical characterization showed that the water of this river is in compliance with the regulations for the conservation of flora and fauna in a water source of warm temperature.

Of the predictive equations of the re aeration rate (K_a) by Tsivoglou, O'Connor and Owens which provides the values of K_a real to the hydraulic characteristics measures in the Molino river is the Tsivoglou.

On the other hand, to obtain data on predictive K_a found with the Tsivoglou method and compare its with the experimental data of K_a , it is concluded that there are no significant differences in the calculations, since the results K_a predictive has a significance of 0.8 with respect to the experimental data, which validates the use of the predictive K_a .

Key words: kinetic rate of reaeration rates, physicochemical analysis, simple sampling, hydraulic variables.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo demográfico y el crecimiento económico en Colombia cada vez son mayores, de igual manera se potencializa la demanda de los recursos naturales necesarios para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes. Análogamente, el país cuenta con unas cualidades medio ambientales destacadas, debido a su ubicación geográfica es uno de los países con mayor biodiversidad a nivel mundial, tiene una amplia variedad de ecosistemas donde se encuentran recursos no renovables. Como es un país en pleno desarrollo se caracteriza por realizar un consumo desmesurado de sus recursos naturales renovables y no renovables, lo cual crea consecuencias perjudiciales desde el punto de vista social hasta medio ambiental, pues cada vez se hace más evidente la ruptura en el equilibrio ecológico.

En este contexto, las entidades públicas y la ciudadanía se encuentran en una problemática constante para fomentar la conservación del medio ambiente; inquietud que está reflejada en las políticas públicas y proyectos de desarrollo, los cuales toman un enfoque mayor en los conceptos de desarrollo sostenible, protección a la biodiversidad y manejo de la contaminación. Sin embargo, los resultados no siempre son favorables en la conservación del medio ambiente, pues se presentan anomalías relacionadas con la extinción de especies de flora y fauna, la degradación de espacios naturales, la explotación económica desmesurada de los recursos naturales, y el incremento en los niveles de contaminación del recurso hídrico. Frente a este último foco, la incomprensión sobre el uso racional y la importancia del recurso, la práctica de procesos productivos impertinentes por parte de los ciudadanos, unido a la posible formulación de políticas ambientales erróneas, es presumiblemente la causa de los graves problemas de contaminación que padece el recurso hídrico. [1]

Desde un punto de vista regional, la ciudad de Popayán es la urbe con mayor desarrollo demográfico en el departamento del Cauca, esto eleva el consumo de los recursos naturales hasta inducir la decadencia en la calidad medio ambiental, como

lo padecen las fuentes hídricas circundantes, pues sus aguas se intervienen directamente por los vertimientos de la industria, residencias, instituciones y el comercio. Este es el caso de la subcuenca del río Molino, la cual se encuentra entrelazada con la zona urbana de Popayán y en el presente trabajo de investigación se aporta información que fomenta la preservación del recurso hídrico por parte de las entidades gubernamentales encargadas de la subcuenca, mediante la obtención de la tasa cinética de reaireación del río, que se halla mediante métodos predictivos y experimentales. Esta tasa cinética de reaireación unida a las demás tasas cinéticas como son: desoxigenación, decaimiento de patógenos, nitrificación y sedimentación, permiten modelar la fuente hídrica, lo cual es fundamental para predecir el comportamiento de un cuerpo de agua, dentro de una franja de incertezas, inherente al conocimiento técnico científico, pretendiendo explicar las causas y efectos de los procesos del medio ambiente. Así se aprecia el nivel de autodepuración del río una vez sea intervenido antrópicamente.

CAPITULO I: PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el desarrollo habitual del ser humano el recurso hídrico es vital para su subsistencia. El crecimiento demográfico y con ello la industrialización potencializa la demanda del recurso hídrico necesario para satisfacer las necesidades básicas de los individuos. Dichos procesos de desarrollo y sostenimiento han alterado la dinámica normal de los cuerpos de agua, con ello causando anomalías al factor biótico, abiótico y el ecosistema [2].

En el ámbito nacional, Colombia es un país que goza de grandes reservas hídricas, aun así padece la problemática global en cuanto a contaminación de agua, ya que su proceso de industrialización aún no logra estabilizar el desarrollo demográfico con el ecosistema, los problemas radican en la insuficiencia o inexistencia de sistemas aptos para tratar las aguas residuales de tipo industrial o doméstica. Las fuentes lóxicas circundantes a la urbe son intervenidas directamente, sin tratamiento alguno alterando negativamente su dinámica poblacional [2].

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible indica en su documento, plan nacional de manejo de aguas residuales municipales (PMAR) que el país presenta atrasos significativos en materia de tratamiento de aguas antrópicamente intervenidas, pues se estima que solo son tratados el 12 % de las aguas residuales generadas en la zona urbana [3]. La ciudad de Popayán hace parte del porcentaje de zonas urbanas que no cuentan con un sistema de tratamiento para agua residual (STAR).

Una de las fuentes hídricas con mayor impacto antropogénico es el río Molino, ya que está entrelazado con cuatro comunas urbanas y atraviesa gran parte de la ciudad en sentido Norte a Sur – Occidente [4], en esta trayectoria adquiere un alto nivel de contaminación que deteriora la calidad en el factor biótico y abiótico circundante, sin dejar atrás las posibles enfermedades que pueden contraer los

seres humanos que están expuesto a la ribera del río. La Organización mundial de la salud (OMS) estima que hasta un 88% de las enfermedades diarreicas son causadas por un mal tratamiento a las aguas de consumo, y aguas servidas. Además, 1.8 millones de personas mueren anualmente a consecuencia de estas enfermedades, incluyendo más de 6.000 niños, cuya edad se halla debajo de los cinco años [5].

Como distintivo que potencializa la problemática está el incremento poblacional de la ciudad, que según el departamento nacional de estadística (DANE) en el año 1985 la población era de 165.304 habitantes, mientras que para el año 2018 tiene una proyección de 284.737 personas [6]. Este valor indica que incrementó la población en 119.433 individuos en los últimos treinta y tres años, esta cifra poblacional da una importante apreciación partiendo de que existe una relación directamente proporcional entre consumo de agua y presencia de vertimientos expulsados en la fuente hídrica.

El crecimiento poblacional ya genera contaminación hídrica sobre el río Molino, como se indica en los análisis fisicoquímicos y microbiológicos ejecutados por la División de Ambiental del Acueducto y Alcantarillado de Popayán desde el año 2005 hasta 2014 [7] (Anexo 1).

Las características existentes en el río Molino requieren de la ejecución de técnicas que minimicen la alteración antrópica, por ende las entidades municipales promueven la investigación por medio de sus planes de gestión ambiental [8], este es el caso de la modelación de la fuente lítica con el método QUAL2K, en la modelación se hacen necesarias las tasas cinéticas del río Molino y dentro de ellas, la tasa de reaireación que es necesaria para establecer que capacidad tiene el río para autodepurarse y así mismo dar datos cuantitativos que potencialicen la realización de la planta de tratamiento para aguas residuales (PTAR) que es la solución palpable a las molestias que padecen los habitantes de Popayán en cuestión de contaminación hídrica.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El deterioro ambiental de la cuenca hidrográfica del río Molino se hace evidente mientras recorre la ciudad de Popayán [7] (Anexo 1), este deterioro ambiental ya incide en la calidad de vida de los habitantes Payaneses, pues según la secretaría de salud municipal en el año 2016 se han presentado casos de mortalidad por infecciones respiratorias agudas (IRA) y enfermedades diarreicas agudas (EDA) en población infantil, los cuales pueden estar asociados con la mala calidad del recurso hídrico que circunda a los habitantes de la capital Caucana [9]. (Anexo 2)

Por esta razón las entidades gubernamentales encargadas de la sostenibilidad del río Molino tienen el compromiso de ejecutar actividades destinadas al manejo integral de un sistema ambiental. En este contexto la Corporación Autónoma regional del Cauca (CRC) recopila información de variables físicas y químicas en la actualidad, con el fin de conocer los niveles de contaminación causados sobre el río Molino por los vertimientos expulsados por los habitantes en el año 2016 [10] (Anexo 3). Esto permitirá comparar los resultados con la norma de la calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua y así corroborar que se sigue presentando problemas de contaminación [11].

De igual manera existen otros planes de gestión ambiental que necesitan apoyo, como es la Modelación del río Molino con el método QUAL2K [8], este plan es necesario para conocer cómo se puede comportar el río en sus características hídricas a futuro, dentro de una franja de incertezas, inherente al conocimiento técnico científico, pretendiendo explicar las causas y efectos de los procesos del medio ambiente como es el caso de la autodepuración del material vertido en la fuente [12].

La tasa de reaeración es un parámetro necesario para la modelación de una fuente hídrica, el cual no ha sido calculado en el río Molino y en la presente investigación se obtendrá mediante métodos predictivos recomendados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) [13]. Además se obtiene el valor de la tasa de reaeración experimental con los valores de oxígeno disuelto derivados de la

caracterización fisicoquímica [14]. Al final se realiza una comparación entre la tasa de reaireación experimental y la misma obtenida con métodos predictivos, esto permite deducir cual es la ecuación predictiva que se adapta mejor a las características que tiene el río Molino.

Conjuntamente, existen otros planes de desarrollo municipal que están relacionados con el actual trabajo de investigación y son emitidos por las entidades gubernamentales:

En el componente agua potable y saneamiento básico, se implementará el programa uno que es: Plan de saneamiento y manejo de vertimientos.

Donde los productos asociados al programa son: La construcción de un colector que transporta el agua del río Molino, el cual se une a un colector que transporta el agua que proviene del río Ejido y finalmente estos se unen a un emisario principal que es el construido en el río Cauca. Análogamente se realiza la caracterización del agua del río Molino para monitorear los vertimientos en diferentes épocas del año, en este paraje se hace el aporte con la presente investigación [8].

El programa dos se refiere a la construcción de la planta de tratamiento para agua residual (PTAR). Esta planta se construye en dos etapas, en la etapa uno se planea tratar hasta 129 L/seg de agua. Esta etapa incluye la construcción de sistemas preliminares, dos reactores, dos sedimentadores y dos lechos de secado. En la etapa dos se proyecta la construcción de más sedimentadores y lechos de secado [8], en esta investigación se aportan datos a las entidades reguladores del río Molino, los cuales fomentarán una mejoría en las características de la calidad del agua del río a futuro, pensando en el bienestar de los individuos que de una u otra manera están interactuando con el río, como también el factor abiótico que es intervenido.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Determinar la tasa de reaeración mediante la evaluación de las características fisicoquímicas del agua del río Molino en su recorrido por la ciudad de Popayán.

1.3.2. Objetivos específicos

- Medir las características fisicoquímicas del agua del río Molino.
- Determinar la tasa de reaeración mediante métodos predictivos.
- Validar los métodos predictivos mediante los valores de Oxígeno disuelto de la caracterización fisicoquímica.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Parámetros fisicoquímicos del río Molino

El Acueducto y Alcantarillado de Popayán E.S.A. E.S.P. en su división de ambiental propende metodologías para la conservación del río Molino, pues ejecuta actividades como: recopilar una línea base de información de variables físicas y químicas durante los últimos años (2005 – 2014) (Anexo 1), con el fin de conocer el nivel de contaminación causado por los vertimientos expulsados sobre el río [7]. En esta investigación se actualiza la información de la contaminación hídrica sobre este río para el mes de febrero del año 2018.

Además existen planes de gestión ambiental, como es la Modelación del río Molino con el método QUAL2K [8], este plan es necesario para conocer cómo se puede comportar el río en sus características hídricas a futuro, pretendiendo explicar las causas y efectos de los procesos del medio ambiente como es el caso de la autodepuración del material vertido en la fuente. Uno de los principales autodepuradores es la tasa de reaeración ya que permite airear el agua contaminada con el oxígeno presente en la atmósfera [12].

2.1.2. Tasa cinética de reaeración

La tasa de reaeración a través del tiempo se obtuvo de esta manera:

Durante el año 1925 Streeter y Phelps, ejecutaron avances en la obtención de las tasas de reaeración de los ríos, convirtiéndose en los pioneros en hallar la tasa indirectamente, usando un valor dado de Oxígeno Disuelto (OD) y los datos de laboratorio de las tasas de desoxigenación (K_d). Esta tasa K_d difiere considerablemente de los valores observados en los ríos, por lo que se considera una aproximación inadecuada [14].

Las ecuaciones de tasas de reaeración predictivas son desarrolladas siguiendo dos aproximaciones:

- **Formulas predictivas semi – empíricas.**
- **Formulas predictivas empíricas.**

2.1.2.1. Métodos predictivos (semi – empíricos)

El primer ensayo en la realización de ecuaciones predictivas de K_a lo ejecutaron O'Connor y Dobbins en 1956 utilizando un modelo de transferencia de masas [15]. El valor de K_a se expresaba como una función del coeficiente de difusión molecular, la profundidad media del agua y la tasa de renovación superficial. Con ayuda de información hidráulica del río Mississippi, deducieron que la tasa de renovación superficial dependía de la velocidad media en el río y la profundidad media del agua [14]. Además existen fórmulas semi empíricas alternativas que desarrollaron: Krenkel y Orlob en 1962 [16], Fok y Stall en 1972 [17], Tsvoglou y Wallace en 1972 [18] y otros. Siempre existiendo similitud en las ecuaciones, estos últimos autores utilizaron la tasa de renovación superficial como una función del gradiente de la energía de la corriente de flujo [14].

2.1.2.2. Métodos predictivos (empíricos)

Churchill en 1962 [19], Owens y Gibbs en 1964 [20] y Langbein y Durum en 1967 [21] y otros, formularon ecuaciones empíricas de K_a . Ellos realizaron pruebas en ríos con características topográficas diferentes e identificaron que la tasa de reaeración está en función de dos propiedades hidráulicas, como es la velocidad media en el tramo de estudio y la profundidad media del mismo. Mediante un análisis de regresión usando datos de laboratorio y campo [14].

Estas son las fórmulas predictivas de K_a realizadas por diferentes autores hasta la actualidad (Anexo 4).

Las fórmulas de K_a están enunciadas para una temperatura de 20°C, entonces Arrhenius desarrolló una fórmula para adaptar la K_a a la temperatura hídrica de campo, obtenida con una constante (x) = 1.024 [14]. Esta fórmula de adaptación puede ser aplicada para K_a empíricas y semi empíricas.

2.1.2.3. Métodos experimentales

La tasa de reaireación también puede hallarse de manera no predictiva o experimental usando estos cuatro métodos: La inyección de sustancias volátiles (trazadores), la desoxigenación con sulfito de sodio, la oscilación diurna del oxígeno y el balance de oxígeno en estado estable. Los últimos tres métodos hallan la tasa de reaireación mediante un cálculo basado en un modelo de balances de masas y en medidas de Oxígeno Disuelto in situ. [14].

Una de las aplicaciones más recientes de esta metodología, fue realizada por Holguín, en la cual se determinó la tasa de reaireación en un río de montaña Colombiano de manera experimental (método de inyección de sustancias volátiles) y empírica (aplicando fórmulas predictivas). Concluyendo que “Estos ríos presentan una gran capacidad de autodepuración debido a las altas tasas de reaireación ocasionadas por la gran turbulencia del flujo. Los trazadores empleados fueron dos conservativos, sal de cocina (NaCl) y Rodamina WT, y uno no conservativo, el gas SF₆. Se hallaron valores de Ka experimental del orden de 114 d⁻¹ y 108.65 d⁻¹. Al aplicar las ecuaciones predictivas empíricas de Ka disponibles y comparar sus resultados con los valores observados, se encontró que el modelo de Tzivoglou y Neal, basado en la disipación de energía, dio la mejor predicción con resultados de Ka 114.64 d⁻¹ y 103.51 d⁻¹” [12].

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Características del área de estudio

El Cauca es catalogado como uno de los departamentos con mayor riqueza hídrica a nivel nacional, al occidente limita con el océano pacífico, mientras que en su territorio firme goza de todos los pisos térmicos lo que le brinda cualidades medioambientales para que el recurso hídrico se encuentre en grandes cantidades. La ciudad de Popayán es la capital de este departamento, y no está excluida de las características hídricas preponderantes del departamento, tiene como principales

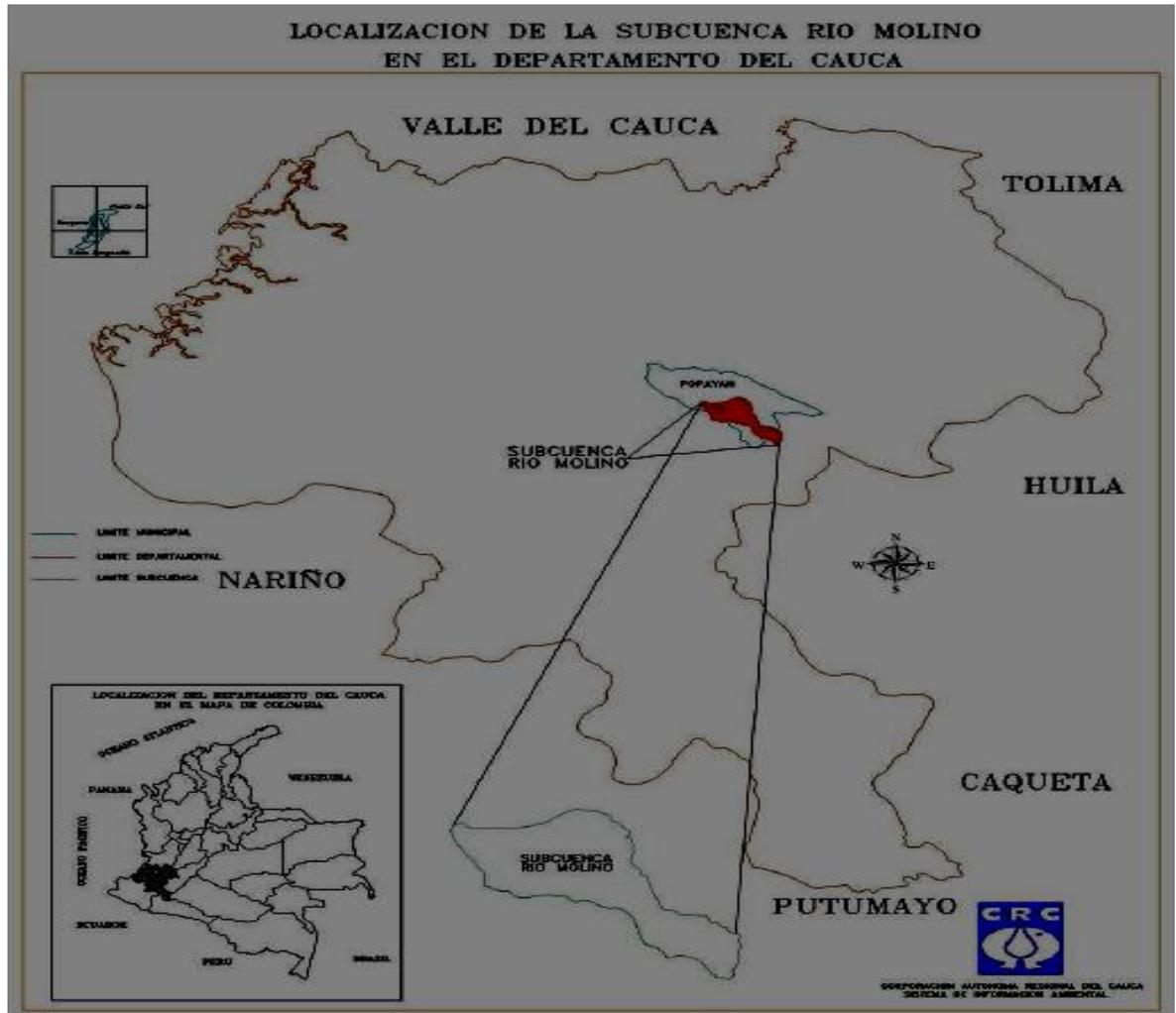
fuentes hídricas los ríos Blanco, Ejido, Molino, Las Piedras, Cauca, Negro, Mota, Pisojé, Clarete, Saté y Hondo [22].

El desarrollo de esta investigación se enfoca en la subcuenca del río Molino, que a su vez pertenece a la cuenca del río Cauca.

Las fuentes hídricas anteriores hacen parte de las zonas hidrográficas que según el plan de ordenamiento y manejo de la subcuenca hidrográfica Molino (POMCH) es “El territorio en el que las aguas se unen y se trasladan a los puntos más bajos de la superficie del mismo y se unen en un río principal, que finalmente drena a un lago, mar u océano”. En Colombia son cinco zonas hidrográficas, y la cuenca del río Cauca hace parte de la zona hidrográfica del Magdalena – Cauca. En orden jerárquico se procede a definir Cuenca, que se precisa como “Las aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor, a su vez, puede desembocar en una fuente hídrica principal”. Este es el caso del río Cauca. Por último, la subcuenca, que es la del río Molino, y se denomina como aquellas subdivisiones principales de las cuencas, donde las aguas superficiales y subterráneas alimentan a las cuencas [23].

- **Localización, delimitación y extensión del río Molino:** El río Molino se encuentra ubicado geográficamente al suroccidente de Colombia, en un punto central del departamento del Cauca, hacia el Suroccidente del municipio de Popayán.

Imagen 1. Localización de la subcuenca del río Molino en el Cauca.



Fuente. Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca Rio Molino CRC [23].

La delimitación de la subcuenca se presenta de esta manera según el POMCH del río Molino [23].

Tabla 1. Delimitación del río Molino, municipio de Popayán.

PUNTO CARDINAL	REFERENCIA	COORDENADAS PLANAS	AREA (Km²)
Norte	Desembocadura del río Molino en el río Cauca	1050300 Este, 763700 Norte	67.87
Sur	Nacimiento del río Molino en la vereda Santa Elena	1063100 Este, 764500 Norte	
Oriente	Nacimiento quebrada Pesares, vereda Santa Elena	1063600 Este, 755200 Norte	
Occidente	Límite con subcuenca quebrada Pubús	1048200 Este, 759300 Norte	

Fuente. Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca río Molino CRC [23].

El río Molino abarca una amplia red de interacción con la zona urbana de la ciudad, aproximadamente un área de 67, 87 km², esto le da carácter de subcuenca urbana y se debe tomar unos lineamientos metodológicos para formular planes en pro de la fuente hídrica [4].

- **División político administrativa del río Molino:** El río Molino contiene situaciones sociales, económicas y biofísicas que están reflejadas en la división político administrativa, donde se tiene conocimiento hasta el punto de las veredas pertenecientes. La población de río Molino se estima en 53.329 habitantes distribuidos en la zona urbana y rural, está entrelazado con 8 corregimientos, 10 veredas y 4 comunas urbanas. Acá interactúan diferentes grupos poblacionales como campesinos, indígenas y comunidades urbanas, que intervienen la fuente hídrica dependiendo de su sentido de pertenencia, pues contaminan en mayor o menor medida el recurso hídrico [4].

- **Hidrología del río Molino:** La subcuenca presenta una alta influencia antrópica, debido a que es una fuente que está inmersa en una urbe con una densidad poblacional alta, de igual manera se considera que en su recorrido sobre la ciudad padece de zonas con poca pendiente, esto minimiza la autodepuración normal. Además el casco urbano transfiere sus vertimientos domésticos, industriales y comerciales directamente, sin tratamiento alguno causando índices elevados en contaminación en época de verano [23].

2.2.2. Características de muestreo a una fuente hídrica

La norma técnica Colombiana NTC 3550 – 2 define los conceptos principales de muestreo.

- **Muestreo:** El muestreo es el proceso de sacar una porción, procurando que sea representativa, de una masa de agua con el propósito de examinar diversas características definidas [24].
- **Monitoreo de inspección al área de estudio:** Proceso programado del muestreo, de la medición y después del registro y transmisión, o ambos, de varias características del agua, frecuentemente destinada a evaluar la conformidad de los objetivos específicos [24].
- **Ubicación de estaciones de muestreo:** Los sitios se deben seleccionar de tal modo que proporcionen muestras representativas, de preferencia en donde haya probabilidad de que ocurran cambios marcados en la calidad o en donde haya usos importantes del río, en zonas de mezcla y en la parte de control que no esté afectada por una descarga. La selección del sitio de muestreo se realizan de acuerdo al objetivo del programa de monitoreo [24]. En este caso el objetivo es conformar una línea base de información del río Molino en su recorrido por la ciudad de Popayán. El IDEAM propone los siguientes sitios de muestreo para cumplir este tipo de objetivos [25]:

- Fuente superficial aguas arriba de la ciudad.
- Fuente superficial aguas abajo de la ciudad.
- Fuente superficial punto intermedio entre las dos.
- **Sitio de muestreo:** El área general donde se toman las muestras, dentro de un cuerpo de agua [24].
- **Tipos de muestreo:** Según el objetivo general del muestreo se escoge el tipo de muestreo: Si se trata de caracterizar física, química y microbiológicamente un vertimiento puntual de una industria sobre un cuerpo hídrico receptor, se recomienda tomar muestras en el mismo sitio en diferentes momentos, este tipo de muestreo se denomina compuesto. Si se desea conocer las características físicas químicas y microbiológicas de un lago que recibe polución en un solo punto y se transportan los vertimientos a través de todo el cuerpo receptor, es necesario hacer un muestreo integrado, es decir muestrear en diferentes puntos y en tiempos diferentes. Por último cuando se trata de un canal abierto intervenido por vertimientos en diferentes puntos, los niveles paramétricos permanecen oscilantes, es preciso tomar una sola muestra en un solo momento (tiempo) este es un muestreo simple o puntual.
- **Muestreo simple o puntual:** Es la muestra tomada en un lugar representativo, en un determinado momento [25].
- **Muestreo compuesto:** Es la mezcla de varias muestras puntuales de una misma fuente, tomadas a intervalos programados y por periodos determinados, las cuales pueden tener volúmenes iguales o ser proporcionales al caudal durante el periodo de muestras [25].
- **Muestreo Integrado:** La muestra integrada es aquella que se forma por mezcla de muestras puntuales tomadas de diferentes puntos simultáneamente, o lo más cerca posible [25].
- **Frecuencia de muestreo:** La frecuencia de muestreo va a depender del tipo

de cuerpo de agua que se pretenda monitorear así como los objetivos que se persigan. Si el objetivo es el seguimiento del recurso y su modelamiento, es necesario tener claridad sobre el comportamiento estacional de mismo a través del tiempo en diferentes puntos seleccionados estratégicamente; por lo tanto se recomienda tomar muestras puntuales cada 2, 4, 6, 8 horas, según el régimen de precipitación. Se recomienda llevar a cabo el muestreo teniendo en cuenta los costos a que esto conlleva [25].

- **Toma de muestras para análisis fisicoquímico:** Según lo dicho por el IDEAM en su instructivo para la toma de muestras se debe realizar de esta manera [26].
 - Organizar las botellas rotuladas, los reactivos, formatos e insumos.
 - En el punto de muestreo identificarse y solicitar la colaboración necesaria para efectuar el muestreo y sacar el material correspondiente al sitio. Llenar la información de ubicación temporo - espacial requerida para la radicación de la muestra en el laboratorio de análisis paramétrico. Con ayuda del geoposicionador y un altímetro determine la latitud, longitud y altitud del sitio de muestreo, si la unidad productiva tiene más de dos sitios de muestreo hay que referenciar cada uno.
 - Las botellas rotuladas deben tener el nombre del responsable del muestreo.
 - Calibrar el pH metro y conductímetro. Diligenciar los resultados de calibración de cada uno de los equipos portátiles disponibles.
 - Medir el caudal del efluente con el método de aforo de caudal pre establecido, en este caso por el método área – velocidad.
 - Medir los parámetros de campo, introducir los electrodos del pH metro, conductímetro y de oxígeno. Oprimir la Tecla MODE, esperar a que los valores en la pantalla del equipo se estabilicen. Oprimir la Tecla READ, cuando se estabilice la medición, registrar los datos de pH, temperatura

hídrica, oxígeno disuelto, % de saturación de oxígeno y conductividad eléctrica.

- Lavar los electrodos con abundante agua ya que los valores extremos que presentan los efluentes contaminados los deterioran más rápidamente.
- Componer la muestra pre establecida según se haya establecido en el plan de muestreo.
- Registrar en el formato de captura de datos previamente realizado con los parámetros a medir, todas las observaciones a que haya lugar durante el muestreo.
- Etiquetar las botellas antes del llenado. Los rótulos cuentan con información de los analitos y preservación respectiva, fecha y responsable del muestreo.
- Cubrir el rótulo con cinta adhesiva transparente para evitar el deterioro.
- Cuando se ejecute el muestreo, purgar todas las botellas con muestra y proceda a llenarlas, tome la muestra mientras recorre la sección transversal de la fuente de estudio para que sea homogéneo el contenido.
- Evitar la inclusión de objetos flotantes y/o sumergidos.
- Preservar las muestras dependiendo del parámetro a analizar observe la tabla 2.
- Tapar cada botellas y agitarla
- Colocar las botellas dentro de la nevera de icopor con hielo suficiente para crear una temperatura cercana a los 4 ° C.
- Enjuague con agua destilada o limpia todos los elementos utilizados en el muestreo.
- Colocar las botellas en un mismo sitio dentro de la nevera en posición vertical.

- Enviar los tarros rotuladas al laboratorio, preferiblemente el mismo día de muestreo.

Tabla 2. Requerimientos para la conservación y almacenamiento de muestras de agua.

PARAMETRO A ANALIZAR	CONSERVACION	MAXIMO ALMACENAMIENTO / REGULATORIO
Temperatura	Analizar inmediatamente	0.25 h / 0.25 h
pH	Analizar inmediatamente	0.25 h / 0.25 h
Conductividad	Refrigeración	28 d / 28 d
Oxígeno Disuelto, electrodo	Analizar inmediatamente	0.25 h / 0.25 h
% Saturación de oxígeno, electrodo	Analizar inmediatamente	0.25 h / 0.25 h
Color real	Refrigeración	48 h / 48 h
Turbiedad	Analizar el mismo día, guardar en oscuridad hasta 24 horas, refrigerar	24 h / 48 h
DBO ₅	Refrigeración	6 h / 48 h
DQO	Analizar tan pronto sea posible si no se adiciona H ₂ SO ₄	7 d / 28 d
Sólidos Disueltos Totales	Refrigeración	7 d / 2-7 d

Nitratos	Analizar tan pronto sea posible o refrigerar	48 h / 48 h
Nitritos	Analizar tan pronto sea posible o refrigerar	Ninguno / 48 h
Dureza total	Adicionar HNO ₃ o si no tan pronto sea posible	6 meses / 6 meses

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [26].

2.2.3. Contaminación hídrica

Las aguas residuales son las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en las cloacas y son transportadas mediante el sistema de alcantarillado. Existen diferentes tipos de aguas residuales que se nombran según el tipo de contaminante que se les vierte. Las aguas residuales domésticas son las provenientes de edificaciones residenciales, comerciales e institucionales. Las aguas residuales industriales son las que provienen de las descargas de las industrias de manufactura. En ciudades que poseen un sistema de alcantarillado combinado se unen las aguas residuales provenientes del sector doméstico y las industrias y en temporada de lluvia se adhieren con las aguas que se provocan por precipitación, la combinación de estas aguas se transportan por efecto de gravedad a través del alcantarillado a un cuerpo de agua circundante y vestirse directamente sin recibir tratamiento alguno, lo cual crea un deterioro paulatino del recurso hídrico, hasta convertirse en un hecho que limita muchos aspectos sociales, ambientales y demás; que minimizan la calidad de vida del medio acuático como el de las personas [27].

Las fuentes hídricas de canales abiertos como (ríos, lagunas, humedales y quebradas) a las que se les vierte agua residual sin importar el origen de la polución pueden sufrir alteraciones en las características normales del cuerpo de agua,

modificando los parámetros fisicoquímicos como: temperatura hídrica, pH, conductividad, color real, sabor y olor, turbiedad, demanda biológica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos disueltos totales (SDT) nitratos, nitritos y dureza total.

2.2.4. Definición de parámetros fisicoquímicos medidos

- **Temperatura hídrica:** La temperatura en el agua se considera como un parámetro físico ya que depende de factores externos como la radiación solar, fluctuaciones del clima, variaciones altitudinales, entre otros. Estas características hacen que siempre se exponga a cambios en su estado de materia, con facilidad pasa de sólido a líquido u gaseoso. Mientras se encuentra en su estado es capaz de adherirse a un gran número de compuestos que actúan en pro o en contra del medio ambiente circundante. Mientras el agua hace su recorrido en estado líquido, la temperatura afecta y altera la vida acuática, modifica la concentración de saturación de oxígeno disuelto, la velocidad de las reacciones químicas y la actividad bacterial. La tasa de sedimentación de sólidos en aguas cálidas es mayor que en aguas frías, por el cambio en la viscosidad del agua. La temperatura óptima para la actividad bacterial es de 25°C a 35°C . La digestión aeróbica y la nitrificación se suspenden cuando la temperatura alcanza los 50°C . Cuando la temperatura es menor a 15°C la digestión metanogénica es muy lenta, y a temperaturas de 5°C la bacteria eutrófica nitrificante deja de operar [27].
- **Potencial de Hidrogenación (pH):** Se define como un valor numérico u operador adimensional que se relaciona con el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno a una temperatura dada, indica la intensidad del carácter ácido (acidez) o básico (alcalinidad) del agua y puede variar entre 0 y 14, donde 0 es el valor más ácido, 7 es neutro y 14 el más básico, controlado por los compuestos químicos disueltos.

Las aguas naturales usualmente tienen un pH entre 6.5 y 8.5, y depende de

la geoquímica de los suelos, de las aguas de lavado y de la dinámica física y química del bióxido de carbono, el ácido carbónico, carbonatos y bicarbonatos, iones que siempre están presentes en las aguas, como también lo ácidos húmicos y fúlvicos. Salvo a vertimientos de industrias u interacción drástica de compuestos químicos de la naturaleza, es poco usual que el agua superficial presente pH lejanos a este intervalo, gracias a su capacidad tampón que es la regulación de pH por la interacción de sustancias ácidas y básicas en el medio circundante [28].

- **Conductividad:** Es una medida de la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica, depende de la presencia de iones, su concentración total, movilidad, valencia, concentración relativa y temperatura de medición. La conductividad eléctrica se expresa como microsiemens por centímetro (mS/cm) e indica el contenido de sales disueltos o de minerales en el agua. Los intervalos de conductividad en aguas superficiales varían de 10 a 10000 mS/cm, pero pueden exceder el valor máximo cuando el agua superficial recibe los vertimientos de una urbe. La conductividad está relacionada con las zonas de contaminación alrededor de la descarga de un afluente, los valores asumidos de esta variable determinan el uso potencial del agua, debido a que el efecto de las actividades domésticas e industriales modifican los valores naturales de conductividad [28].
- **Oxígeno Disuelto:** Se entiende por oxígeno disuelto (OD) el oxígeno libremente disponible en el agua. La solubilidad de oxígeno en el agua se debe a varios factores, en particular a la temperatura, presión atmosférica y salinidad, que para la mayoría de las aguas superficiales se puede considerar cercano a cero.

La solubilidad del oxígeno atmosférico en el agua dulce varía desde 14.6 mg/L a 0°C, hasta aproximadamente 7 mg/L a 35°C, a una Atmósfera de presión, esto quiere decir que el OD se comporta de manera inversa en relación a la temperatura. Puesto que es un gas poco soluble, su solubilidad

varía directamente con la presión atmosférica. Esta es una consideración importante a grandes altitudes, debido a que la velocidad de oxidación biológica aumenta con bajas temperaturas y la demanda de oxígeno aumenta simultáneamente. En la práctica los valores críticos relacionados con deficiencia de oxígeno disuelto se dan en época de verano, cuando la temperatura es alta y la solubilidad del oxígeno mínima. Por esto se considera que el nivel máximo de OD disponible en condiciones críticas es de 8 mg/L. El factor más importante que limita la capacidad de purificación de las aguas naturales es la baja solubilidad del oxígeno, y es necesario el tratamiento de los desechos para remover el material contaminante antes que se viertan directamente a las fuentes receptoras.

Cada especie acuática tiene cierta adaptación a los valores deficientes de oxígeno, en términos globales el valor mínimo de oxígeno disuelto que propicie la supervivencia de los individuos acuáticos aproximadamente es de 4 a 5 mg/L que, para condiciones normales equivale a un déficit de oxígeno de 30 a 60 %. Valores de OD por debajo de 2 mg/L causan la muerte de la mayoría de los peces. En cuanto a las descargas de aguas domésticas con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, aumentan el déficit de oxígeno como resultado de la actividad microbológica. En muchos casos el aumento del déficit de oxígeno determina condiciones anaerobias, especialmente en proximidad de los sedimentos [29].

- **Concentración de Saturación de Oxígeno en el agua:** Es el valor máximo de oxígeno que puede estar diluido en un cuerpo de agua para la temperatura y presión de campo. Si el agua presenta mucha aireación por efecto de cascadas, turbulencia, poca profundidad del río se produce supersaturación [29].
- **Porcentaje de Saturación de Oxígeno en el agua:** Es la cantidad de oxígeno en el agua en relación a la cantidad máxima de oxígeno que puede haber a una temperatura y presión determinadas. Si la saturación es inferior

a 40% hay un déficit de oxígeno, mientras que si dan resultados por encima de 100% hay índices de sobresaturación [29].

- **Propiedades Organolépticas:** Se define como las propiedades que son perceptibles a los sentidos de los humanos, son relativos ya que el desarrollo de la vista, gusto y olfato no es igual en todos los individuos indagadores. Aunque es importante como punto de partida ya que los investigadores con experiencia son capaces de conocer los patrones principales y determinar si la fuente hídrica es intervenida. Para posteriormente aplicar métodos cuantitativos de calidad del agua, que corroboren o refuten la contaminación del cuerpo hídrico.
- **Color:** Muchas aguas superficiales, especialmente las expuestas a áreas pantanosas, tienen valores elevados de color, la coloración en el agua se da por el contacto de ella con detritus orgánicos como madera, hojas, sustancias químicas en la naturaleza que se encuentran en un diverso estado de descomposición, se considera que los principales causantes del color en el agua son los taninos, el ácido húmico y los humatos, que provienen de la descomposición de lignina. El hierro algunas veces está presente como humato férrico, que produce una coloración muy perceptible. Los resultados de color se comportan directamente con el pH, por eso es recomendable medir ambos parámetros [29].
- **Color Aparente:** Los ríos que en su recorrido pasan por áreas de suelos de arcillas rojas se tornan altamente coloreados, este color es causado por materia en suspensión y es llamado color aparente [29].
- **Color Real:** Las fuentes hídricas que se exponen a extractos vegetales u orgánicos que son coloidales presentan índices de color real [29].
- **Olor:** Es un parámetro organoléptico relativo, ya que la percepción de los olores difiere entre el nivel de desarrollo olfativo de cada individuo. Las personas con experiencia en contaminación hídrica pueden dar respuesta al

tipo de agua residual. Esta puede ser agua residual fresca o recientemente intervenida, aguas sépticas o estancadas, aguas industriales que poseen un olor característico del proceso que ejerce la industria, o aguas que no padecen de olor desagradable. Esta apreciación puede ser uno de los primeros pasos para dar por hecho la contaminación de un cuerpo de agua, de hecho las comunidades indígenas y campesinas apartadas de la urbe utilizan con frecuencia este tipo de actos para definir si el agua es apta para el consumo propio o el de sus animales. Los problemas atribuibles a malos olores en el agua son: La pérdida del apetito por lo alimentos, menor consumo de agua, dificultades respiratorias, náuseas, vómito, perturbaciones mentales, deterioro de las relaciones humanas, pérdida del orgullo comunitario y el nivel social, pérdida del valor de la propiedad y el potencial desarrollo [27].

- **Sabor:** Es una apreciación sensorial que al ejecutarse puede llevar a la morbilidad del individuo indagador, pues se expone a los compuestos biológicos y/o químicos que contiene el agua en el paraje. Este método se utiliza frecuentemente en comunidades donde no es posible la intervención de personal calificado para indagar sobre la calidad del recurso y solo les queda ingerir el agua para determinar si es apta para satisfacer sus necesidades básicas y de sus animales.
- **Turbiedad:** El término turbio se aplica a las aguas que contienen materia en suspensión que interfiere con el paso de la luz a través del agua, o a aquellas en las que está restringida totalmente la visibilidad de la profundidad. La turbiedad puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, de tamaño variable entre las dispersiones coloidales y las gruesas, dependiendo del grado de turbulencia. En ríos en condiciones de desbordamiento, la turbiedad se debe a dispersiones relativamente gruesas. A medida que los ríos descienden de las áreas montañosas hacia las planicies, reciben turbiedad de la agricultura y de otras operaciones que

alteran el suelo, en condiciones de desbordamiento gran parte de la capa superior del suelo es arrastrada por el agua hacia las corrientes de agua. Este material puede ser de naturaleza inorgánica y trae sustancias como arcilla y barro, pero también contiene materia orgánica. Cuando los ríos continúan su recorrido, con frecuencia se encuentran con comunidades urbanas. Donde le vierten residuos domésticos e industriales, esto contribuye a que incremente la turbiedad ya que las sustancias orgánicas sirven de alimento para las bacterias y el crecimiento de estas genera turbiedad adicional, la presencia de Nitrógeno y fósforo en las descargas pueden llegar a provocar eutrofización en una fuente hídrica [29].

- **Demanda Biológica de Oxígeno en (5) días:** Se define como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia orgánica susceptible de descomposición, en condiciones aeróbicas. Al mencionar susceptible de descomposición quiere decir que la materia orgánica sirva de alimento de las bacterias y que su oxidación genera energía. Esta prueba es necesaria para conocer el poder de contaminación de los residuos domésticos e industriales sobre la fuente hídrica, es una de las pruebas más importantes en la operación de control de la contaminación como también es indispensable para realizar estudios que evalúan la capacidad de purificación de fuentes intervenidas antrópicamente. La degradación biológica de la materia orgánica en condiciones naturales es producida por un grupo diverso de microorganismos que llevan la oxidación hasta el final, convirtiendo los residuos en CO₂ y agua. La velocidad de los procesos metabólicos a 20°C y en condiciones de la pruebas es tal, que el tiempo se debe calcular en días. Teóricamente se considera un tiempo infinito para que finalice la oxidación biológica de la materia orgánica, pero con fines prácticos se considera completa en 20 días, sin embargo en la mayoría de los casos este periodo es demasiado largo para esperar los resultados, entonces se ha encontrado por experiencia, que un porcentaje

razonablemente grande del total de la DBO se obtienen en cinco días por eso se denomina a esta pruebas DBO₅. Según estudios se considera que el valor de la DBO₅ es cercano al 70 a 80 % del DBO_{Total} [29].

- **Demanda Química de Oxígeno:** Es un método que mide en un residuo la cantidad total de oxígeno que se requiere para la oxidación de los compuestos químicos, tanto orgánicos como inorgánicos, presentes en el agua y degradarlos a carbono y agua, esta prueba es ampliamente usada como una forma de medir la concentración de la materia orgánica en los residuos domésticos e industriales. La prueba se basa en la oxidación de algunos compuestos orgánicos por la acción de agentes oxidantes fuertes en condiciones ácidas. La principal ventaja de la prueba de DQO es el poco tiempo que se necesita para la evaluación; la determinación se puede hacer aproximadamente en tres horas, en comparación a la prueba de DBO que requiere mínimo hasta cinco días. Esta prueba es usada con frecuencia en análisis de los residuos industriales; que sirven para determinar y controlar los valores de las salidas a los sistemas de desagüe. Una de las principales limitaciones de esta prueba es la imposibilidad para diferenciar entre materia biológicamente oxidable y materia orgánica biológicamente inerte, además no proporciona ningún dato de la velocidad a la que el material biológicamente activo se estabiliza en las condiciones existentes en la naturaleza. Las aguas naturales sin intervención antrópica presentan valores de DQO de 20 mg/L y llegan hasta 200 mg/L cuando los cuerpos de agua reciben efluentes domésticos e industriales pueden tener valores de DQO que oscilan entre 100 y 60000 mg O₂/L [29].
- **Sólidos Disueltos Totales:** Se define como sólidos totales a la materia que queda como residuo después de la evaporación y el secado entre 103°C y 105°C. Los sólidos disueltos totales (SDT) representan el material soluble y coloidal, el cual requiere usualmente para su remoción; oxidación biológica o coagulación y sedimentación, los SDT en la práctica son aquellos con tamaño

menor a 1.2 micrómetros. La cantidad de sólidos disueltos en el agua es una consideración importante para el uso doméstico. En general, las aguas con un contenido de SDT menor que 500 mg/L son más adecuadas para este propósito. Las aguas con contenido sólido alto usualmente tienen efecto laxante y algunas veces el inverso, cuando el organismo de las personas no se ha adaptado a ellos. Esto es importantes ya que en muchas áreas es imposible encontrar aguas con un contenido menor a 500 mg/l y si un individuo no está adaptado a ingerir este recurso, con regularidad padece los efectos [29].

- **Nitratos (NO_3^-):** Es un compuesto químico inorgánico de fórmula molecular (NO_3^-), hace parte del ciclo del Nitrógeno y es la forma estable de las estructuras oxidadas del Nitrógeno, a pesar de su reactividad química puede ser reducido por acción microbiológica al mismo tiempo unir a compuestos orgánicos e inorgánicos, formando sales u otros compuestos en la naturaleza. Los Nitratos (NO_3^-) pueden convertirse en Nitritos (NO_2^-) y viceversa.

Es posible encontrarlos en pequeñas cantidades en fuentes naturales como: el suelo, los alimentos, las aguas superficiales y subterráneas. La fuente natural de producción son los vegetales donde proceden de la descomposición natural de proteínas de plantas o animales por medio de microorganismos dando lugar al catión amonio (NO_4^+), el cual se oxida a (NO_2^-) y este a (NO_3^-). Además es posible encontrarlos en fuentes artificiales como fertilizantes en la agricultura (Abonos nitrogenados), estiércol y purines derivados de las actividades ganaderas y desechos orgánicos de origen urbano o industrial [30].

- **Nitritos (NO_2^-):** La fórmula molecular del nitrito es (NO_2^-) es un anión que contiene Nitrógeno (N) y Oxígeno (O_2), está presente en el ciclo del nitrógeno, este es oxidado con facilidad por procesos químicos o biológicos a nitratos (NO_3^-), en los suelos, los fertilizantes son trasladados por

escorrentía a las fuentes hídricas y se une con los vertidos de agua residual, estos contienen índices elevados de nitrógeno orgánico que a su vez se descompone en el amonio, estos dos se unen y se convierten en los principales causantes de la eutrofización hídrica.

Son empleados principalmente en la industria alimentaria como nitrito potásico y nitrito sódico, especialmente en carnes curadas, es añadido como conservante de alimento, la causa que desencadena la utilización de estos compuestos en alimento es la intoxicación por exceso de nitratos en la dieta, que en dosis muy elevadas puede causar la formación endógena de N-nitroso compuestos (Nitrosaminas), de efectos cancerígenos [30].

- **Dureza Total:** La Dureza del agua se asocia frecuentemente con el contacto agua suelo y formaciones rocosas, es causada por los cationes metálicos polivalentes. Estos iones pueden reaccionar con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones para formar costras, los principales causantes de la dureza son los iones bivalentes del calcio, magnesio, estroncio, hierro ferroso e ion manganeso. Las aguas superficiales son más blandas que las aguas profundas, la dureza de las aguas refleja la naturaleza de las formaciones geológicas con las que el agua ha estado en contacto. En general las aguas duras se originan en áreas donde la capa superior del suelo es gruesa y contiene piedra caliza y las aguas blandas se originan donde la capa superior del suelo es delgada y formaciones de piedra caliza están dispersas o ausentes [29].

2.2.5. Medición de parámetros fisicoquímicos

Las mediciones cuantitativas de cualquier clase son la piedra angular de la práctica de la ingeniería, la ingeniería Ambiental es quizás más exigente en este aspecto, ya que la calidad requiere el uso de aparatos de medición convencionales (equipos), como también conocer muchas de las técnicas y métodos utilizados por los químicos, físicos y biólogos. Según el problema abordado debe tener una forma que

lo defina, este abordaje necesita el uso de métodos y procedimientos analíticos de laboratorio y de campo, que se haya probado, que dan resultados confiables al ser usados por varias personas y con gran variedad de materiales [29].

Mientras evoluciona la práctica de la ingeniería ambiental se han efectuado métodos analíticos para obtener la información pertinente para la resolución y solución de problemas. Con el pasar de los años la Asociación Americana de Salud Pública creó un comité para estudiar los diferentes métodos analíticos disponibles y publicó las recomendaciones del comité como “Métodos estándar para el análisis de aguas” en el año 1905. Desde esa época hasta la actualidad los principales conocedores de los métodos de análisis indagan, eliminan y acoplan métodos que permitan optimizar los resultados finales de la investigación [31].

2.2.6. Aforo del caudal por el método área velocidad

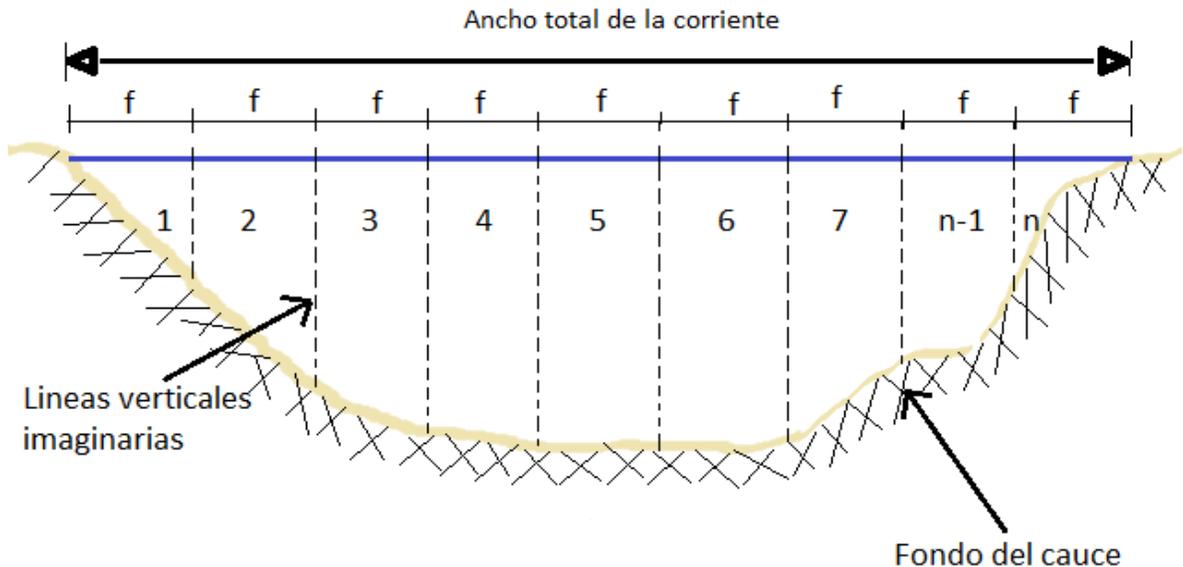
El IDEAM explica el proceso de medición del caudal en un canal abierto [32]. Se puede conocer el caudal con la fórmula de continuidad.

$$\text{Caudal} = \text{Área} * \text{Velocidad}$$

Ecuación. (1)

La medición del caudal por este método se expone en referencia a la imagen 3. La profundidad del río en la sección transversal o ancho de la corriente se mide en verticales con una barra graduada. Al mismo tiempo que se mide la profundidad, se hacen mediciones de la velocidad con el molinete en uno o más puntos de la vertical. La medición del ancho, de la profundidad y de la velocidad permite calcular el caudal correspondiente a cada sección de la longitud transversal. La suma de los caudales de estas secciones representa el caudal total.

Imagen 3. Vista de la sección transversal de un río con los puntos de observación.



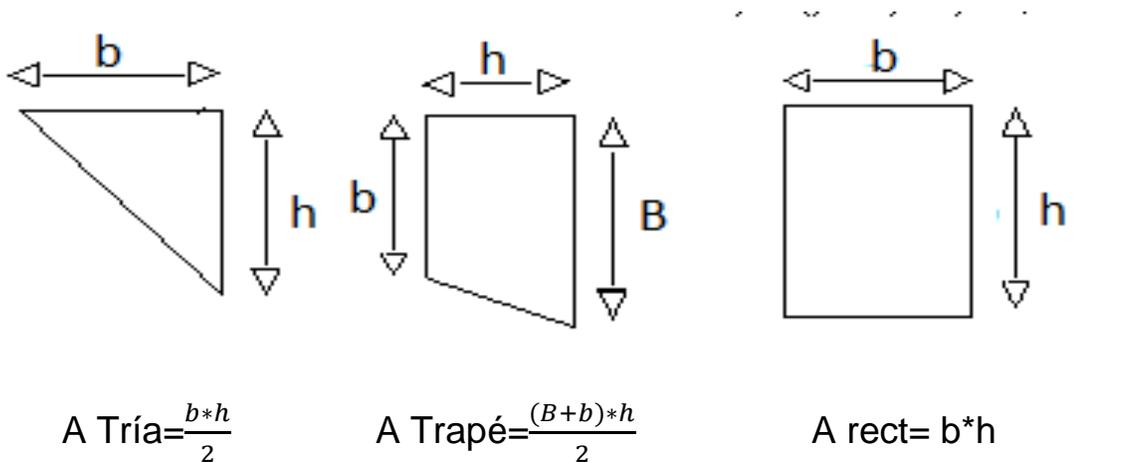
Fuente. Elaboración propia.

- **Sitio de aforo del caudal:** No es necesario que la medición del caudal se haga en el lugar exacto en que se ha instalado la estación de aforo, ya que el caudal es normalmente el mismo en las proximidades de la estación. Los sitios seleccionados para las mediciones del caudal deben tener las siguientes características.
 - Velocidades paralelas en todos los puntos y que formen ángulo recto con la sección transversal de la corriente.
 - Curvas regulares de distribución de velocidad en la sección, en los planos vertical y horizontal.
 - Velocidades superiores a 0,150 m/s
 - Lecho del río uniforme y estable.
 - Profundidad superior a 0.20 m
 - Ausencia de plantas acuáticas.

- **Medición de la sección transversal:** La medición del caudal depende en gran parte del número de verticales en que se hagan observaciones de la profundidad y la velocidad. Las verticales de observación deben localizarse de modo que se pueda definir debidamente la variación en elevación del lecho de la corriente y la variación horizontal en velocidad. El ancho del cauce y la distancia entre verticales deben ser obtenidas por mediciones hechas a partir de un punto fijo de referencia, que deberá hallarse en el mismo plano de la sección transversal. Normalmente, las distancias entre las verticales se determinan con unos valores recomendados.

Se procede a realizar el cálculo de las áreas de las secciones teniendo en cuenta la figura que forma cada sección (Triángulo, trapecio o rectángulo)

Imagen 4. Figuras geométricas necesarias para obtener el área en la fuente hídrica.



Fuente. Elaboración propia.

- **Medición de la velocidad**
 - **Instrumentos para la medición de la velocidad:** La velocidad del flujo en un punto determinado se mide generalmente con la ayuda de un molinete que se introduce en el agua durante un corto periodo de tiempo. Se debe calibrar el molinete a fin de cubrir la totalidad de velocidades en las verticales.
 - **Medición de la velocidad usando molinete:** Para hallar la velocidad en uno

o más puntos de cada vertical en canales poco profundos, el molinete debe sostenerse manualmente en la posición adecuada (verticalmente), una vez que el molinete se haya colocado en el punto seleccionado de la vertical, se alineará en la dirección de la corriente antes de comenzar las mediciones. El molinete debe sacarse del agua de vez en cuando para ser examinado.

- **Determinación de la velocidad media en la vertical:** La velocidad media del agua en cada vertical se puede determinar con uno de estos métodos.

a. Método de distribución de la vertical.

b. Métodos de puntos reducidos.

c. Método de integración.

La selección del método apropiado depende del tiempo disponible, del ancho y de la profundidad del agua, de las condiciones del lecho, de las variaciones del nivel, de la existencia de capa de hielo y de la exactitud requerida. Para el caso de esta investigación se toma el método que genera una exactitud adecuada para el trabajo de investigación. Este es el método de los puntos reducidos.

b. Método de puntos reducidos

b.1. Método menor a 0.40 metros: La velocidad se debe medir en cada vertical colocando el molinete al 50% de la profundidad a partir de la superficie. El valor observado se considera como la velocidad media en la vertical.

b.2. Método de un punto: Las observaciones de velocidad se deben hacer en cada vertical, colocando el molinete a 60 % de profundidad a partir de la superficie.

Profundidad entre (0.40 y 1.0 m) * (0.6).

b.3. Método de dos puntos: La velocidad se mide colocando el molinete en

cada vertical a 0,20 y 0,80 de la profundidad a partir de la superficie. El promedio de los dos valores puede considerarse como la velocidad media en la vertical.

$$V_{\text{media}} = (V_{0,2} + V_{0,8}) / 2$$

El método de un punto se usa cuando la distribución de velocidades es regular y la profundidad es superior a 0.40 m y menor que 1 metro, el método dos puntos se usa a profundidades mayores a 1 metro y el método menor a 0.40 metros se usa a profundidades menores a esta.

- **Caudal por el método área velocidad (aritmético):** Se considera que la sección transversal está compuesta de un número de secciones, cada uno de ellos limitados por dos verticales adyacentes. Si V_1 es la velocidad media de la primera vertical y V_2 es la velocidad media de la vertical adyacente, y si h_1 y h_2 representan las profundidades totales respectivas en las verticales 1 y 2 y f es la distancia horizontal entre las verticales, entonces el caudal unitario (q) del segmento será:

$$q = (\text{Vel media en la sección}) (\text{Área en la sección})$$

Área en la sección = (Resultado de la figura geométrica que se forme en la sección)

Puede ser, triángulo, rectángulo o trapecio.

El caudal total se obtiene sumando el resultado de los caudales parciales.

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + \dots + q_{n-1} + q_n. \quad \text{Ecuación. (2)}$$

2.2.7. Autodepuración de una fuente hídrica

Las fuentes hídricas pueden asimilar una cierta cantidad de polución, sin perjuicios serios, porque el ciclo biológico tiene una capacidad determinada para degradar el material vertido. Cuando un río tiene un material vertido bajo, se crea un medio adecuado para que los organismos más desarrollados convivan en él, pero cuando

se agrega una alta contaminación se presenta comúnmente una comunidad bacteriana o microorganismo que dan índices de contaminación, el ciclo de autodepuración puede minimizar los efectos de contaminación si se presentan características que fomenten su buen desarrollo. El punto crítico se da cuando el río naturalmente no puede degradar el material vertido y se rompe el equilibrio ecológico. La autodepuración va directamente relacionada con las tasas cinéticas como son: desoxigenación, nitrificación, sedimentación, decaimiento de patógenos y reaeración estas son importantes ya que permiten medir cuantitativamente que tan apto es el río para auto depurarse y son necesarias para la modelación hídrica [27].

Imagen 5. Ciclo de autodepuración.



Fuente. Elaboración propia.

2.2.7.1. Tasa cinética de desoxigenación

La concentración del oxígeno en los ríos es oscilatoria, ya que tiende a ganar o perder gas en la columna de agua, la fuente hídrica presenta tres fases (aire/agua/fondo) donde se presenta concentración de oxígeno en menores proporciones a medida que se desciende en la columna de agua. El proceso de

desoxigenación es una actividad natural donde intervienen microorganismos ubicados en el fondo (bento) que oxidan la materia orgánica consumiendo oxígeno (aerobios), esta apreciación se hace importante en ríos con escasa profundidad, baja velocidad, bajos caudales y una alta presencia de microorganismos por vertimientos domésticos, lo que puede incidir a eutrofizar la fuente hídrica. La desoxigenación está directamente relacionada con la prueba de DBO en el cuerpo de agua [33].

2.2.7.2. Tasa cinética de nitrificación

Las reacciones de Gaudy [34] dictan el proceso de nitrificación, donde inicialmente las bacterias Nitrosomas convierten el ion amonio en el agua a nitrito, después la bacteria Nitrobacter convierte el Nitrito en Nitrato y de esta manera se consume oxígeno del cuerpo de agua. Al final todo el procedimiento se resume en la cantidad de oxígeno consumido por unidad de nitrógeno oxidado en el proceso de nitrificación. Para que exista nitrificación deben unirse factores como una alta presencia de bacterias nitrificantes acompañadas de un pH alcalino (3-8) y un OD (1 a 2 mg/L) [33].

2.2.7.3. Tasa cinética de sedimentación

Es una valoración de la velocidad con que se sedimentan las partículas en el cuerpo de agua por efecto de la densidad de las mismas, densidad del agua, viscosidad dinámica del agua y diámetros de las partículas [33].

2.2.7.4. Tasa cinética de decaimiento de patógenos

Es una apreciación del número microorganismos (bacterias) presentes en el cuerpo de agua como coliformes totales, coliformes fecales y estreptococo fecales, extintos por acción de la mortalidad base o normal de la colonia, por radiación solar y pérdida por sedimentación de la fracción de patógenos adheribles a las partículas, Además intervienen otras variables como la salinidad y el aumento en la temperatura hídrica [33].

2.2.7.5. Tasa cinética de reaireación

La reaireación en los ríos es el proceso físico de absorción del Oxígeno de la atmósfera. Éste es el principal proceso que ocurre en los ríos a través del cual se reemplaza el oxígeno consumido en la biodegradación de la materia orgánica (proveniente de las descargas de aguas residuales). Las ecuaciones que permiten predecir el proceso de reaireación en los ríos están enfocadas a determinar la tasa de reaireación, también llamada coeficiente de reaireación (K_a), la cual mide la velocidad a la que el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua. Igualmente determina que tan rápido el OD en la corriente de agua alcanza el equilibrio con la atmósfera, es decir, que tan velozmente se alcanza la concentración de saturación a una temperatura y una altura sobre el nivel del mar determinadas [14].

La tasa de reaireación se emplea principalmente para cuantificar los procesos de reaireación en los modelos matemáticos de calidad del agua. Estos modelos, que simulan el intercambio de oxígeno entre la superficie del agua y la atmósfera, permiten establecer los niveles de remoción requeridos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, la ubicación y la máxima carga contaminante posible a verter en el recorrido de los ríos, sean o no provenientes de plantas de tratamiento, con el fin de garantizar una concentración mínima de OD. Igualmente estos modelos permiten la toma de decisiones acerca del aprovechamiento del recurso, la evaluación de alternativas de saneamiento y la capacidad de asimilación de dichas descargas. Las investigaciones realizadas en el proceso de reaireación en los cuerpos de agua naturales se han enfocado principalmente a los ríos [14].

La tasa de solubilización del oxígeno es proporcional al déficit de saturación como se indica en la siguiente ecuación.

$$\frac{dD}{d} = -K_2 D$$

Integrando,

$$D = D_0 e^{-K_2 * t}$$

Dónde: D = Déficit de OD para el tiempo t, mg/L

D_0 = Déficit inicial de OD, mg/L

K_2 = Constante de reaireación, base natural, d^{-1}

Expresando la ecuación anterior en términos de concentraciones de OD, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\ln \left(\frac{(C_{sat} - C_{final})}{(C_{sat} - C_{inicial})} \right) = - K_2 * (\text{tiempo}) \quad \text{Ecuación. (3)}$$

Dónde: C_{final} = Concentración de OD en el final del tramo, mg/L

$C_{inicial}$ = Concentración de OD en el inicio del tramo, mg/L

$C_{saturación}$ = Concentración de saturación de OD, mg/L

K_2 = Constante de reaireación, base natural, d^{-1}

t = tiempo medio de viaje en el tramo, día.

2.2.7.5.1. Tasas de reaireación semi empíricas y empíricas

Las ecuaciones predictivas efectuadas con estos métodos se basan en una regresión a los datos experimentales del cuerpo de agua en la zona de estudio y predicen la reaireación para las características de la fuente hídrica, por tanto si son aplicadas a otro tipo de corrientes pueden incidir a errores.

2.2.7.5.2. Tasa de reaireación experimental

La tasa de reaireación experimental se halla con estos cuatro métodos.

- **Inyección de sustancias volátiles (gas trazador):** En este método se inyecta una sustancia volátil al sistema. Estas sustancias son escogidas

debido a que ellas se volatilizan en forma análoga al oxígeno, no reaccionan, en bajas concentraciones, son inofensivas para el ambiente y la salud y sus concentraciones pueden ser medidas a un costo razonable. Los trazadores más comunes son los radioactivos (Krypton-85), hidrocarburos (Etileno, Propano, Metil Cloruro, etc.) y trazadores inorgánicos (Hexafluoruro de azufre SF₆). Estos trazadores generalmente son descargados junto con un trazador conservativo no volátil (Tritio, Litio, Bromo, Rodamina B o Rodamina WT) para determinar la dispersión en el río [14].

- **Desoxigenación con Sulfito de Sodio:** Los niveles de Oxígeno en un río pueden ser artificialmente reducidos mediante la adición de Sulfito de Sodio, tal como fue realizado por Owens (1964) en sus estudios en ríos de Gran Bretaña. Este método es especialmente atractivo en sistemas relativamente limpios, donde los demás factores son insignificantes [14].
- **Oscilación diurna del Oxígeno:** En algunas corrientes el crecimiento de plantas puede inducir oscilaciones diurnas en los niveles de oxígeno. Chapra y Di Toro (1991) ilustraron cómo estos datos pueden ser usados para estimar la reaireación [14].
- **Balance de Oxígeno en estado estable:** Este método se basa en la obtención del déficit de oxígeno al inicio y final del tramo seleccionado, y se relaciona con el tiempo medio de viaje del oxígeno en el tramo. Si los demás factores que afectan los niveles del Oxígeno Disuelto (tasa de desoxigenación, fotosíntesis, respiración, demanda de oxígeno por sedimentos, etc.) pueden ser determinados independientemente, el único parámetro desconocido que influye en las concentraciones de OD es el coeficiente o tasa de reaireación. [14]

2.3. BASES LEGALES

El marco legal en que se desarrolló la investigación comprende lo siguiente:

Tabla 3. Fundamentos generales para la gestión del recurso hídrico.

Norma	Tema
Constitución política de Colombia	"Capítulo II Derechos colectivos y del medio ambiente, artículo 79 donde se dispone que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente sano"
Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y No Renovables	Define que "El medio ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública y deber social. El código tiene por objeto prevenir, controlar la contaminación y restauración de los recursos naturales renovables y no renovables para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional.
Decreto 1541 de 1978	Artículo 211 "Prohíbe verter sin tratamiento, residuos sólidos, líquidos o gaseosos, que pueden contaminar o eutrofican las aguas, causar daño o poner en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora y fauna.
Normal RAS 2000 título E	"Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico tratamiento de aguas residuales"
Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua.	"Criterios de calidad de aguas para la preservación de flora y fauna en aguas dulces frías y cálidas, aguas marinas y de estuarios"
Decreto 475 de 1998	Normas técnicas de la calidad de agua potable, segura.

Fuente. Elaboración propia.

CAPITULO III: METODOLOGÍA

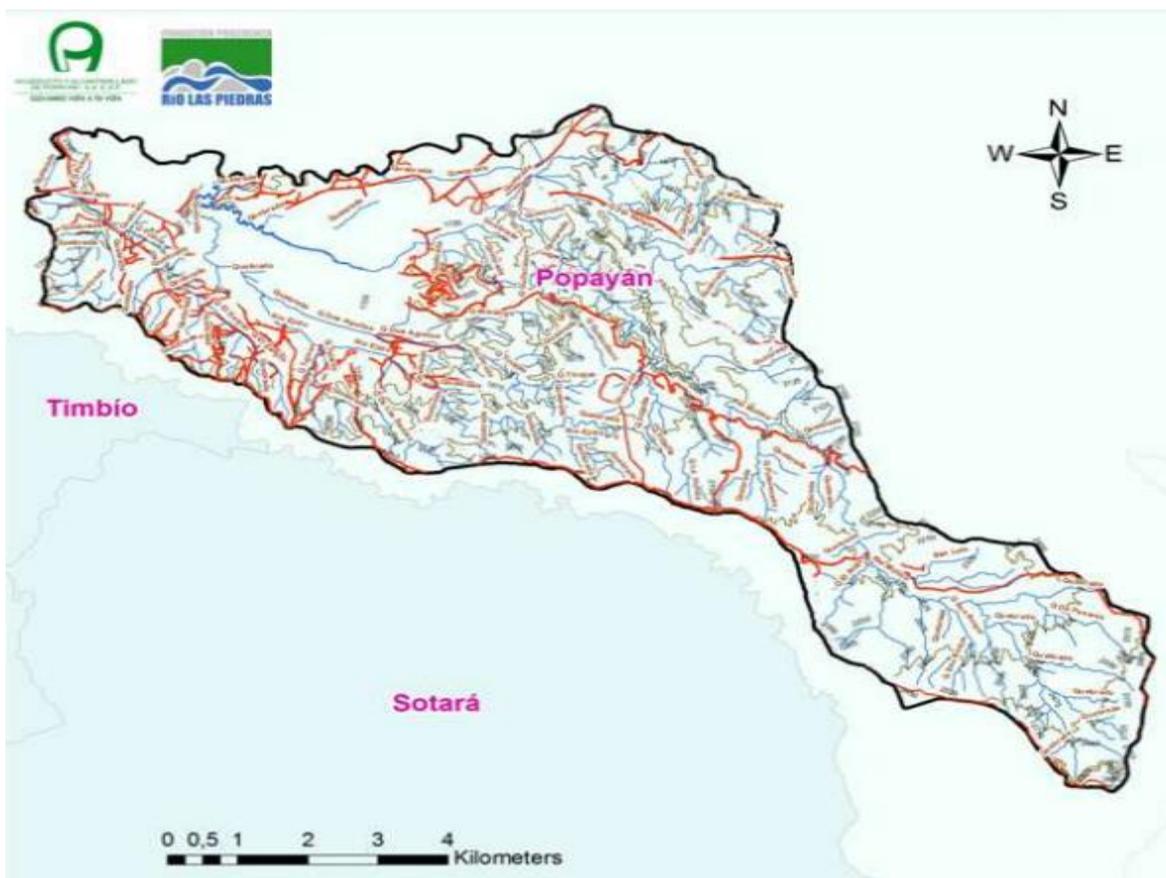
3.1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1. Descripción sub- cuenca río Molino

La ciudad de Popayán es la capital del departamento del Cauca en Colombia, se localiza a los 2°27' Norte y 76°37'18" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich, tiene una altitud de 1738 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura ambiente de 19° C y una precipitación media anual de 1.941 mm. La ciudad tiene como principales fuentes hídricas los ríos: Blanco, Ejido, Molino, Las Piedras, Cauca, Negro, Mota, Pisojé, Clarete, Saté y Hondo. Estos son intervenidos antrópicamente en altos niveles de contaminación o bajos según el nivel de interacción con la zona urbana de la ciudad [22].

La presente investigación se lleva a cabo en el río Molino el cual está ubicado geográficamente al suroccidente de Colombia, en un punto central del departamento del Cauca, hacia el suroccidente del municipio de Popayán. Su nacimiento se ubica en la vereda de Santa Elena a unos 2880 m.s.n.m.

Imagen 6. Subcuenca del río Molino en Popayán.



Fuente. Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca río Molino (CRC) [23].

3.1.2. Monitoreo sobre el río Molino

Se realiza una visita de inspección a la subcuenca del río Molino para establecer el punto de interacción con mayor altitud entre habitantes de Popayán y el río; así mismo se ubica el punto de interacción geográfico más bajo respecto a Popayán, de esta manera se establece la estación de muestreo inicial y final [25]. Este recorrido se realizó durante el mes de diciembre del año 2017.

3.1.3. Selección y ubicación de las estaciones de muestreo

La selección de las estaciones de muestreo se basa en estudios previos ejecutados por el Acueducto y Alcantarillado de Popayán sobre el río Molino [7], los cuales cumplen con los métodos instaurados por el IDEAM. Se establecen tres estaciones

de muestreo que tienen características indispensables para estimar el nivel de contaminación aportado por la ciudad. Inicialmente en el punto de interacción de mayor altitud, que es la vereda Pueblillo (E₁) en este paraje el río ya capta vertimientos en su gran mayoría de tipo agrícola, pero percibiendo de manera organoléptica aún no tiene índices de contaminación elevados. Posteriormente nos trasladamos al barrio centro sobre la carrera sexta en cercanías al edificio Negret y se ubica la segunda estación de muestreo (E₂), está ya presenta características de un río contaminado, aún más cuando se reciben los vertimientos y el río baja con un caudal bajo. De manera concluyente se ubica la estación de muestreo final en el barrio Junín (E₃), justo antes de unirse al río Ejido. Aquí ya recibe toda la carga contaminante que le aporta la ciudad de Popayán.

Imagen 7. Estaciones de muestreo en el río Molino.



Fuente. Google Earth.

Tabla 4. Estaciones de muestreo y sus coordenadas.

ESTACION NUMERO	ESTACIONES DE MUESTREO	COORDENADAS
E1	Rio Molino en vereda Pueblillo	N: 02°26'36.7" W: 76°34'36.8"
E2	Rio Molino en barrio centro, edificio Negret	N: 02°26'40.2" W: 76°36'18.5"
E3	Rio Molino en barrio Junín	N: 02°27'18.9" W: 76°37'32.6"

Fuente. Elaboración propia.

3.1.4. Tipo de muestreo y frecuencia de muestreo

El tipo de muestreo utilizado es simple, es decir, en un sitio y en un solo momento (tiempo) [25]. La vereda Pueblillo es el punto de partida, en el transcurso de dos horas se recolectan las muestras de agua para los parámetros fisicoquímicos de laboratorio, se miden los parámetros in situ y se afora el caudal. Concluida la obtención de datos en la estación número uno, se traslada a las estaciones de muestreo del centro y el barrio Junín y se compila la misma información. El tiempo de movilidad de un sitio de muestreo a otro es de una hora, así se deduce que la frecuencia de muestreo es de tres horas [25]. El día 27 de febrero de 2018 se realiza la salida de campo. Se miden las variables en la estación uno a las 7 am, a las 10 am en la estación dos y finalmente a la 1 pm en la estación tres.

3.2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS MEDIDOS

La toma de muestras de agua residual se basa en lo dicho por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) [26]. Una vez se obtengan las muestras se realizan mediciones de diferentes variables físicas y químicas, utilizando el método estándar para el examen de agua y aguas residuales (SMEWW) [31].

Los parámetros temperatura hídrica, pH, conductividad, porcentaje de saturación de oxígeno, oxígeno disuelto inicial y final en los tramos de estudio se midieron en

campo con la sonda HACH 40d multiparámetros y sus respectivos electrodos. Los parámetros fisicoquímicos de laboratorio como: Color aparente, turbiedad, DBO₅, DQO, Sólidos disueltos totales, Nitritos, Nitratos y Dureza Total se midieron en el laboratorio del Acueducto y Alcantarillado de Popayán que tiene certificación Berau veritas por ISO 9001.

En la siguiente tabla se observan las variables medidas por el Acueducto y Alcantarillado de Popayán en estudios previos [10] y el método de medición avalado por SMEWW.

Tabla 5. Variables fisicoquímicas medidas, método estándar y unidades de medición.

VARIABLE	METODO	UNIDADES
TEMPERATURA HIDRICA	Sonda HACH HQ40d multiparámetros Termómetro	°C
pH.	Sonda HACH HQ40d Potenciométrico	Unidad
CONDUCTIVIDAD	Sonda HACH HQ40d Conductidímetro	MicroS/cm
OXIGENO DISUELTO INICIAL	Sonda HACH HQ 40d multiparámetros Potenciométrico	mg/L
OXIGENO DISUELTO FINAL	Sonda HQ 40d multiparámetros Potenciométrico	mg/L
PORCENTAGE DE SATURACIÓN DE OXIGENO	Sonda HACH HQ40d multiparámetros. Potenciométrico	%
COLOR REAL	Standard methods (SM) 2120 C	pt/co
TURBIEDAD	SM 2130 B	UNT

DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (5)	SM 5210B/SM4500-OG	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	SM 5220 D, modificado	mg/L
SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	SM 2540 D	mg/L
NITRATOS	SM 4500- NO ₃ ·B	mg NO ₃ -N/L
NITRITOS	SM 4500- NO ₂ ·B	mg NO ₂ -N/L
DUREZA TOTAL	SM 2340 C	mg CaCO ₃ /L

Fuente. Elaboración propia.

3.3. TASAS DE REAIREACION PREDICTIVAS CALCULADAS

Las tasas predictivas de reaireación se hallan mediante la obtención de variables hidráulicas de la fuente hídrica.

3.3.1. Variables hidráulicas

Para estimar las características hidráulicas en cada estación de muestreo se instituye la técnica de aforo del caudal mediante el método de área - velocidad (molinete) según lo dicho por el IDEAM [32]. En la siguiente tabla se evidencian las variables hidráulicas medidas en cada estación de muestreo.

Tabla 6. Variables hidráulicas necesarias para tasa de reaireación predictiva.

VARIABLES HIDRÁULICAS	UNIDADES	MÉTODO
Sección transversal (A_{ncho})	(metros)	Medición con cinta métrica
Profundidad media agua (H_{med})	(metros)	Promedio de profundidades parciales
Velocidad media (V_{med})	(m/s)	Promedio de Velocidades parciales, halladas con el método de puntos reducidos

Área	(m ²)	Sumatoria de áreas parciales
Caudal (Q)	(m ³ /s)	Aforo por el método Área velocidad, sumando los caudales unitarios.
Cambio de elevación de la superficie del agua en un tramo (ΔH)	(m)	Diferencia de alturas en el tramo con nivel de precisión.
Longitud en el tramo	(m)	Estimación con cinta métrica.

Fuente. Elaboración propia.

La corriente de agua en cuerpos lóticos puede aforarse con la ecuación de continuidad:

$$Q = A * V \quad \text{Ecuación. (1)}$$

Dónde: Q= caudal; A= Área mojada (m²) y V= velocidad en el agua (m/s o m/día).

La sección transversal de aforo medida en el río se divide en un número de franjas (f) de acuerdo al ancho total de la corriente, la tabla 7 presenta los valores recomendados para el ancho de la franja. Seleccionado el valor f se procede a dividir el área total en número secciones (1, 2, 3, 4..., n-1, n) cada una con un ancho recomendado igual a la tabla 7, el perímetro de las secciones está determinado por la superficie del agua (franja), el fondo del cauce y por la(s) línea(s) vertical(es) imaginaria(s) como se observa en la imagen 8. También se nota que en las orillas las secciones tienen forma triangular y en la parte inferior se forman figuras trapezoidales y rectangulares.

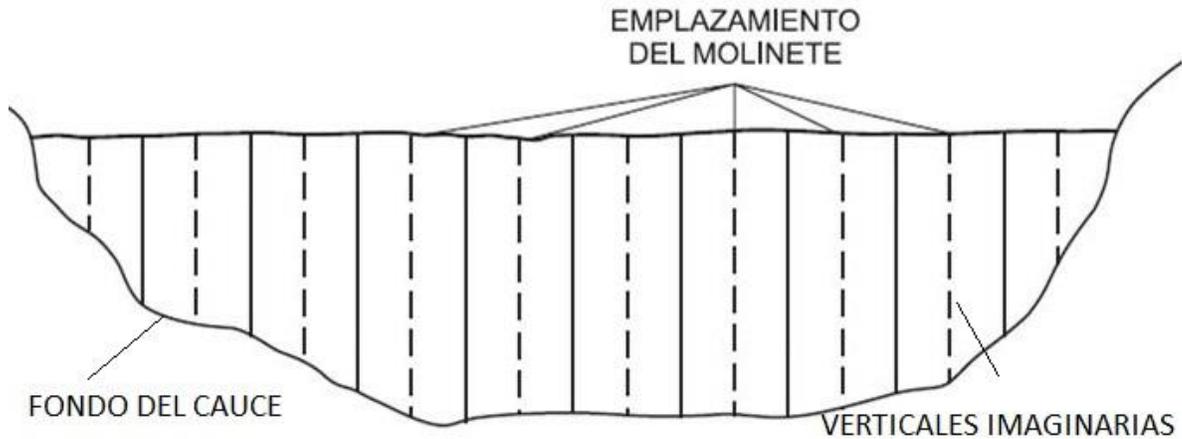
Tabla 7. Ancho recomendado de la franja.

ANCHO DE LA CORRIENTE (m)	ANCHO RECOMENDADO DE LA FRANJA (m)
Hasta 1.20	Cada 0.20
(1.21 - 2.10)	0.30
(2.11 - 4.0)	0.50

(4.01 - 8.0)	1.0
(8.01 - 15.0)	1.5

Fuente. IDEAM [24].

Imagen 8. Vista del seccionamiento de la fuente hídrica a muestrear.



Fuente. Elaboración propia.

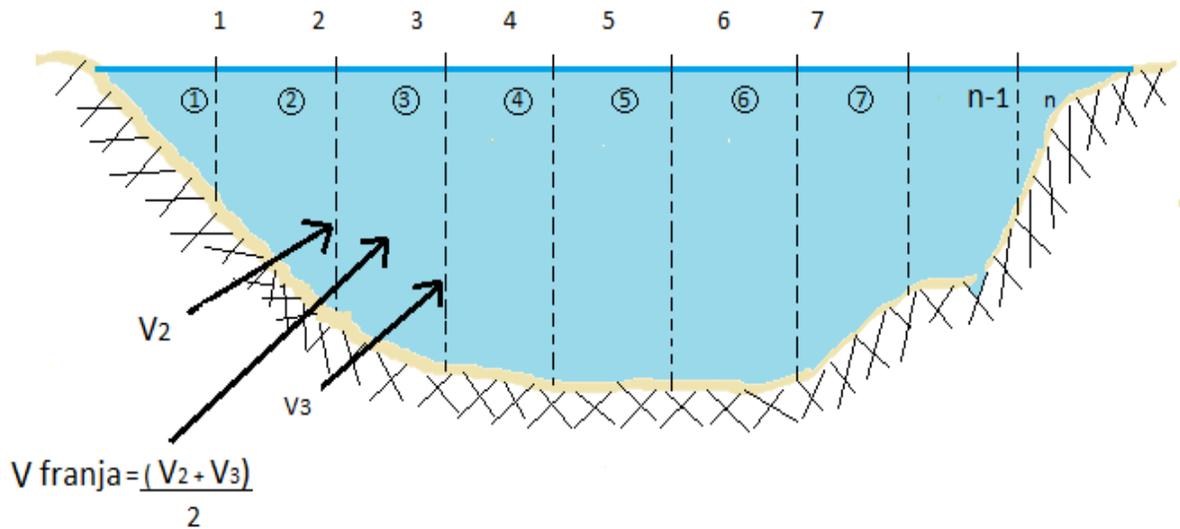
Se procede a realizar el cálculo de las áreas de las secciones teniendo en cuenta la figura geométrica que forma (Triángulo, trapecio o rectángulo).

$$\text{Área tría} = \frac{b \cdot h}{2} \quad \text{Área Trap} = \frac{(B+b) \cdot h}{2} \quad \text{Área Rect} = b \cdot h$$

Una vez realizado el seccionamiento, se mide la velocidad del flujo en cada vertical con ayuda de un molinete, esta puede determinarse mediante métodos que se aplican dependiendo de la profundidad del agua, de las condiciones del lecho, de la distribución de la velocidad en profundidad, del grado de precisión que se requiere y del tiempo disponible. En este caso se halla por el método de los puntos reducidos, el cual recomienda el IDEAM [32].

Determinadas las velocidades de cada vertical, se procede a promediar los valores de velocidad de las verticales consecutivas, de esta forma se encuentra la velocidad promediada de cada sección (V_s) la Imagen 9 ilustra el proceso del cálculo.

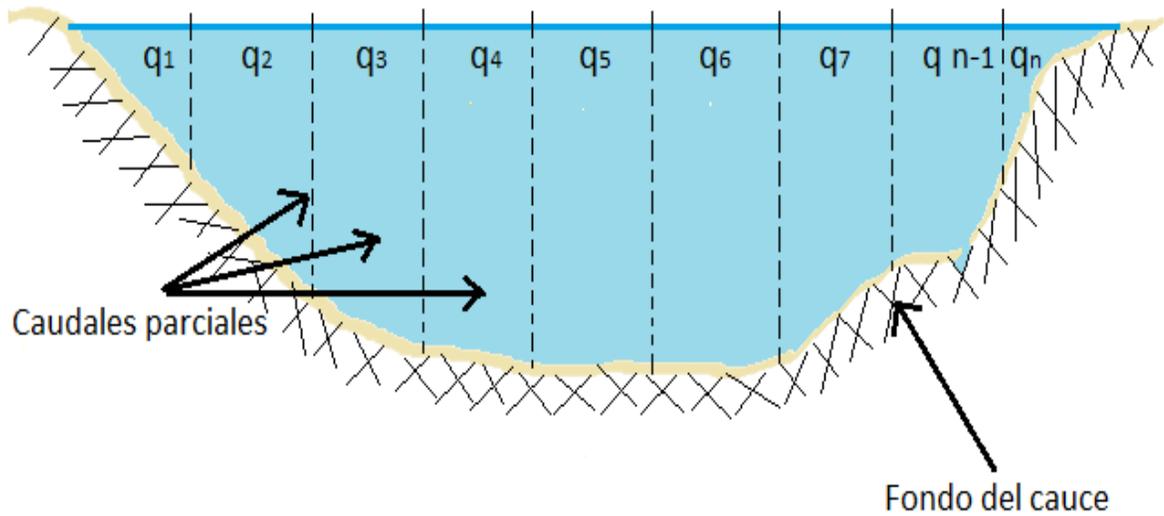
Imagen 9. Velocidad media en la sección.



Fuente. Elaboración propia

Con los valores del área en la sección y la velocidad media en la misma se aplica la ecuación de continuidad ($Q=A \cdot V$), esto permite conocer el dato del caudal unitario (q) en la sección. Como se conocen los datos del total de áreas y velocidades medias en las secciones restantes, solo queda hallar el caudal unitario (q) respectivo y al final sumar todos los caudales unitarios para conocer el caudal total del río en este paraje.

Imagen 10. Caudales parciales y caudal total.



Fuente. Elaboración propia

$$Q_{\text{Total}} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + \dots + q_{n-1} + q_n \quad \text{Ecuación. (2)}$$

3.3.2. Tasa de reaeración predictiva

Según la autoridad nacional de licencias ambientales (ANLA), para conocer la estimación de la tasa de reaeración (K_a), se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones predictivas [13].

Cuando la corriente de estudio es de característica de montaña, se recomienda utilizar las siguientes expresiones:

3.3.2.1. Tasa de reaeración por Tsvoglou y Neal

Se toma la tasa de renovación superficial como función del gradiente de energía de la corriente de flujo, y se formula la siguiente ecuación predictiva semi – empírica:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = C \left(\frac{\Delta H}{t} \right) \quad \text{Ecuación. (4)}$$

Donde: $K_a(20^\circ\text{C})$ = Tasa de reaeración a una temperatura de 20°C , dias^{-1}

C = Constante C depende del caudal existente.

$$C = 0.360 \text{ para } 0.028 \leq Q \leq 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C = 0.177 \text{ para } 0.708 \leq Q \leq 85 \text{ m}^3/\text{s}$$

ΔH = Diferencia de alturas en el tramo, m

t = Tiempo medio de viaje en el tramo, días⁻¹

$$t = \frac{\text{longitud del tramo (m)}}{\text{velocidad media del tramo } \left(\frac{\text{m}}{\text{día}}\right)}$$

Para el caso de ríos con pendientes poco pronunciadas, se pueden seleccionar las ecuaciones de reaeración más apropiadas de acuerdo con los rangos de la tabla 8. Las variables hidráulicas de las estaciones de muestreo (profundidad media y velocidad media) son comparadas con los rangos preestablecidos por los autores de la tabla 8, así se aplica o se descarta cada ecuación de reaeración predictiva.

Tabla 8. Ecuaciones de reaeración para ríos con poca pendiente.

PARAMETRO	UNIDADES	O'CONNOR-DOBBINS	CHURCHILL	OWENS – GIBBS
Profundidad media	(m)	(0.30 – 9.14)	(0.31–3.35)	(0.12 – 0.73)
Velocidad media	(m/s)	(0.15–0.49)	(0.55–1.52)	(0.03 – 0.55)

Fuente. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [13].

3.3.2.2. Tasa de reaeración por O'Connor y Dobbins

Se considera como predictiva semi - empírica y se aplica si los parámetros hidráulicos como velocidad media y profundidad media están en el rango establecido por los autores.

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.93 \left(\frac{V_{med}^{0.5}}{H_{med}^{1.5}} \right) \quad \text{Ecuación. (5)}$$

Donde: $K_a(20^\circ\text{C})$ = Tasa de reaeración a una temperatura de 20°C, d⁻¹

V_{med} = Velocidad media del agua, m/s

H_{med} = Profundidad media del río, m

3.3.2.3. Tasa de reaireación por Churchill

La ecuación es considerada como predictiva empírica y está formulada en función de dos propiedades hidráulicas: velocidad media y profundidad media del agua y fue hallada mediante un método de regresión. Es aplicable si los datos hidráulicos están en el rango establecido.

$$ka(20^{\circ}\text{C}) = 5,026 \frac{V_{\text{med}}}{H_{\text{med}}^{1,67}} \quad \text{Ecuación. (6)}$$

Donde: $Ka(20^{\circ}\text{C})$ = Tasa de reaireación a una temperatura de 20°C , d^{-1}

V_{med} = Velocidad media del agua, m/s

H_{med} = Profundidad media del río, m

3.3.2.4. Tasa de reaireación por Owens y Gibbs

Es una ecuación predictiva empírica y cumple iguales características a la de Churchill solo difiere en los valores de las constantes obtenidas por regresión según los autores. Es aplicable si los datos hidráulicos están dentro del rango.

$$Ka(20^{\circ}\text{C}) = 5.32 \left(\frac{V_{\text{med}}^{0.67}}{H_{\text{med}}^{1.85}} \right) \quad \text{Ecuación. (7)}$$

Donde: $Ka(20^{\circ}\text{C})$ = Tasa de reaireación a una temperatura de 20°C , d^{-1}

V_{med} = Velocidad media del agua, m/s

H_{med} = Profundidad media del río, m

3.3.2.5. Corrección de Tasa de reaireación para T° hídrica de campo

Debido a que Ka se definió para temperatura de 20°C , se convierte en un limitante a la hora de contemplar otras temperaturas diferentes a esta. En este sentido, se debe recurrir a la ecuación formulada por Arrhenius con una constante teta (θ) = 1.024 [14].

$$Ka_{\text{final}} = Ka(20^{\circ}\text{C}) (1.024)^{(T^{\circ} - 20^{\circ}\text{C})} \quad \text{Ecuación. (8)}$$

Dónde: K_a final = Tasa de reaeración adaptada a la temperatura de campo, día^{-1}

T° = Temperatura hídrica del tramo.

$K_a (20^\circ\text{C})$ = Tasa de reaeración a 20°C , obtenida con las fórmulas predictivas.

3.4. TASA DE REAERACION EXPERIMENTAL

Se halla la tasa de reaeración de manera experimental por el método de balance de oxígeno en estado estable [14].

$$\ln \left(\frac{C_s - C_f}{C_s - C_o} \right) = -K_a (\text{tiempo}) \quad \text{Ecuación. (3)}$$

Dónde: K_a = tasa de reaeración experimental, día^{-1}

C_s = Concentración de saturación de oxígeno para la temperatura de campo, mg/L

C_o = Concentración de oxígeno disuelto al inicio del tramo, mg/L

C_f = Concentración de oxígeno disuelto al final del tramo, mg/L

t = tiempo medio de viaje en el tramo, día

$$t = \frac{\text{longitud en el tramo (m)}}{\text{velocidad media en el tramo } \left(\frac{\text{m}}{\text{día}} \right)}$$

Para obtener valores confiables en la K_a se utiliza la totalidad de las fórmulas preestablecidas descritas anteriormente.

3.5. DESARROLLO ESTADÍSTICO.

Para el desarrollo estadístico de los datos colectados en el presente trabajo se realizaron pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas a la información colectada. Con los resultados encontrados se realizó un análisis no paramétrico apoyado en la prueba de Moses [35].

CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

4.1.1. Resultados de parámetros fisicoquímicos de campo

Con ayuda de la sonda HACH 40d multiparámetros y sus respectivos electrodos se midieron los parámetros fisicoquímicos in situ en las tres estaciones. En cada estación se instauró un tramo de muestreo con su respectiva longitud de inicio a final. La mayoría de las variables fisicoquímicas in situ se midieron en la mitad de la distancia del tramo (1/2 longitud), para el caso del OD se midió al inicio y final del tramo, para remplazar los datos en la formula experimental de tasa de reaireación. Mientras que los valores de saturación de oxígeno se hallan en el Anexo (6).

Tabla 9. Variables medidas in situ.

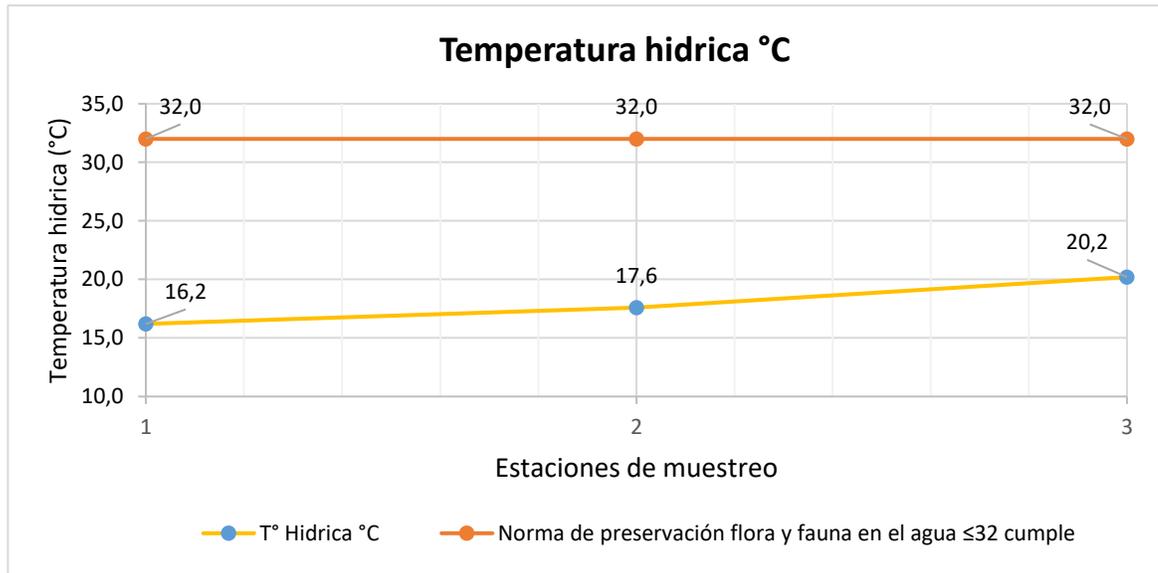
VARIABLE MEDIDA	UNIDADES	MEDICION DEL PARÁMETRO A LA DISTANCIA DEL TRAMO	RIO MOLINO, PUEBLILLO (E ₁)	RIO MOLINO, BARRIO CENTRO (E ₂)	RIO MOLINO, BARRIO JUNIN (E ₃)
Longitud del Tramo de muestreo	(metros)	X	80	93	95
T° Hídrica	(°C)	½ longitud tramo	16.2	17.6	20.2
pH	(adimensional)	½ longitud tramo	6.23	6.39	6.21
Conductividad	(MicroS/cm)	½ longitud tramo	44.6	59.9	107.8
Oxígeno disuelto inicial	(mg/L)	Inicio del tramo	8.0	7.52	6.57
Oxígeno disuelto final	(mg/L)	Final del tramo	7.95	7.57	6.67
Porcentaje de saturación de Oxígeno	(%)	½ longitud tramo	100	96.3	88.7

Fuente. Elaboración propia.

4.1.2. Análisis de resultados parámetros fisicoquímicos de campo

- **Temperatura hídrica en las estaciones de muestreo**

Gráfica 1. Resultados de temperatura hídrica Vs Norma de preservación flora y fauna

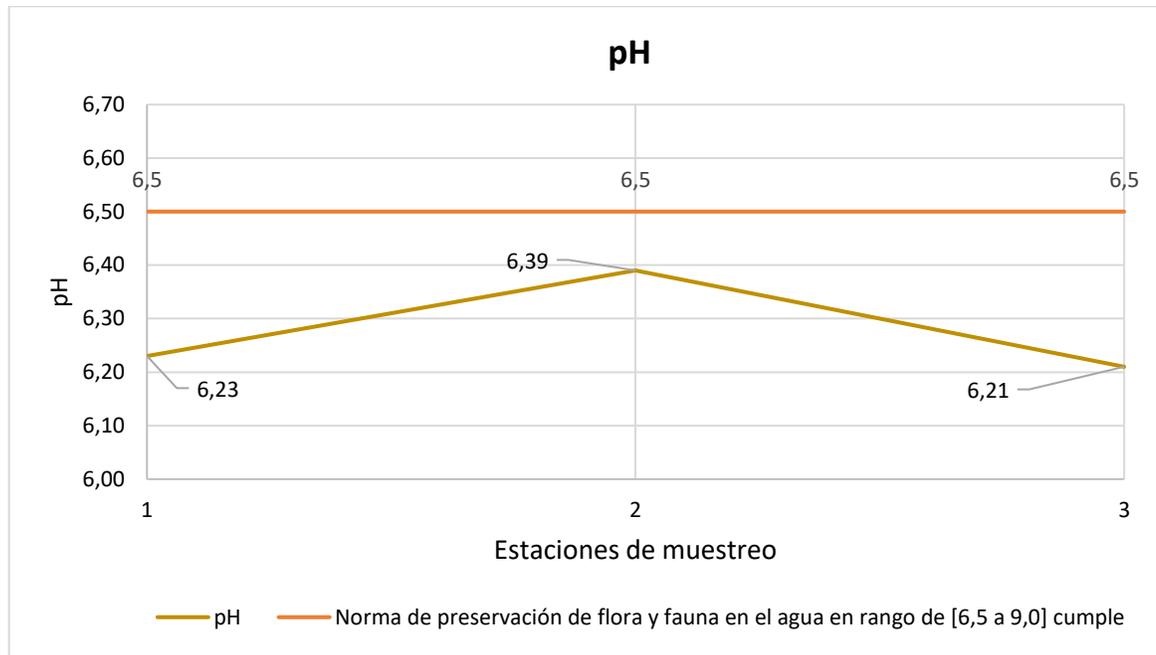


Fuente. Elaboración propia

La temperatura hídrica no excede el nivel permisible que establece la norma de la calidad ambiental para preservación de flora y fauna en el agua dulce cálida, que es de 32 °C. El comportamiento en alza de la temperatura se da porque la medición en la estación uno fue al inicio del día (7 am), donde el agua ha descendido su temperatura por el frío de la noche y además se presentan condiciones de nubosidad en el momento de muestreo, lo que reduce el ingreso de radiación solar. En la estación dos, el muestreo se realizó a las 10 am con un incremento notable en la irradiación solar lo que eleva la temperatura del agua levemente, pasando de 16,2°C a 17,6°C. Finalmente, en la estación tres el muestreo se realizó a la 1 pm con una muy alta radiación solar, lo que justifica el incremento en la temperatura en el río. Cuando se acrecienta la temperatura hace que los microorganismos aerobios descompongan con mayor velocidad la materia orgánica, y a la vez provoquen la disminución de la cantidad de oxígeno disuelto y se aumente la DBO que está relacionada con el proceso natural de desoxigenación de un cuerpo hídrico.

- **pH en las estaciones de muestreo**

Gráfica 2. Resultados de pH Vs Norma para preservación flora y fauna del agua



Fuente. Elaboración propia

El pH en la zona de estudio muestra un déficit ya que la norma de preservación de flora y fauna en agua dulce cálida establece un pH adecuado en un rango de [6,5 a 9] y en la gráfica 2 es evidente que está fuera del rango. El agua en la estación uno tiene una baja presencia de vertimientos antrópicos, pero la tendencia a acidificar el pH se puede dar de manera natural por la geoquímica del suelo, la dinámica del CO₂, el ácido carbónico y los ácidos húmicos; pues estos reducen el valor de pH naturalmente. En la estación dos se eleva el valor de pH y esto se da porque hay vertimientos puntuales cercanos a la estación de muestreo y a su vez hacen que disminuyan los iones H⁺ lo que provoca el aumento de pH en la estación. Finalmente el río recibe nuevamente sustancias ácidas que disminuyen el valor de pH y lo aleja más del rango permisible. La acidez en las aguas es una razón de peso que incide en la biota acuática, ya que provoca la migración de especies endémicas y hasta reducir la población por su muerte. De todos modos el valor de pH está cercano al punto de equilibrio y se finiquita que en estas concentraciones

el río es capaz de autodepurarse por su capacidad tampón ya que naturalmente las sustancias ácidas y básicas tienden a neutralizarse.

- **Conductividad en las estaciones de muestreo**

Gráfica 3. Resultados de Conductividad en el río Molino



Fuente. Elaboración propia

El Decreto 1594 de 1984 establece el valor permisible de conductividad para agua cruda y esta no puede ser > 1000 micro siemens/ cm^2 , en este caso la conductividad del río Molino en las tres estaciones de muestreo no la superan. Aunque se aprecia que la conductividad se comporta directamente proporcional a medida que avanza el río sobre la ciudad, esto indica que al aumentar los vertimientos sobre el río, se acrecientan los niveles de conductividad. Esta puede ser una razón de peso en circunstancias de bajo caudal junto a la presencia de vertimientos durante horas pico de contaminación hídrica, con estas características el proceso de dilución no es suficiente para presentar valores de conductividad establecidos en la norma y se puede corroborar la contaminación en el río por actividades domésticas e industriales.

- **Oxígeno disuelto en las en las estaciones de muestreo.**

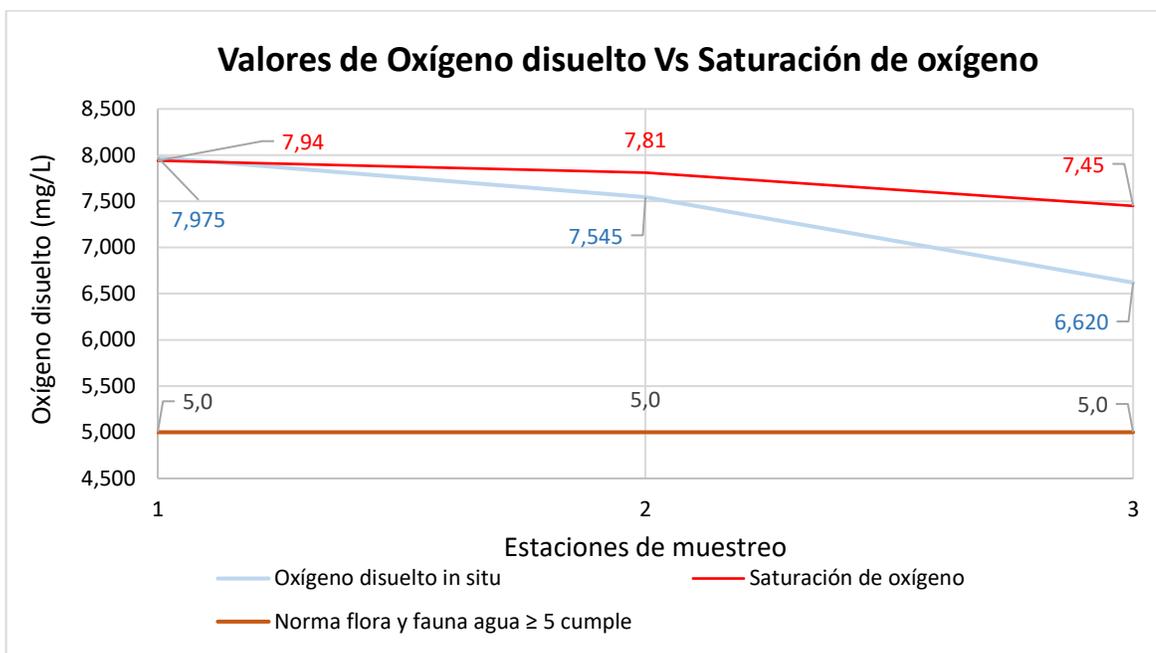
Los valores de oxígeno disuelto inicial y final en los tramos por cada estación de muestreo se promedian y se comparan con los datos de saturación de oxígeno teóricos, calculados a partir de la ley de Henry [27], como se muestra en el (Anexo 6), además se comparan con el límite permisible de OD para la preservación de flora y fauna en un cuerpo de agua dulce cálida.

Tabla 10. Valores promedio de OD en cada estación de muestreo

VARIABLE MEDIDA	UNIDADES	RIO MOLINO, PUEBLILLO (E ₁)	RIO MOLINO, BARRIO CENTRO (E ₂)	RIO MOLINO, BARRIO JUNIN (E ₃)
Oxígeno disuelto inicial	(mg/L)	8,0	7,52	6,57
Oxígeno disuelto final	(mg/L)	7,95	7,57	6,67
Oxígeno disuelto promedio	(mg/L)	7,975	7,545	6,62

Fuente. Elaboración propia.

Gráfica 4. Resultados de Oxígeno Disuelto in situ, saturación de oxígeno y norma para preservación de flora y fauna en el agua



Fuente. Elaboración propia

La gráfica 4 indica que los valores concentración de OD no son suficientes para causar la decadencia de la mayoría de los organismo acuáticos que según la norma para preservar flora y fauna en agua dulce cálida pueden adaptarse hasta niveles mínimos de 5 mg/L de oxígeno. Además no se presentaron datos por debajo de 2 mg/L que es el valor crítico que puede incidir en la eutrofización de un sector de la fuente hídrica.

En la estación uno se observa que el valor experimental de concentración de OD excede ligeramente el dato teórico de saturación de oxígeno, esto indica que se está dando el valor óptimo de aireación en el río. Al pasar a la estación dos, el valor de saturación de oxígeno está por encima de la concentración de OD en 0,265 mg/L lo que muestra una leve tendencia a disminución del OD presente en la fuente hídrica. En la estación final el valor de concentración de OD está por debajo del valor teórico de saturación de oxígeno en 0,83 mg/L, lo que indica que se provoca un descenso

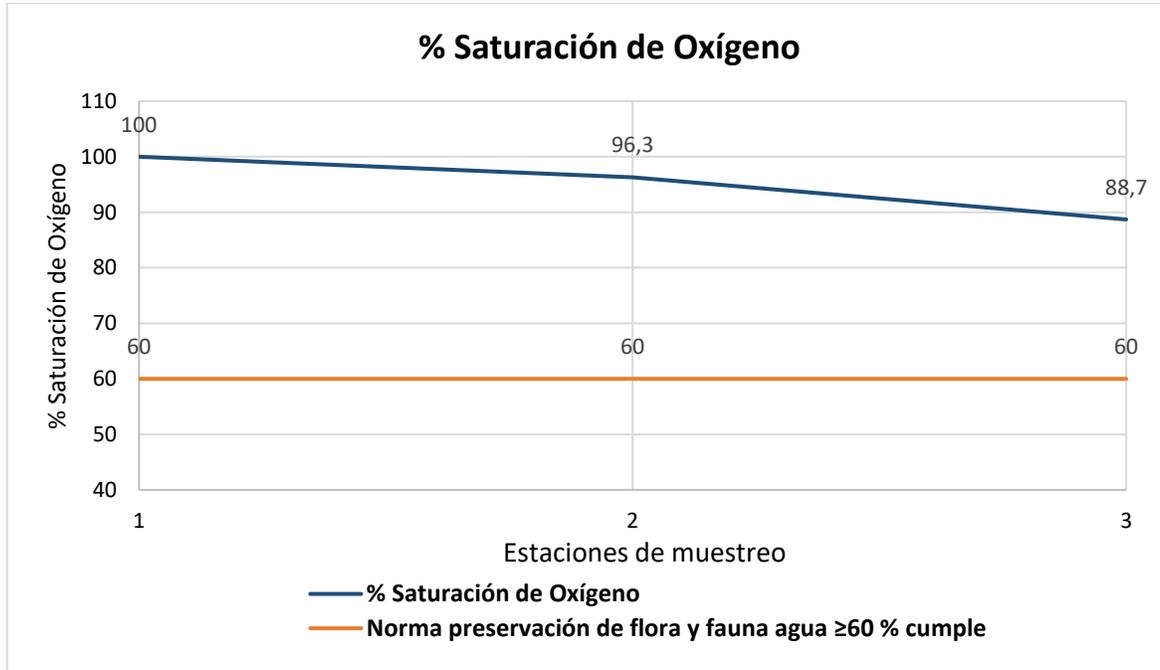
al nivel de OD presente en el río por acción de los vertimientos expulsados por los habitantes de Popayán.

Por otro lado, está la relación agua con vertimientos antrópicos, al verter materia orgánica al río, las bacterias aerobias la descomponen y así se disminuye el OD del agua. En la estación uno los vertimientos son mínimos, entonces el oxígeno en el agua está en condiciones normales. La razón principal de la tendencia a disminución del OD en la estación dos y tres, es el aumento de vertimientos. En la estación dos ya se exhibe un déficit de OD de 0,265 mg/L que ya muestra tendencia decadente y la estación tres resalta la intervención antrópica, pues disminuye el OD mostrando un déficit de 0,83 mg/L. El punto crítico se da en condiciones de bajo caudal, donde el nivel de dilución de los vertimientos es menor, entonces los microorganismos tienen mayor cantidad de materia orgánica para degradar y por tanto disminuye la concentración de OD en el río.

Por último, los valores de concentración de OD se comportan en relación a la topografía en la que transcurre el río, el nacimiento del río se da a una altitud aproximada de 2880 (m.s.n.m) y la primera estación de muestreo tiene una altitud de 1788 m, esto indica que la topografía del terreno lo hace un río de montaña [4]. Posteriormente el río entra al valle de Pubenza que es el lugar geográfico donde está ubicado Popayán. En el barrio centro se ubicó la estación dos que está a 1732 m.s.n.m. y finalmente pasa a la estación de muestreo tres que está a una altitud de 1701 m.s.n.m, esta característica indica que la diferencia de alturas de la estación de muestreo inicial a la final es de 87 metros. Si exponemos la relación existente entre altitud versus concentración de OD; se dice que, a mayor altitud menor OD y menor altitud mayor OD, esto resulta por la variación en la presión atmosférica. Como se observa en los resultados los valores de OD no se comportan como dicta la teoría, esto se debe a la intervención que ejerce el ser humano expulsando sus vertimientos al río. Así se deduce que se está alterando las características normales del río.

- **Porcentaje de saturación de oxígeno en las estaciones de muestreo**

Gráfica 5. Resultados de Porcentaje de saturación de Oxígeno Vs Norma para preservación flora y fauna del agua



Fuente. Elaboración propia

Los valores de porcentaje de saturación de oxígeno medidos con la sonda multiparámetros muestran un decremento paulatino mientras recorre la ciudad de Popayán, pero no es suficiente para incidir en la reducción de flora y fauna acuática según la norma. Vale la pena resaltar que el valor de porcentaje de saturación de oxígeno en la estación uno es de 100%, lo que indica que el oxígeno en el agua está saturado, esto se comprueba con el valor teórico de saturación de oxígeno hallado en la estación uno (Anexo 6) y compararlo con la concentración de OD presente en la estación (gráfica 4). Posteriormente las estaciones de muestreo restantes presentan índices decadentes en sus valores que indican que el factor antrópico interviene la fuente hídrica, pero sin ser relevantes para provocar deficiencia de oxígeno.

4.1.3. Resultados de parámetros fisicoquímicos de laboratorio

Con las muestras simples extraídas en la mitad del tramo en cada estación de muestreo se obtienen los valores de los parámetros fisicoquímicos.

Tabla 11. Variables medidas en laboratorio.

PARAMETROS MEDIDOS	UNIDADES	RIO MOLINO PUEBLILLO (E ₁)	RIO MOLINO BARRIO CENTRO (E ₂)	RIO MOLINO BARRIO JUNÍN (E ₃)
Color aparente	Pt/Co	37,9	43,2	45,4
Turbiedad	UNT	24,0	42,4	46,0
DBO ₅	mg/L	< 0,9	0,9	4,7
DQO	mg/L	< 15	< 15	< 15
SDT	mg/L	22,3	30,1	54,7
Nitratos (NO ₃)	mg/L	1,28	1,89	2,88
Nitritos (NO ₂)	mg/L	0,008	0,027	0,147
Dureza Total	mg/L	105,99	83,80	65,30

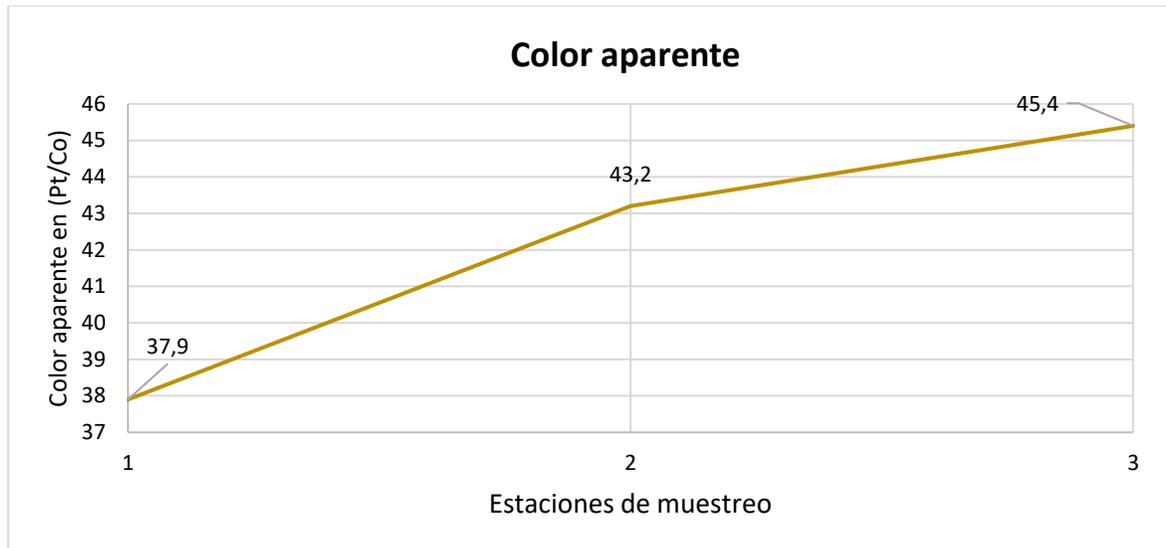
Fuente. Elaboración propia

El Anexo 5 muestra los resultados de los parámetros medidos en el laboratorio del Acueducto y Alcantarillado de Popayán y la Corporación Autónoma regional del Cauca.

4.1.4. Análisis de resultados parámetros fisicoquímicos de laboratorio

- **Color aparente en las estaciones de muestreo**

Gráfica 6. Resultados de color aparente en las estaciones de muestreo

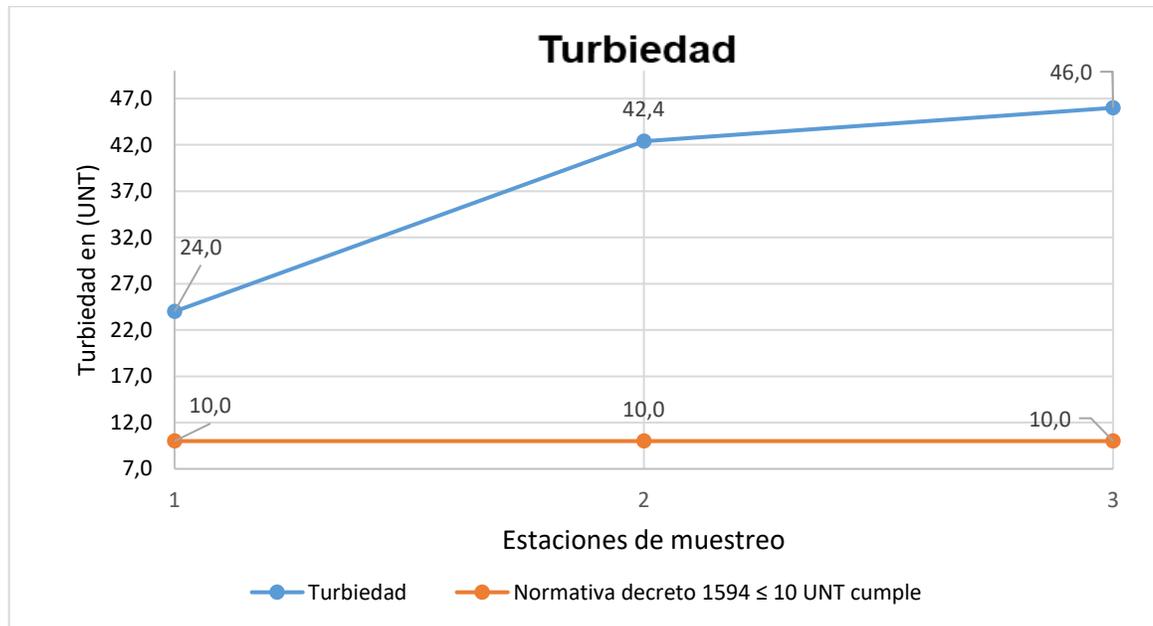


Fuente. Elaboración propia

La fuente hídrica no incumple los valores establecidos por Decreto 1594 de 1984 para agua cruda, el cual establece que los resultados deben ser \leq a 75 unidades (Pt/Co). Los resultados del parámetro se acrecientan mientras se avanza sobre las estaciones de muestreo, estableciendo que la ciudad de Popayán le aporta material en suspensión como arcillas que colorean el río Molino, esto se une a la intervención antrópica que le agrega sustancias químicas que alteran la tonalidad del río.

- **Turbiedad en las estaciones de muestreo**

Gráfica 7. Resultados de turbiedad en las estaciones de muestreo



Fuente. Elaboración propia

El Decreto 1594 de 1984 para agua cruda establece que su valor debe ser ≤ 10 unidades nefelométricas de turbiedad para que la fuente hídrica esté en sus condiciones naturales, como se observa en este caso, el valor de turbiedad supera lo establecido en las tres estaciones de muestreo. En la estación inicial la turbiedad es mayor que el valor permisible aunque el río no haya ingresado a la ciudad de Popayán, esta característica se da porque el río baja con alta turbulencia lo que trae material como arcilla y barro que restringe la visibilidad de la columna de agua. Al pasar a la estación dos se incrementa el valor de turbiedad en comparación al inicial en un 43,4 %, lo que puede estar asociado a que el río mantiene su tendencia de extracción de material arcilloso y barro de las orillas por el incremento del caudal. En la estación de muestreo final el río aun tiende a aumentar su turbiedad pero levemente y con seguridad se debe a que el material ya empieza a sedimentarse a razón del paso por el valle de Pubenza.

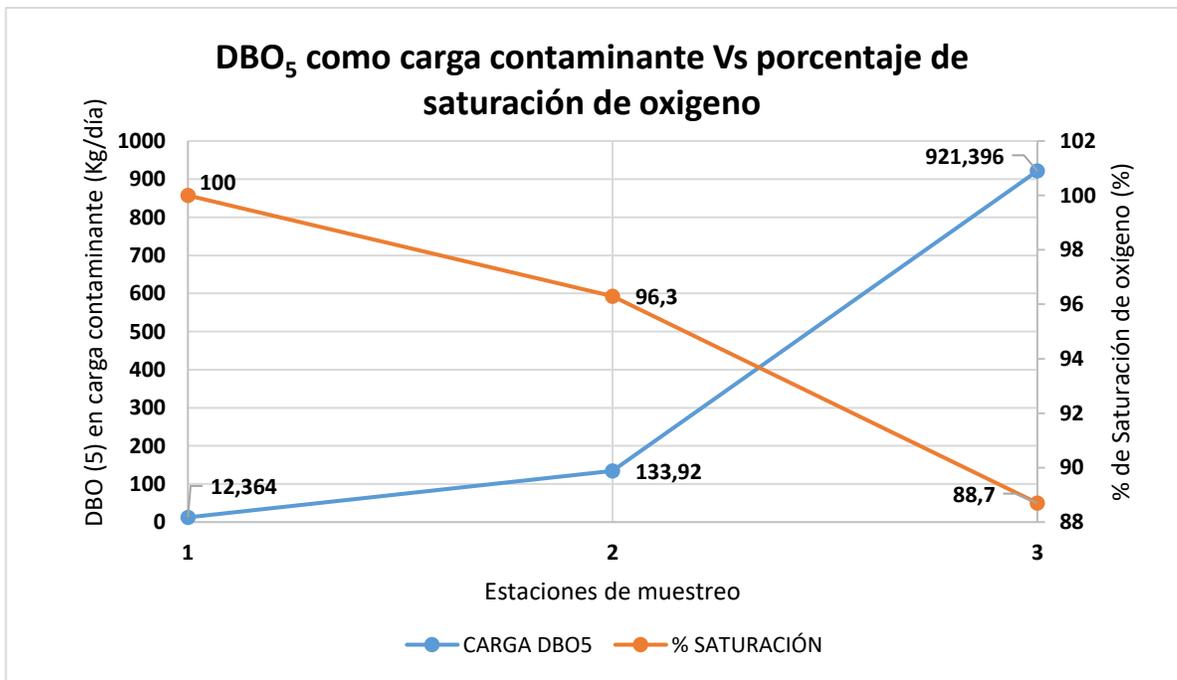
- **Demanda Biológica de Oxígeno (5) en las estaciones de muestreo**

Con los datos de DBO₅ en (mg/L) derivados de la caracterización fisicoquímica y los caudales (L/s) de las estaciones de muestreo, se determinaron las cargas contaminantes de DBO₅ para las tres estaciones.

Tabla 12. DBO₅ expresada en valores de carga contaminante.

ESTACION	DBO ₅ (mg/L)	CAUDAL (L/s)	CARGA CONTAMINANTE (Kg/día)
1	0,1	1431	12,364
2	0,9	1722	133,90
3	4,7	2269	921,396

Gráfica 8. Resultados de DBO₅ expresados en carga contaminante Vs Porcentaje de saturación de O₂ en las estaciones de muestreo.



Fuente. Elaboración propia

La gráfica 8 muestra el comportamiento de la DBO₅ expresada en valores de carga contaminante, en relación al porcentaje de saturación de oxígeno. Se observa que mientras el río avanza por la ciudad se incrementa la carga de la DBO₅, lo que es

coherente si se tiene en cuenta que recibe mayor cantidad de vertimientos de agua residuales. En la parte inicial, el río recibe una carga contaminante de 12,364 Kg/día de DBO₅ la cual se incrementa a 133,92 kg/día para la estación dos y posteriormente sube a 921,36 Kg/día para la estación 3 ubicada en el sector donde el río abandona la ciudad.

Los anteriores valores de carga se pueden correlacionar con el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, que al ser un parámetro indicador de contaminación orgánica al cual se le ha corregido la influencia de la temperatura y la presión atmosférica, permite realizar comparaciones entre diferentes puntos de muestreo. Se observa que cuando la carga orgánica recibida es menor como ocurre en la estación 1 el porcentaje de saturación de oxígeno es bastante bueno al alcanzar un 100 % de saturación, mientras que para los puntos 2 y 3 dichos valores de saturación disminuyen con el aumento de la carga.

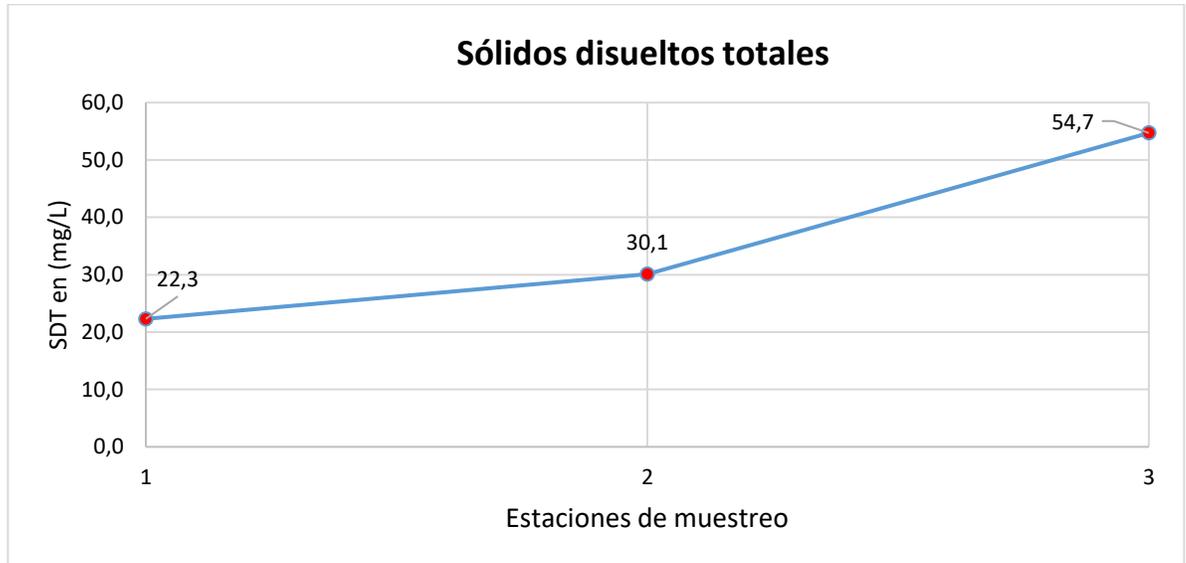
Al conocer esta situación sería de esperarse que tenga implicaciones en los valores obtenidos para las constantes de reaeración debido a que la cantidad de materia orgánica en el agua disminuye la captación de los gases provenientes de la atmósfera [36].

- **Demanda Química de Oxígeno en las estaciones de muestreo**

El resultado de la DQO en las tres estaciones de muestreo está por debajo de 15 mg/L. Esto quiere decir que hay una baja cantidad de compuestos químicos, tanto inorgánicos como orgánicos en el agua mientras es intervenida por los vertimientos de la ciudad de Popayán, Las aguas naturales sin intervención antrópica presentan valores de DQO cercanos a 20 mg/L en este caso se deduce que los niveles de material vertido son pocos; lo cual se ejemplifica con los niveles de concentración de oxígeno elevados.

- **Sólidos disueltos totales en las estaciones de muestreo**

Gráfica 9. Resultados de sólidos disueltos totales en las estaciones de muestreo

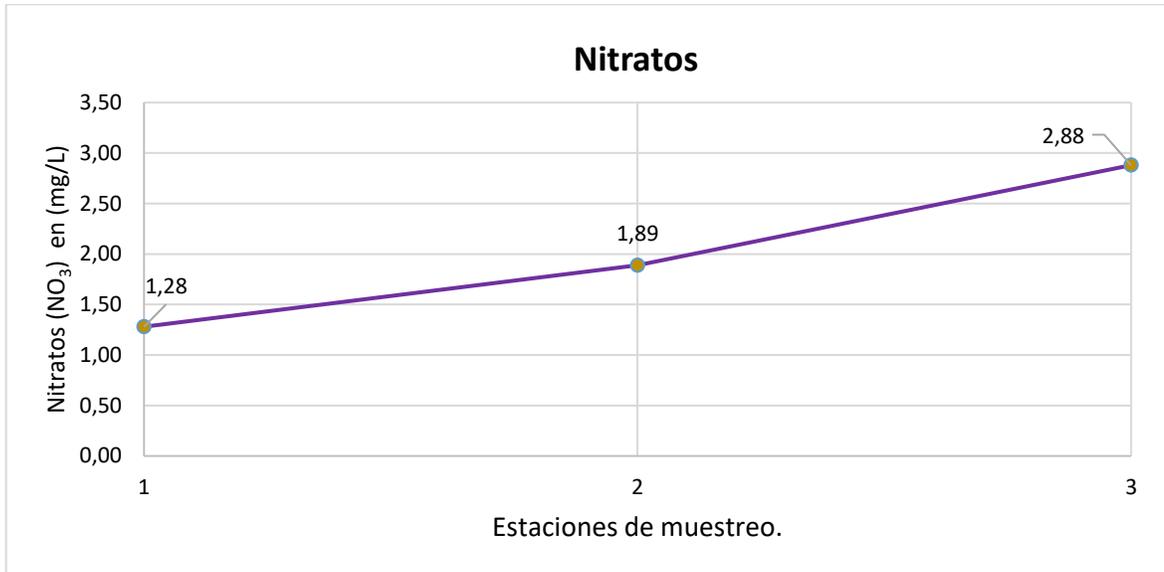


Fuente. Elaboración propia

El valor de sólidos disueltos totales es bajo en las tres estaciones muestreadas, aunque se acrecienta mientras se avanza sobre Popayán. La normativa para agua cruda establece que los resultados de SDT deben ser < 1000 mg/L para que el agua conserve condiciones normales en el cuerpo de agua. Estos valores mínimos de SDT indican una baja presencia de material soluble y coloidal que se han reducido por efecto de degradación biológica o sedimentación.

- **Nitratos en las estaciones de muestreo**

Gráfica 10. Resultados de Nitratos en las estaciones de muestreo

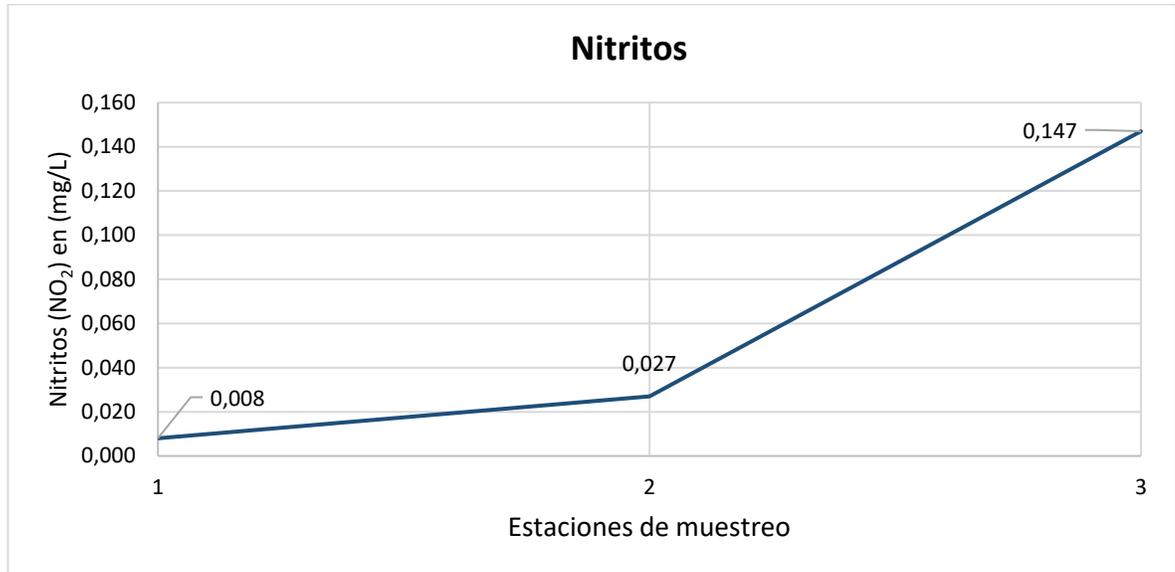


Fuente. Elaboración propia

El nitrato se encuentra naturalmente en el agua por la descomposición natural de proteínas de plantas y animales, para el río Molino los valores hallados en el muestreo indican que mientras el río avanza sobre la ciudad de Popayán adquiere una tendencia en alza en nitratos, pero no llegan al valor que establece la norma para agua cruda, para que se tome como un valor de contaminación que es mayor 10 mg/L.

- **Nitritos en las estaciones de muestreo**

Gráfica 11. Resultados de Nitritos en las estaciones de muestreo

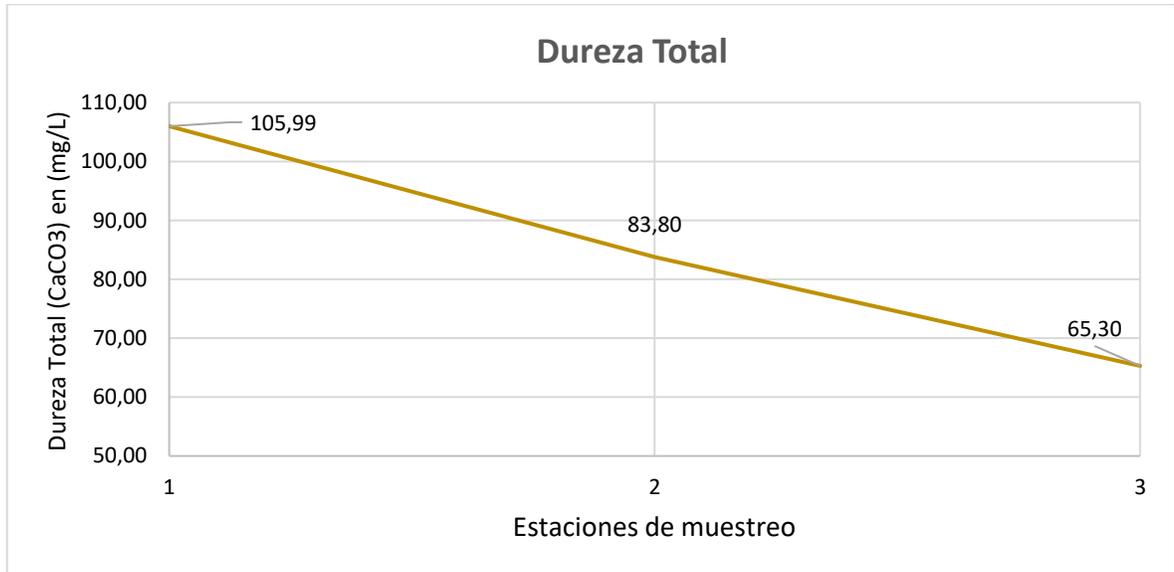


Fuente. Elaboración propia

Los nitritos en el río crecen mientras hacen su trayectoria sobre Popayán, pero aun así no excede el nivel permisible para agua cruda que es mayor 10 mg/L, el valor de nitritos está unido al resultado de nitratos en el río, ya que se comportan de manera directa, valores bajos de nitritos representan valores disminuidos de nitratos, y es así el comportamiento de ellos en el río Molino sobre Popayán para esta época de muestreo.

- **Dureza Total en las estaciones de muestreo**

Gráfica 12. Resultados de Dureza total en las estaciones de muestreo



Fuente. Elaboración propia

El decreto 1594 de 1984 para agua cruda establece los valores permisibles y deben ser ≤ 300 mg/L, en la gráfica 12 los resultados cumplen con la normativa. La dureza Total decrece en su recorrido por la estaciones, esto se debe a que el agua se ablanda por la disminución de iones bivalentes presentes en el agua que con frecuencia están en la piedra caliza sobre la capa superior del suelo.

4.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE TASAS DE REAIREACION PREDICTIVA

4.2.1. Estación de muestreo uno, río Molino en Pueblillo

Para obtener los valores de reaireación se hallaron los datos hidráulicos del tramo de estudio, en la tabla 13 se observan los resultados y el Anexo 6 especifica el paso a paso en la obtención de los datos hidráulicos.

4.2.1.1. Variables hidráulicas río Molino en Pueblillo

Tabla 13. Variables hidráulicas en la estación de muestreo uno

VARIABLE HIDRAULICA	UNIDADES	RESULTADO
Sección transversal (<i>Ancho</i>)	(metros)	9,0
Longitud en el tramo (<i>L tramo</i>)	(metros)	80
Velocidad media (<i>V med</i>)	(m/s) o (m/día)	0,252 o 21772,8
Cambio de elevación de la superficie del agua en el tramo (ΔH)	(metros)	1,87
Profundidad media en el cuerpo de agua (<i>H med</i>)	(metros)	0,643
Temperatura Hídrica del tramo (T°)	($^\circ C$)	16,2
Caudal (<i>Q</i>)	(m^3/s)	1,431

Fuente. Elaboración propia

Con los datos hidráulicos de la estación de muestreo ya es posible identificar las K_a predictivas con los métodos establecidos por la ANLA, como se observa en el anexo 6.

4.2.1.2. Resultados de K_a predictivas río Molino en Pueblillo

Tabla 14. Tasas de reaireación predictivas en la estación de muestreo uno

ESTACIÓN	K_a O'CONNOR (dia^{-1})	K_a OWENS (dia^{-1})	K_a TSIVOGLOU (dia^{-1})
Vereda Pueblillo	3,496	4,371	82,326

Fuente. Elaboración propia

4.2.1.3. Análisis de resultados K_a predictivas río Molino en Pueblillo

La velocidad media en el tramo es de 0,252 (m/s), la profundidad media es de 0,643 (m), la diferencia de alturas en el tramo es de 1,87 (m) y el caudal en este paraje del río es de 1,431 (m^3/s). Estos datos hidráulicos dictan la reaireación del río en el tramo y al utilizarse en la ecuaciones predictivas de reaireación hay un cambio notorio en los resultados, esto se debe a que la ecuación de Tsvoglou es creada para ríos con características de montaña, es decir que su descenso lo realiza por un lugar con pendiente pronunciada, entonces los niveles de velocidad, caudal y diferencia de alturas en la lámina de agua aumentan, y se comporta de igual manera la reaireación [13].

Las ecuaciones de reaireación de O'Connor y Owens son creadas para ríos que avanzan sobre planicie. En el trabajo de investigación se usan porque los valores de profundidad media y velocidad media en el tramo de estudio están en el rango permisible para usar las ecuaciones. Estas fórmulas predicen la K_a a partir de valores de velocidad media, profundidad media en el agua y constantes de regresión. Según indica Roberto Anguiano los resultados de K_a obtenidos por estas ecuaciones difieren drásticamente del valor de K_a real, si se aplican a fuentes lóxicas con características diferentes al río para el que fueron creadas [36], es así que se hace necesario identificar el comportamiento hidráulico que presenta el río mientras avanza sobre la ciudad.

Los datos hidráulicos en una fuente hídrica están directamente relacionados con el valor de tasa de reaeración: Se ha encontrado que la velocidad horizontal de la corriente es directamente proporcional a su capacidad de reaeración, mientras que existe una proporcionalidad inversa entre la profundidad y la concentración del oxígeno disuelto. De esta manera es de esperarse que en ríos con grandes pendientes y bajas profundidades, como los de montaña, aumente la velocidad del flujo y con ello sean mayores las posibilidades de disolver los gases como el oxígeno. Esto se hace más notable en ríos con caudales más grandes y expuestos a continuos choques con materiales propios de los ríos, como las rocas, lo que facilita la disolución de los gases [36].

4.2.2. Estación de muestreo dos, río Molino en el barrio centro

Los valores hidráulicos del tramo de estudio están en la tabla 15, observe el Anexo 6 para identificar las pautas necesarias para hallar los datos.

4.2.2.1. Variables Hidráulicas río Molino en barrio Centro

Tabla 15. Variables hidráulicas en la estación de muestreo dos

VARIABLE HIDRAULICA	UNIDADES	RESULTADO
Sección transversal (A_{ncho})	(metros)	7,7
Longitud en el tramo (L_{tramo})	(metros)	93
Velocidad media (V_{med})	(m/s) o (m/día)	0,357 o 30844,8
Cambio de elevación de la superficie del agua en el tramo (ΔH)	(metros)	0,39
Profundidad media agua (H_{med})	(metros)	0,568
Temperatura Hídrica del tramo (T°)	($^{\circ}\text{C}$)	17,6
Caudal (Q)	(m^3/s)	1,722

Fuente. Elaboración propia

Los datos hidráulicos permiten conocer las K_a predictivas en la estación de muestreo y el anexo 6 demuestra la metodología para hallar las K_a en el tramo de estudio.

4.2.2.2. Resultados de K_a predictivas río Molino en barrio Centro

Tabla 16. Tasas de reaireación predictivas en la estación de muestreo dos

ESTACIÓN	Ka O´CONNOR (dia⁻¹)	Ka OWENS (dia⁻¹)	Ka TSIVOGLOU (dia⁻¹)
Barrio Centro	5,182	7,177	21,629

Fuente. Elaboración propia

4.2.2.3. Análisis de resultados K_a predictivas río Molino en el barrio Centro

La velocidad media en el tramo es de 0,357 (m/s), la profundidad media de 0,568 (m), el caudal es de 1,722 (m³/s) y el cambio de elevación de la superficie del agua en el tramo es de 0,39 (m). Estos valores ya difieren de las condiciones hidráulicas del río en la primera estación. El valor de velocidad aumenta, la profundidad disminuye, el caudal se incrementa y el cambio de altura del agua en el tramo es menor. Con estas condiciones se espera que la reaireación aumente, pero ya se hace relevante la topografía del terreno. En los 93 (m) de longitud que tiene el tramo apenas desciende el agua 0,39 (m) de inicio a final, esto es un índice del cambio al que se expone el cuerpo de agua al ingresar al valle de Pubenza, por esta razón los resultados de K_a predictivas utilizadas son más cercanos. Aunque los valores hidráulicos como velocidad media y caudal dictan que aunque el río entre a zona de planicie aún se comporta como un río típico de montaña, esto lo comprueba el Acueducto y Alcantarillado de Popayán que es uno de los entes gubernamentales encargados de la sostenibilidad del río [4]

4.2.3. Estación de muestreo tres, río Molino en el barrio Junín

En la tabla 17 se observan los valores hidráulicos de la estación.

4.2.3.1. Variables hidráulicas río Molino en el barrio Junín

Tabla 17. Variables hidráulicas en la estación de muestreo tres

VARIABLE HIDRAULICA	UNIDADES	RESULTADO
Sección transversal (A_{ncho})	(metros)	9,5
Longitud en el tramo (L_{tramo})	(metros)	95
Velocidad media (V_{med})	(m/s) o (m/día)	0,438 o 37843,2
Cambio de elevación de la superficie del agua en el tramo (ΔH)	(metros)	0,93
Profundidad media agua (H_{med})	(metros)	0,463
Temperatura Hídrica del tramo (T°)	($^{\circ}\text{C}$)	20,2
Caudal (Q)	(m^3/s)	2,269

Fuente. Elaboración propia

Los datos hidráulicos permiten hallar la K_a predictiva en el tramo de estudio, así mismo el anexo 6 plantea la metodología para hallar la K_a .

4.2.3.2. Resultados de K_a predictivas río Molino en barrio Junín

Tabla 18. Tasas de reaeración predictivas en la estación de muestreo tres

ESTACIÓN	K_a O'CONNOR (día ⁻¹)	K_a Owens (día ⁻¹)	K_a TSIVOGLOU (día ⁻¹)
Barrio Junín antes de unirse al río Ejído	8,295	12,778	65,894

Fuente. Elaboración propia.

4.2.3.3. Análisis de resultados K_a predictivas río Molino en el barrio Junín

Las variables hidráulicas como caudal y velocidad se acrecientan mientras el río avanza sobre Popayán. El valor de profundidad media decrece en las estaciones muestreadas, en la estación uno 0,643 (m) en la dos 0,568 (m) y en la tres 0,463 (m), esto indica que la profundidad se minimiza por entrar en una zona de planicie. La diferencia de alturas en la superficie del agua en el tramo se comporta de esta manera en cada estación: La primera tiene un valor de 1,87 (m), la segunda estación baja hasta los 0,39 (m) y finalmente la estación tres que aumenta altura hasta los 0,93 (m)

Los valores hidráulicos influyen en el resultado de la reaeración ya que el río sigue comportándose como río de montaña a pesar de haber pasado por el valle de Pubenza, su velocidad aumenta, su caudal se acrecienta, la profundidad disminuye y con ello se airea más la columna de agua y al mismo tiempo se aumenta la diferencia de alturas en la superficie del agua en el tramo 3, en comparación a la estación dos.

4.2.4. Análisis estadístico a las Ka obtenidas con métodos predictivos en las estaciones muestreadas.

Tabla 19. Resultados de Ka predictivas en las tres estaciones de muestreo.

ESTACIÓN	Ka O´CONNOR (dia⁻¹)	Ka OWENS (dia⁻¹)	Ka TSIVOGLOU (dia⁻¹)
Vereda Pueblillo	3,496	4,371	82,326
Barrio Centro	5,182	7,177	21,629
Barrio Junín	8,295	12,778	65,894

Fuente. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la Ka por los métodos predictivos muestran valores diferentes, lo que era predecible si se piensa en que son modelos diseñados en diferentes condiciones. Las pruebas de O´Connor y Owens poseen valores numéricamente más cercanos, posiblemente por ser mediciones predictivas hechas para ríos de planicie. Los valores hallados para estos dos métodos fueron contrastados por la prueba no paramétrica de Moses, arrojando como resultados una significancia de 0,8 con un 95% de confianza (Anexo 7), indicando que entre los dos métodos no existen diferencias significativas. Cabe mencionar que se realizó esta prueba porque los resultados obtenidos en las Ka tienen tendencia con alta variabilidad o dispersión, que al aplicarle Mann-Whitney o Kolmogorov-Smirnov que se aplican para datos de tendencia central, descartaría información que se considera como atípica, lo que no es conveniente debido al bajo número de datos con los que se cuenta [35]

Por otro lado al contrastar los valores de Ka obtenidos para O´Connor y Owens de manera independiente con los obtenidos para la prueba semi-empírica de Tsvoglou si se encontraron diferencias significativas (Significancia 0,00 O´Connor- Tsvoglou) (Sig 0,00 Owen Tsvoglou), lo que debe estar asociado a que los valores de Ka propuestos por Tsvoglou son para ríos de montaña, mientras que O´Connor y Owens proponen las Ka para río de planicie.

4.3. RESULTADOS DE TASA DE REAIREACION EXPERIMENTAL

La tabla 20 muestra los parámetros necesarios para hallar la tasa de reaeración del río Molino de manera experimental, con datos de oxígeno disuelto y saturación de oxígeno en cada tramo de estudio. El anexo 6 pauta la metodología consecuente para hallar la K_a experimental.

4.3.1. Resultados de K_a experimental en las estaciones de muestreo

Tabla 20. Tasas de reaeración experimentales en las estaciones de muestreo

TRAMO	C_{final} (mg/L)	$C_{inicial}$ (mg/L)	$C_{saturación}$ (mg/L)	K_a exp ($día^{-1}$)
Vereda Pueblillo	7.95	8.00	7,94	487,6860
Barrio Centro	7.57	7.52	7,81	62,7662
Antes de unirse al Ejido	6.67	6.57	7,45	48,0598

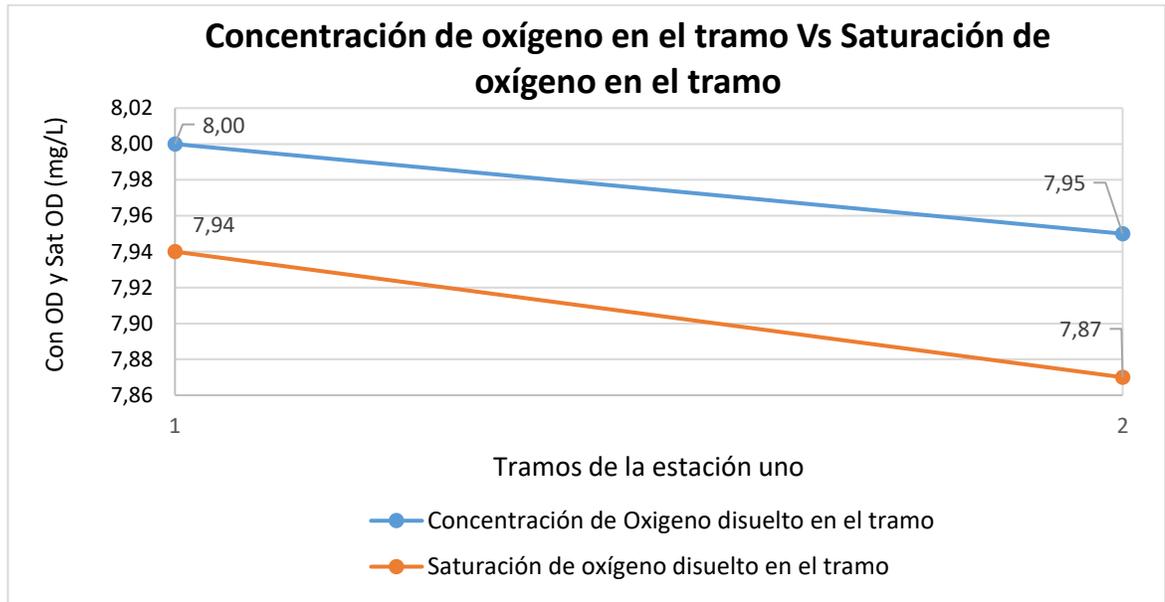
Fuente. Elaboración propia.

4.3.2. Análisis de resultados de K_a experimental en las estaciones de muestreo.

- **Estación de muestreo río Molino en la vereda Pueblillo.**

Se analiza la K_a experimental en la zona de estudio indagando las características de adquisición o pérdida de Oxígeno disuelto en el tramo de estudio. Y se compara con el comportamiento de la saturación del oxígeno en el tramo.

Gráfica 13. Valores de Oxígeno disuelto en el tramo de la estación uno

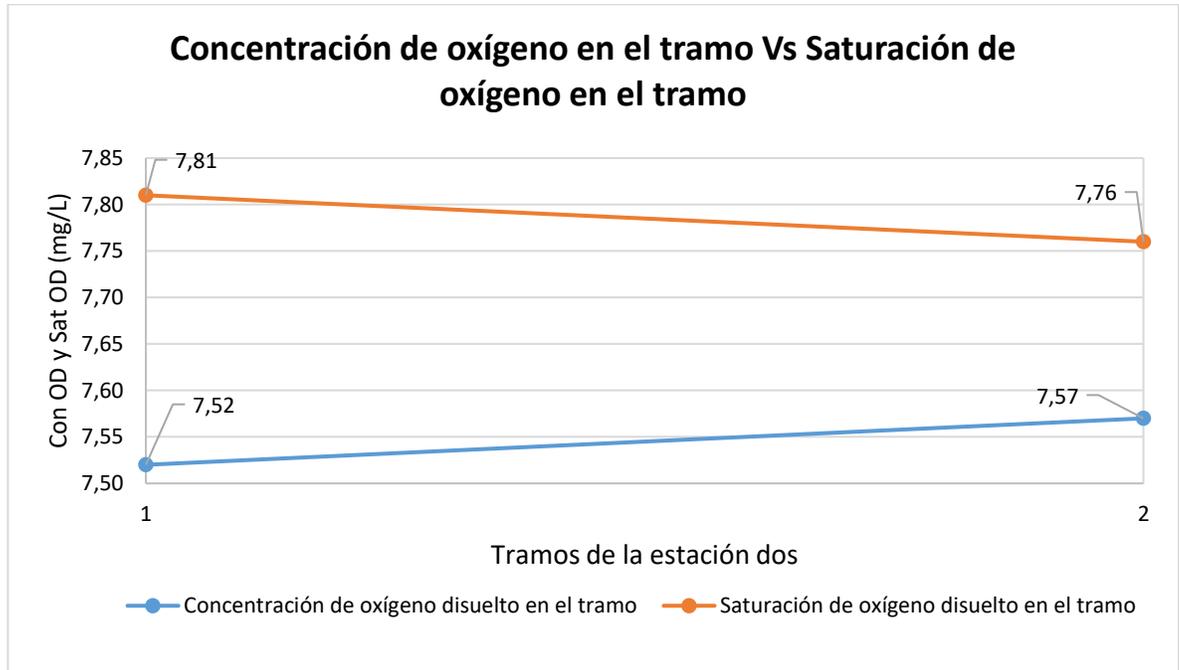


Fuente. Elaboración propia.

La gráfica 13 muestra una tendencia decadente en la concentración de oxígeno disuelto en el tramo y de igual manera se comporta la saturación de oxígeno. Conjuntamente se observa que la concentración de OD es mayor que la saturación de oxígeno de inicio a fin del tramo, esto quiere decir que el cuerpo de agua recibe suficiente oxígeno para superar el nivel de saturación de oxígeno provocando sobresaturación en el agua. La razón se debe a que la estación de muestreo se encuentra ubicada en un sector con características escarpadas, típico de un río de montaña, en donde las variables hidráulicas como velocidad, caudal y diferencia de alturas en la lámina de agua están aumentando y así se crea el valor óptimo de aireación. Esto se demuestra con un valor de tasa de reaireación experimental elevado.

- Estación de muestreo río Molino en barrio Centro.

Gráfica 14. Valores de Oxígeno disuelto en el tramo de la estación dos

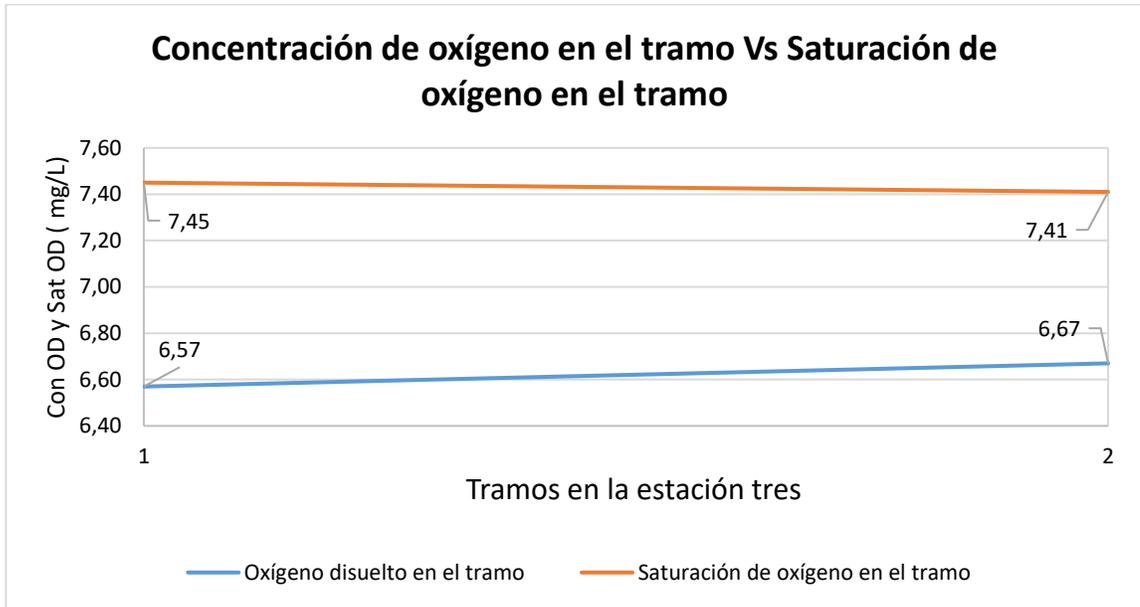


Fuente. Elaboración propia

El comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto en la estación dos se da así: el valor inicial es menor que el valor final, esto quiere decir que se está aireando el tramo de estudio. Mientras que a diferencia de la estación uno, el valor de saturación de oxígeno se encuentra por encima de los valores de concentración de oxígeno disuelto, esto quiere decir que aunque el río se airea, aun no presenta el valor óptimo de aireación. Las causas a que se potencialice la concentración de oxígeno disuelto en la estación dos son: inicialmente el aumento del caudal como se observa en las variables hidráulicas de la estación, que a su vez viene con una velocidad que va en alza y también disminuye la profundidad media del río, esta última apreciación hace que el oxígeno presente en la atmósfera ingrese con mayor facilidad a la columna de agua y se de la reaireación en el tramo de estudio.

- Estación de muestreo río Molino en el barrio Junín.

Gráfica 15. Valores de Oxígeno disuelto en el tramo de la estación tres



Fuente. Elaboración propia

El comportamiento de la saturación de oxígeno va disminuyendo gradualmente, mientras que la concentración de oxígeno disuelto va ascendiendo. Esta apreciación muestra que el agua en el tramo de estudio se está oxigenando. Las variables hidráulicas que relacionan el aumento de la concentración de oxígeno van subiendo como se muestra en los datos hidráulicos de la estación, el caudal aumenta, así mismo la velocidad y la profundidad del río disminuye, se deduce que el comportamiento del oxígeno es igual a la estación dos y esta tendencia muestra aireación en el tramo.

Finalmente si se puntualizan los valores de tasa de reaireación experimental, estos indican que la cantidad de oxígeno que se adhiere al cuerpo de agua está decayendo mientras avanza el río Molino sobre Popayán, aunque los resultados de concentración de oxígeno disuelto en los tramos demuestran que está en sobresaturación para la primera estación y en la estación dos y tres el nivel de oxígeno vaya en alza. Al final ya interviene el factor antrópico pues aunque el río se

esté aireando por sus condiciones naturales, los vertimientos con material orgánico han provocado que los microorganismos disminuyan la concentración de oxígeno del valor inicial óptimo y al final que se presente decadencia de OD en el agua.

4.3.3. Análisis estadístico para Ka predictivas respecto a las Ka experimental

Tabla 21. Resultados de Ka predictivas Vs Ka experimentales en las estaciones muestreadas.

ESTACIÓN	Ka O´CONNOR (dia ⁻¹)	Ka OWENS (dia ⁻¹)	Ka TSIVOGLOU (dia ⁻¹)	Ka EXP (día ⁻¹)
Vereda Pueblillo	3,496	4,371	82,326	487,6860
Barrio Centro	5,182	7,177	21,629	62,7662
Barrio Junín	8,295	12,778	65,894	48,0598

Fuente. Elaboración propia.

En la tabla 21 se muestran todos los valores de Ka determinados por los diferentes métodos, al realizarle la prueba no paramétrica de Moses entre los métodos predictivos con el experimental mostradas en el Anexo 7, se encontró que O´Connor y Owens muestran valores con diferencias significativas respecto a los encontrados para la medición experimental (Sig 0,00 O´Connor-Experimental), (Sig 0,00 Owens - Experimental), indicando que estos coeficientes de reaireación experimentales se alejan al comportamiento de los coeficientes de río de planicie.

Por otro lado al contrastar la metodología semi-empírica de Tsivoglou con la experimental determinada en este trabajo, se encontró un valor de significancia de 0.80, indicando que no hay diferencias estadísticamente entre los datos obtenidos, por lo que se puede inferir que el método predictivo que mejor se ajusta a las condiciones experimentales es el de Tsivoglou.

Al realizar un balance de las pruebas estadísticas realizadas, se puede notar que el sector del río Molino estudiado se aleja en sus valores de Ka al comportamiento de un río de planicie, al encontrarse diferencias significativas entre el valor

experimental y las estimaciones hechas con los métodos de O'Connor y Owens, no obstante el método semi-empírico de Tsvoglou no mostró diferencias significativas con el experimental, indicando que es el modelo no experimental de mayor similitud y que los tramos de la fuente hídrica estudiados poseen más características de río de montaña que de río de planicie.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Al establecer las características fisicoquímicas del agua del río Molino en las estaciones de muestreo y compararlas con la normativa para la preservación de flora y fauna, agua cruda y agua segura, se evidenció que el agua respeta la normativa. A excepción del pH y la turbiedad, estos datos son irrelevantes pues los de mayor importancia en la calidad del agua como es la temperatura, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO, conductividad y sólidos disueltos totales indican que el río Molino tiene buenas condiciones a pesar de ser intervenido por los vertimientos de los ciudadanos Payaneses para esta época de muestreo.

Los métodos predictivos utilizados para obtener la tasa de reaireación del río Molino sobre Popayán muestran resultados oscilantes entre las fórmulas de Tsivoglou, O'Connor y Owens. Si bien el río ingresa a una zona de planicie como el valle de Pubenza aún no adquiere características hidráulicas para considerarse como río de planicie, por esta razón los resultados de las fórmulas de O'Connor y Owens que son creadas para estos ríos se descartan. Los valores que dictan la reaireación para la zona de estudio son los obtenidos por el método de Tsivoglou.

Las deducciones del coeficiente de reaireación derivados del método de Tsivoglou en las estaciones muestreadas no presentan diferencias estadísticamente significativas con los resultados adquiridos por el método experimental, esto valida este método predictivo aplicado en este trabajo de investigación.

5.2. RECOMENDACIONES

La temporada en que se realizó el muestreo para establecer la tasa de reaeración del río Molino coincide con época de lluvia, como se demuestra en las variables hidráulicas medidas en las estaciones de muestreo, por tanto los valores de reaeración son elevados, como se observa en los resultados. Se hace significativo establecer el valor de reaeración del río para la temporada de verano, donde el nivel del caudal disminuye, y los parámetros fisicoquímicos no cumplen con la normativa y así se reduce la tasa de reaeración del río.

Existe un método experimental para hallar la tasa de reaeración que involucra la inyección de sustancias volátiles (gas trazador), se ha comprobado que el resultado de tasa de reaeración con este método es más acertado al real, por tanto se recomienda hallar la reaeración del río Molino con el método de inyección de sustancias volátiles [36].

IV. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Forero, “Caracterización físico-química y microbiológica del agua del río Soacha, Cundinamarca, Colombia.,” *Carácter. físico-química y microbiológica del agua del río Soacha, Cundinamarca, Colomb.*, vol. 6, no. 2, pp. 2, 2015.
- [2] C. Suarez and M. Monrroy, “Factibilidad en el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas generadas en UPTC Tunja mediante humedales artificiales.,” vol. 1, no. 2, pp. 16–98, 2004.
- [3] L. Muñoz, C. Costa, M. Rivera, and M. García, “Plan nacional de manejo de aguas residuales en Colombia.,” *Vasa*, vol. 1, pp. 1–36, 2004.
- [4] D. Ambiental., “Cuenca Molino,” *Acueducto y Alcantarillado de Popayán*. [Online]. Available: <http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-molino/>.
- [5] G. Masters and W. Ela, *Introducción a la Ingeniería medio Ambiental*, Tercera. 2008.
- [6] DANE, “Proyecciones de Población nacional, departamental y municipal en Colombia desde 1985 a 2020.,” *Información estadística*, 2005. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.
- [7] D. Ambiental., “Parámetros fisicoquímicos medidos en el río Molino (2005-2014) mientras recorre la ciudad de Popayán.,” *Acueducto y Alcantarillado Popayán.*, pp. 1-9, 2014.
- [8] C.M. de Popayán, “Plan de desarrollo municipal,” *Alcaldía de Popayán*, vol.1, no.92, pp.27-30.

- [9] S. de salud Municipal., “Caracterización de la situación de morbilidad y mortalidad de los niños y niñas de cero a cinco años Departamento del Cauca.,” *Secr. Salud Dep. Cauca.*, vol. 1, pp. 19–21, 2016.
- [10] D. Zuluaga, “Reporte de resultados muestras de agua del rio Molino.,” *Corp. Autónoma Reg. del Cauca.*, pp. 1-2, 2016.
- [11] Ministerio del Ambiente, “Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua,” in *Anexo 1 Del Libro VI Del Texto Unificado De Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente.*, 2014, pp. 13-14.
- [12] J. Holguín and A. Camacho, “Determinación de la tasa de reaireación en un río de montaña Colombiano mediante el uso de trazadores.,” *Artículo*, p. 2., 2003.
- [13] ANLA, “Metodología para la definición de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial.,” *Aut. Nac. Licencias Ambient.*, p. 17, 2013.
- [14] CVC, “Estudio del proceso de reaireación en el río Cauca.,” in *Capitulo 2. Antecedentes y Marco Conceptual.*, p. 4-6.
- [15] O’Connor D and Dobbins W, “Mechanism of reaeration in natural streams,” *ADCE trans.*, p. 641-684, 1958.
- [16] Orlob and Krenkel, “Mathematical submodels in Water Quality Systems,” *Dev. Evironmental model.*, pp. 45-49, 1962.
- [17] Y. Fok and J. Stall, “Hydraulic geometry of Illinois strems,” *Univ. Illinois water Resour. Cent.*, 1972.
- [18] Tsivoglou E and Wallace, “Tracer measurement of reaeration III. Predicting the reaeratile,” *Water polution Control.*, p. 2669-2689, 1972.
- [19] Churchill M, Elmore H, and Buckingham R, “The prediction of stream reaeration rates,” *J. Sanit. Eng. Div.*, p. 1-46, 1962.

- [20] M. Owens, R. Edwards, and J. Gibbs, "Some reaeration studies in streams," *J. Air Water Pollut.*, p. 469-486, 1964.
- [21] W. Langbein and W. Durum, "The aeration capacity of streams," *U.S.A. Geol. Surv. Circ.*, 1967.
- [22] A. de Popayán, "Geografía de Popayán," 1983. [Online]. Available: <http://popayan.gov.co/ciudadanos/popayan/nuestra-geografia>.
- [23] J. Maya, G. Muñoz, J. Bolaños, and L. Recaman, *Plan de ordenación y manejo de la subcuenca río Molino - quebrada Pubús*. Popayán, 2006.
- [24] N. T. Colombiana, "NTC ISO 3550-2 calidad del agua, vocabulario parte dos.," *NTC*, 1996. [Online]. Available: <https://prezi.com/uvoxlj8-2cv8/norma-tecnica-colombiana-ntc-3650-2/>.
- [25] IDEAM, "Guía Para El Monitoreo De Vertimientos, Aguas Superficiales Y Subterráneas.," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, p. 9-17, 2013.
- [26] IDEAM, "Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales.," *Subdirección Hidrol. - Lab. Calid. Ambient.*, vol. 3, p. 3-7, 2007.
- [27] J. A. Romero, *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Editorial Colombiana de Ingeniería., 2004.
- [28] M. García *et al.*, "El agua," in *El medio ambiente en Colombia*, 1998, p. 47,48.
- [29] C. Sawyer, P. Mc Carty, and G. Parkin, *Química para Ingeniería Ambiental Sawyer..pdf*, 4th ed. Mc Graw-Hill, 2001.
- [30] A. de protección de la Salud, "Los Nitratos y los Nitritos y el agua de consumo," *Agencia protección la salud Y Segur. Aliment.*, p. 2-4, 2003.
- [31] S. Aguinaga, "Manual De Procedimientos Analíticos Para Aguas y Efluentes basado en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.," *Dir. Nac. del medio Ambient.*, p. 174, 1996.

- [32] IDEAM, "Medición Del Caudal," in *Capítulo 3*, 2016, p. 1-5.
- [33] J. V. Rivera Gutiérrez, "Determinación de las tasas de oxidación, nitrificación y sedimentación en el proceso de autopurificación de un río de montaña.," vol. 24, no. 2, p 3-6, 2016.
- [34] A. Gaudy, "Atmospheric oxygenation in a simulated stream," *J. Sanit. Eng. Div.*, pp. 314-344, 1968.
- [35] M. Gómez, "El procedimiento de pruebas no paramétricas," in *Estadística no paramétrica*, 2005, pp. 396-396.
- [36] J. Anguiano Valencia, "Determinación del coeficiente de reaireación en un tramo corto de un río caudaloso con flujo turbulento, mediante el uso de los trazadores hexafluoruro de azufre y Rodamina WT.," *Univ. de Michoacana San Nicolas Hidalgo*, p. 25,83, 2012.

ANEXOS

Anexo 1. Parámetros fisicoquímicos del río Molino en Popayán (2005 - 2014)

SITIO	RIO MOLINO VEREDA PUEBLILLO										
	UNIDAD DE MEDIDA	2005	2006	2006	2007	2008	2008	2008	2008	2009	2009
		Noviembre 04	Julio 12	Noviembre 20	Julio 18	Marzo 06	Mayo 29	Agosto 04	Octubre 22	Julio 22	Diciembre 07
Caudal	(Litros/Segundo)	Sin Dato (S.D)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	6,72	7,33	7,45	8,07	7,1	5,82	7,45	6,68	7,07	7,17
Temperatura	(°C)	18,7	14,9	19,2	16,7	17	19,17	18,5	19,9	19	16,6
Conductividad	(us/cm)	52	38,9	61,6	97,8	47	40	105	50,9	53,4	40,9
Oxígeno disuelto	(mg/L)	5,98	7,15	6,29	6,84	7,2	5,79	4,38	5,62	7	7,36
Color	(mg/L)	19,1	5,7	19,1	11	132	72	10	38	25	18
turbiedad	(UNF)	6	1	5	3,99	348	81,1	4,8	37,2	11,9	6,7
DBO5	(mg/L)	0,2	< 7	0,3	0,9	< 0,5	< 0,5	0,6	< 0,5	< 0,5	< 0,5
DQO	(mg/L)	4	< 4	5,3	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	11,4	6,4
SST	(mg/L)	29	1,8	6,6	11,3	813	104	6,8	55,7	36	25
Nitratos (NO3)	(mg/L)	0,4	0,41	0,45	0,36	5,12	1,36	0,33	0,82	0,94	0,53
Nitritos (NO2)	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	0,06	0,05	0,03
Fosfatos (PO4)	(mg/L)	0,26	0,02	0,14	< 0,01	0,29	0,21	0,09	0,09	S.D	S.D
Dureza	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	42	24	15,2	18,2	6,7
Coliformes totales	(NMP)	>2419	1124 0	> 24196	> 2419, 6	> 2419,6	> 2419, 6	> 2419,6	> 2419,6	> 2419 ,6	S.D

Coliformes fecales	(NMP)	19,4	520	> 24196	> 2419,6	1299,7	435,2	> 2419,6	19863	365,4	S.D
---------------------------	-------	------	-----	---------	----------	--------	-------	----------	-------	-------	-----

PARAMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	RIO MOLINO VEREDA PUEBLILLO								
		2010	2010	2011	2011	2011	2011	2012	2012	2012
		Septiembre 22	Diciembre 02	Marzo 08	Junio 28	Septiembre 06	Noviembre 22	Marzo 29	Julio 26	Noviembre 27
Caudal	(Litros/Segundo)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	7,45	7,56	6,75	6,3	6,9	6,7	7,01	7,46	7,37
Temperatura	(°C)	16,1	16,9	18,9	13	14,2	16,9	16,3	16,7	16,9
Conductividad	(us/cm)	68	45	27,2	53	65,9	56,9	47,2	70	73,4
Oxígeno disuelto	(mg/L)	7,89	6,93	4,03	6,1	8,44	8,35	6,94	8,19	7,28
Color	(mg/L)	17	22	106	11	10	53	54	34	26
Turbiedad	(UNF)	5,3	8,5	48,7	4,6	4,2	81,2	44,9	5,2	22,9
DBO5	(mg/L)	< 0,5	< 0,5	0,5	0,7	0,7	2,1	< 0,5	0,8	0,5
DQO	(mg/L)	< 4	31	10	10	4	4	< 4	12,3	< 10
SST	(mg/L)	37	45,8	520	7	6,8	70	88	50,6	25,6
Nitratos (NO3)	(mg/L)	0,57	0,5	2,3	0,36	0,35	1,26	0,71	0,54	1,81
Nitritos (NO2)	(mg/L)	0,03	< 0,02	0,16	0,02	0,02	0,09	0,04	0,07	0,05
Fosfatos (PO4)	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D

Dureza	(mg/L)	18,2	8,7	13,2	23,7	21,6	28,2	17	22,1	23,7
Coliformes totales	(NMP)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
Coliformes fecales	(NMP)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D

SITIO		RIO MOLINO VEREDA PUEBLILLO					
PARAMETROS	UNIDAD DE MEDIDAD	2013	2013	2014	2014	2014	2014
		Septiembre 12	Noviembre 06	Abril 14	Julio 14	Septiembre 23	Octubre 29
Caudal	(Litros/Segundo)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	7,7	7,5	7,79	7,09	7,23	7,66
Temperatura	(°C)	15,9	16	15,1	19,5	15	14,6
Conductividad	(us/cm)	78,5	69,9	45,2	66,1	75,1	73
Oxígeno disuelto	(mg/L)	4,72	7,51	7,87	7,65	5,69	8,75
Color	(mg/L)	23	22	29	9	26	52
Turbiedad	(UNF)	20,8	18,1	41,7	11,2	9,2	74,8
DBO5	(mg/L)	0,5	0,5	0,5	0,7	12	0,8
DQO	(mg/L)	4	10	4	4	29	22
SST	(mg/L)	17,3	55	67,8	20,8	53,3	122
Nitratos (NO3)	(mg/L)	0,45	0,71	0,57	1,68	1,14	1,29
Nitritos (NO2)	(mg/L)	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fosfatos (PO4)	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
Dureza	(mg/L)	40,8	24	26,4	29,8	44,9	42,1

Coliformes totales	(NMP)	5480	23000	1570	6800	25300	1000
Coliformes fecales	(NMP)	28600	130000	100	200	500	100

PARAMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	RIO MOLINO BARRIO CENTRO									
		2005	2006	2006	2007	2008	2008	2008	2008	2009	2009
		Noviembre 04	Julio 12	Noviembre 20	Julio 18	Marzo 06	Mayo 29	Agosto 04	Octubre 22	Julio 22	Diciembre 07
Caudal	(Litros/Segundo)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	6,62	7,79	6,89	7,56	6,97	6,17	7,22	6,55	6,8	7,17
Temperatura	(°C)	18,1	16,1	19,1	17,4	17,1	16,5	18,1	21,4	19,3	17,6
Conductividad	(us/cm)	75	54,9	90	74,1	46	57	81,2	74,9	227	64,5
Oxígeno disuelto	(mg/L)	5,47	5,24	5,64	3,27	3,15	3,02	4,68	3,48	3,28	6,82
Color	(mg/L)	17,7	3,9	34,6	25	253	59	26	54	30	30
Turbiedad	(UNF)	8	1	13	6,05	147	71	10,6	23,6	9,3	10,4
DBO5	(mg/L)	2,2	2,5	1,7	1,9	0,5	1,7	4,3	4,6	7,3	2
DQO	(mg/L)	11	< 4	11,6	9,3	24	< 4	15,6	< 4	16,2	12,1
SST	(mg/L)	49	7,8	14,8	17,3	1147	62,2	8,7	37,5	8,9	19,3
Nitratos (NO3)	(mg/L)	0,6	0,85	0,78	1,19	7,18	1,34	1,29	1,5	1,43	1,26
Nitritos (NO2)	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	0,12	0,36	0,14

Fosfatos (PO4)	(mg/L)	1,98	0,02	0,12	0,13	0,27	0,16	0,18	0,1	S.D	S.D
Dureza	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	56	27,2	18,4	21,4	15
Coliformes totales	(NMP)	>2419	> 241920	> 24196	> 2419,6	> 2419,6	> 2419,6	> 2419,6	> 2419,6	> 2419,6	S.D
Coliformes fecales	(NMP)	>2419	241917	> 24196	> 2419,6	1983,3	> 2419,6	> 2419,6	> 2419,6	> 2419,6	S.D

SITIO	RIO MOLINO BARIO CENTRO										
	UNIDAD DE MEDIDA	2010 Septiembre 22	2010 Diciembre 02	2011 Marzo 08	2011 Junio 28	2011 Septiembre 06	2011 Noviembre 22	2012 Marzo 29	2012 Julio 26	2012 Noviembre 27	2013 No realizó
Caudal	(Litros/ Segundo)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	7,22	7,9	6,55	7,09	7,06	6,87	6,85	6,97	7,36	S.D
Temperatura	(°C)	17,1	17,3	18,9	14,9	15,5	17	S.D	S.D	17,9	S.D
Conductividad	(us/cm)	85	61	32,7	62	69,8	52,8	57,7	72,9	92,7	S.D
Oxígeno disuelto	(mg/L)	6,25	6,19	5,27	4,85	7,34	8,09	7,28	7,68	6,43	S.D
Color	(mg/L)	28	35	82	17	18	68	49	20	174	S.D
Turbiedad	(UNF)	3,8	5,6	36,1	5,9	4,3	85,9	36,1	22,4	218	S.D
DBO5	(mg/L)	2,9	1,2	0,8	0,6	1,9	0,5	1,7	4	5,7	S.D
DQO	(mg/L)	10,1	18	10	10	4	4	< 4	17,8	< 10	S.D

SST	(mg/L)	24,7	129	397	7	7	93	44,7	13,7	337	S.D
Nitratos (NO3)	(mg/L)	1,11	1	2,79	0,65	0,72	1,77	0,75	0,71	4,98	S.D
Nitritos (NO2)	(mg/L)	0,17	0,08	0,14	0,04	0,07	0,13	0,06	0,18	0,5	S.D
Fosfatos (PO4)	(mg/L)	S.D	S.D								
Dureza	(mg/L)	21,3	11,1	13,2	23,7	21,6	28,2	26,2	34,7	35,4	S.D
Coliformes totales	(NMP)	S.D	S.D								
Coliformes fecales	(NMP)	S.D	S.D								

SITIO	RIO MOLINO BARRIO JUNIN ANTES DE UNIRSE AL EJIDO										
	UNIDAD DE MEDIDA	2005	2006	2006	2007	2008	2008	2008	2008	2009	2009
		Noviembre 04	Julio 12	Noviembre 20	Julio 18	Marzo 06	Mayo 29	Agosto 04	Octubre 22	Julio 22	Diciembre 07
Caudal	(Litros/Segundo)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	6,76	7,67	7,09	7,71	6,6	6,13	7,23	5,28	6,78	7,34
Temperatura	(°C)	19,2	20,2	18,9	19,5	17,2	18,2	19,1	18,6	20,2	18,3
Conductividad	(us/cm)	136	334	162,8	145,2	69	90	165,9	149,4	174,8	82,9
Oxígeno disuelto	(mg/L)	3,82	1,24	4,94	2,75	2,83	2,1	3,62	1,93	2,77	5,92
Color	(mg/L)	14	49,1	41,5	46	210	31	58	75	52	28
Turbiedad	(UNF)	11	36	22	13,25	340	45,7	22,3	41,9	115,7	9,6

DBO5	(mg/L)	6	61,8	9,2	7,3	3,4	4,3	11,2	4,1	19,4	1,8
DQO	(mg/L)	62	456	30,8	34,6	20	< 4	52	34,8	38,7	14,4
SST	(mg/L)	58	66	11,7	33,3	1140	73,8	38,8	54,5	38,3	18,6
Nitratos (NO3)	(mg/L)	0,6	6,32	0,78	2,4	7,61	1,39	2,66	2,62	2,56	1,61
Nitritos (NO2)	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	0,36	0,18	0,2
Fosfatos (PO4)	(mg/L)	7,1	0,04	0,28	0,61	0,21	0,22	0,62	0,39	S.D	S.D
Dureza	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	41	48	28	21,4	21,4
Coliformes totales	(NMP)	>2419	>2419 20	> 24196	> 2419. 6	> 2419,6	> 2419, 6	> 2419,6	> 2419,6	> 2419 ,6	S.D
Coliformes fecales	(NMP)	>2419	>2419 20	> 24196	> 2419. 6	> 2419,6	> 2419, 6	> 2419,6	> 2419,6	> 2419 ,6	S.D

SITIO	RIO MOLINO BARRIO JUNIN ANTES DE UNIRSE AL EJIDO									
	UNIDAD DE MEDIDA	2010 Septiembre 22	2010 Diciembre 02	2011 Marzo 08	2011 Junio 28	2011 Septiembre 06	2011 Noviembre 22	2012 Marzo 29	2012 Julio 26	2012 Noviembre 27
Caudal	(Litros/ Segundo)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	6,94	6,37	6,88	7,5	7,29	7,31	7,03	7,07	7,49
Temperatura	(°C)	18	17,5	19,4	16,6	16,2	17,5	S.D	S.D	18,5
Conductividad	(us/cm)	137,8	82	0,5	106	129,7	76	114	186	106,9

Oxígeno disuelto	(mg/L)	4,7	6,22	4,52	4,17	5,38	7,92	4,99	3,54	5,41
Color	(mg/L)	24	16	79	29	19	68	53	41	46
Turbiedad	(UNF)	3	9,4	42,8	9,5	4,8	71,2	44,5	14,1	79,6
DBO5	(mg/L)	3,1	5,5	3,4	3	5,3	1,9	3,8	14,8	7,8
DQO	(mg/L)	8,5	38	10	10	4	4	< 4	67	15,6
SST	(mg/L)	44	81,17	550	10	12,5	76,3	64,4	46	146
Nitratos (NO3)	(mg/L)	1,15	0,77	2,25	1,58	1,06	2,18	0,64	1,42	2,61
Nitritos (NO2)	(mg/L)	0,19	0,13	0,18	0,2	0,14	0,18	0,31	0,12	0,22
Fosfatos (PO4)	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
Dureza	(mg/L)	18,6	21,4	20,2	26,2	33,6	31	26,2	34,7	35,4
Coliformes totales	(NMP)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
Coliformes fecales	(NMP)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D

SITIO	RIO MOLINO BARRIO JUNIN ANTES DE UNIRSE AL EJIDO						
PARAMETROS	UNIDAD DE MEDIDA	2013	2013	2014	2014	2014	2014
		Septiembre 12	Noviembre 06	Abril 14	Julio 14	Septiembre 23	Octubre 29
Caudal	(Litros/Segundo)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
pH	Unidad	7,26	7,14	6,84	7,26	7,29	7,38
Temperatura	(°C)	17,9	18,8	18,4	22,9	21,5	21,2

Conductividad	(us/cm)	233	1890	109,6	257,2	271,4	261,3
Oxígeno disuelto	(mg/L)	1,26	4,03	6,5	0,88	3,08	2,5
Color	(mg/L)	24	14	21	16	47	41
Turbiedad	(UNF)	9,8	9	24,4	13,8	28	24,1
DBO5	(mg/L)	3,5	5,8	8,4	46,3	23,2	33,7
DQO	(mg/L)	18	10	35	73,5	111	56
SST	(mg/L)	8	44,6	85	48,8	48	42,5
Nitratos (NO3)	(mg/L)	0,78	1,12	0,63	1,52	3,59	2,19
Nitritos (NO2)	(mg/L)	0,12	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03
Fosfatos (PO4)	(mg/L)	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D
Dureza	(mg/L)	51,4	40,3	35,8	44,8	51,4	54,9
Coliformes totales	(NMP)	82700	740000	S.D	S.D	2.3E+006 (Ufc/100 ml)	1.90E+005 (Ufc/100 ml)
Coliformes fecales	(NMP)	28600	130000	S.D	2000000	540000	30000

Fuente. Acueducto y Alcantarillado de Popayán [7].

Anexo 2. Mortalidad por (IRA) y (EDA) en menores de cinco años en Cauca

Tabla 1. Tasa de mortalidad por IRA en menores de cinco años por municipios, Cauca 2015 -2016.

Municipio residencia	No. Casos	Menores de 5 años	Tasa *100000 menores de 5 años	No. Casos	Menores de 5 años	Tasa *100000 menores de 5 años
19785 - Sucre		768	0,00	1	765	130,72
19050 - Argelia	2	2860	69,93	3	2878	104,24
19809 - Timbiquí	1	3104	32,22	2	3153	63,43
19743 - Silvia		3423	0,00	2	3443	58,09
19364 - Jambaló	1	2306	43,37	1	2362	42,34
19824 - Totoró		2386	0,00	1	2419	41,34
19110 - Buenos Aires		3216	0,00	1	3258	30,69
19821 - Toribio	1	3616	27,65	1	3653	27,37
19001 - Popayán	10	18589	53,80	5	18505	27,02
19318 - Guapi	1	4036	24,78	1	4057	24,65
19137 - Caldono	3	4023	74,57	1	4062	24,62
19130 - Cajibío		4096	0,00	1	4118	24,28
19256 - El Tambo	1	4586	21,81	1	4558	21,94
19517 - Paez	2	4691	42,63	1	4772	20,96
19 - Cauca	32	133.222	24,02	23	133977	17,17
19698 - Santander De Quilichao	1	8077	12,38	1	8156	12,26
19142 - Caloto	2	1520	131,58		1515	0,00
19473 - Morales	2	2871	69,66		2903	0,00
19585 - Puracé	1	1615	61,92		1619	0,00
19075 - Balboa	1	2621	38,15		2623	0,00
19807 - Timbío	1	2681	37,30		2691	0,00
19418 - López	1	2720	36,76		2750	0,00
19355 - Inzá	1	4015	24,91		4089	0,00

Fuente. Secretaría de Salud Departamento del Cauca [9].

Tabla 2. Tasa de mortalidad por EDA en menores de cinco años por municipios, Cauca 2015 -2016.

Municipio residencia	Tasa: No. de muertes por EDA en niños menores de 5 años por cada 100000 menores de 5 años					
	2015			2016		
	No. Casos	Menores de 5 años	Tasa *100000 menores de 5 años	No. Casos	Menores de 5 años	Tasa *100000 menores de 5 años
19022 - Almaguer	2	2026	98,72	1	2015	49,63
19517 - Paez		4691	0,00	1	4772	20,96
19001 - Popayán		18589	0,00	1	18505	5,40
19 - Cauca	5	133.222	3,75	3	133977	2,24
19318 - Guapi	2	4036	49,55		4057	0,00
19137 - Caldono	1	4023	24,86		4062	0,00

Fuente. Secretaría de Salud Departamento del Cauca [9].

Anexo 3. Resultados de parámetros fisicoquímicos en el año 2016.

Imagen 1. Resultados de parámetros fisicoquímicos in situ en el año 2016.

		CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL		Código: FT-PDPA-LA027 Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 1 de 2	
Reporte N° 100					
REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA					

Fecha: Julio 22 de 2016.		
Ciliente: Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P.		Solicitud N°: 155
Dirección: Calle 3 N° 4-21 Popayán		Teléfono: 8241553
Municipio de muestreo: Popayán		Fecha de Recepción: Julio 13 de 2016.
		Fecha de Análisis: Julio 13 a julio 20.

Muestreo:	
Plan de Muestreo N°	014
Fecha de Muestreo	Julio 13 de 2016
Lugar de Muestreo	Rio Molino
Procedimiento de muestreo	Puntual IN-PDPA-LA023
Condiciones ambientales	Parcialmente nublado

Identificación de la muestra		
Código Muestra	Sitio de Muestreo	Coordenadas
0506	Rio Molino, Pueblillo	N: 02°26'40.0" W: 76°34'38.7" ASNM: 1789 m
0507	Rio Molino, barrio Junin	N: 02°27'18.9" W: 76°37'32.6" ASNM: 1698 m

VARIABLES IN SITU:							
Código Muestra	Hora	Temp. °C	pH Unidad	Conductividad μS/cm.	Oxígeno Disuelto mg/L	% OD	Caudal L/s
0506	12:10	18.7	7.43	72.7	7.04	74.3	307
0507	14:00	22.2	6.81	387	0.93	10.1	486

Carrera 7 # 1N - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas
 Pbx: 8203232 fax: 092 - 8203251
 Línea verde: 018000932855
 www.cro.gov.co

Laboratorio Ambiental: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8245602



Fuente. Corporación Autónoma Regional del Cauca [10].

Imagen 2. Resultados de parámetros fisicoquímicos de laboratorio año 2016.

		Código: FT-POPA-LA027 Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 2 de 2	
CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL		REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA	

Variable	Método	Unidad	Resultados	
			0506	0507
Color	SM 2120 C	UPC	18	520
Turbiedad	SM 2130 B	UNT	2.2	110
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg NO ₃ -N/L	0.76	6.21
Nitritos	SM 4500-NO ₂ -B	mg NO ₂ -N/L	< 0.01	0.94
Dureza	SM 2340 C	mgCaCO ₃ /L	40.4	65.4
DBO ₅	SM5210B/SM4500-OG	mg/L	1.0	43.1
DQO	SM5220D, modificado	mg/L	< 15	96.0
SST	SM2540D	mg/L	< 5	44.0
Coliformes Totales	SM 9223 B	Ufc/100ml	17800	1.1E6
Coliformes Fecales	SM 9223 B	Ufc/100ml	100	410000

Observaciones:

- Los resultados que se relacionan en este informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas.
- Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.

DIEGO ZULUAGA VERA
 Responsable Laboratorio Ambiental

Cámara 7 # 1N - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas
 Pbx: 8203232 fax: 082 - 8203251
 Línea verde: 018000932855
 www.crc.gov.co

Laboratorio Ambiental: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8245602

Fuente. Corporación Autónoma Regional del Cauca [10].

Anexo 4. Ecuaciones predictivas de K_a a partir de sus parámetros hidráulicos.

Imagen 1. Fórmulas predictivas de K_a existentes.

Autor (es)	K_a en base e (d^{-1} a 20 °C)	Unidades	Aplicabilidad y observaciones	Fuente
O'Connor y Dobbins (1958)	$K_a = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Profundidad moderada a profunda $0.305 \text{ m} \leq H \leq 9.14 \text{ m}$ $0.15 \text{ m/s} \leq U \leq 0.49 \text{ m/s}$ $0.05 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 12.2 \text{ d}^{-1}$	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)
Churchill <i>et al.</i> (1962)	$K_a = 5.026 \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Basado en tasas de reaeración observadas aguas abajo de presas, en las cuales se conocía un déficit de oxígeno. No es aplicable a ríos con pequeñas cascadas (fenómeno de burbujas). $0.61 \text{ m} \leq H \leq 3.35 \text{ m}$ $0.55 \text{ m/s} \leq U \leq 1.5 \text{ m/s}$ $0.000126 \text{ m/m} \leq S \leq 0.002351 \text{ m/m}$ $0.225 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 5.56 \text{ d}^{-1}$	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)
Krenkel y Orlob (1962)	$K_a = 173.4 \frac{(US)^{0.408}}{H^{0.66}}$ $K_a = 2750.3 \frac{D_L^{1.321}}{H^{2.32}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$ $D_L = \text{m}^2/\text{s}$	Basado en mediciones realizadas en un canal de 0.305 m de ancho, mediante desoxigenación el agua. $0.0244 \text{ m} \leq H \leq 0.07 \text{ m}$ El coeficiente de dispersión longitudinal del canal (D_L), estuvo por debajo del rango esperado en sistemas naturales.	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)
Owens <i>et al.</i> (1964)	$K_a = 5.34 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$ $K_a = 6.935 \frac{U^{0.73}}{H^{1.75}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Combinó los datos de su investigación con los datos de Churchill <i>et al.</i> (1962) y Gameson <i>et al.</i> (1955). Se monitoreó la recuperación del oxígeno en seis ríos en Inglaterra, los cuales fueron desoxigenados con sulfato de sodio. $0.122 \text{ m} \leq H \leq 3.35 \text{ m}$ $0.0305 \text{ m/s} \leq U \leq 1.52 \text{ m/s}$ $0.000156 \text{ m/m} \leq S \leq 0.0106 \text{ m/m}$ $0.31 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 49.17 \text{ d}^{-1}$ La segunda ecuación fue propuesta para ríos rápidos y poco profundos, y obtenida con los datos del Water Pollution Research Laboratory (WPRL) $0.122 \text{ m} \leq H \leq 0.7315 \text{ m}$ $0.0305 \text{ m/s} \leq U \leq 0.549 \text{ m/s}$	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)

Autor (es)	K_a en base e (d^{-1} a 20 °C)	Unidades	Aplicabilidad y observaciones	Fuente
Dobbins (1965)	$K_a = 55.4 \frac{(1+F^2)}{(0.9+F)^{1.5}} \frac{(US)^{0.375}}{H} \coth \left[\frac{4.75(US)^{0.125}}{(0.9+F)^{0.5}} \right]$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$	Teoría combinada con mediciones en ríos y datos de canales de Krenkel y Orlob (1963). Coth = cotangente hiperbólica del ángulo en radianes	Rathbun (1977)
Langbein y Durum (1967)	$K_a = 5.135 \frac{U}{H^{1.33}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Basado en los datos de O'Connor y Dobbins (1958), Churchill <i>et al.</i> (1962), Krenkel y Orlob (1963) y Streeter <i>et al.</i> (1936).	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)
Isaac y Gaudy (1968)	$K_a = 4.75 \frac{U}{H^{1.5}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Ecuación desarrollada usando un análisis de regresión a los datos recolectados usando un canal con recirculación en un tanque cilíndrico. Posteriormente la relación con los datos de campo de Churchill <i>et al.</i> (1962) obteniendo unos nuevos coeficientes.	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)
Negulescu y Rojanski (1969)	$K_a = 10.9 \left(\frac{U}{H} \right)^{0.85}$ $K_a = 352.3 D_L \left(\frac{U}{H} \right)^{1.63}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Ecuación desarrollada a partir de canales con recirculación y es aplicable a ríos con: $H < 0.5 \text{ m}$ $U < 1.2 \text{ m/s}$	Artículo Original
Thackston y Krenkel (1969)	$K_a = 24.9 \frac{(1+F^{0.5})u_*}{H}$	$u_* = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Basado en mediciones realizadas en un canal de 0.6 m de ancho, mediante desoxigenación el agua. $0.015 \text{ m} \leq H \leq 0.07 \text{ m}$	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Cadwallader y McDonnell (1969)	$K_a = 185.5 \frac{(US)^{0.5}}{H}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$	Basado en un análisis multivariado de datos de reaeración de Churchill <i>et al.</i> (1962), Owens <i>et al.</i> (1964) y WPRL (1966). $0.06 \text{ m} \leq H \leq 0.274 \text{ m}$ $0.0305 \text{ m/s} \leq U \leq 0.213 \text{ m/s}$ $0.000014 \text{ m/m} \leq S \leq 0.00092 \text{ m/m}$ $0.26 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 8.5 \text{ d}^{-1}$	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)
Padden y Gloyna (1971)	$K_a = 4.547 \frac{U^{0.703}}{H^{1.054}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Análisis mediante regresión a datos en los cuales la tasa de reaeración estaba en el rango: $9.8 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 28.8 \text{ d}^{-1}$	Bowie <i>et al.</i> (1985) y Rathbun (1977)

Autor (es)	K_a en base e (d^1 a $20\text{ }^\circ\text{C}$)	Unidades	Aplicabilidad y observaciones	Fuente
Tsivoglou y Neal (1976)	$K_a = 0.3609 \left(\frac{\Delta H}{t} \right)$ para $0.028 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ $K_a = 0.1772 \left(\frac{\Delta H}{t} \right)$ para $0.708 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 85 \text{ m}^3/\text{s}$ $K_a = 13566 US$	$\Delta H = \text{m}$ $t = \text{d}$ $U = \text{m/s}$ $S = \text{m/m}$	Basado en datos recolectados en 24 diferentes ríos usando el método de trazadores radioactivos. Kilpatrick <i>et al.</i> (1989) recomienda utilizar la 2ª ecuación de Tsivoglou y Neal para $S > 0.003 \text{ m/m}$	Bowie <i>et al.</i> (1985) Rathbun (1977)
Foree (1977)	$K_a = 0.789(0.63 + 7640 S^{1.15})(91464567 q)^{0.25}$ para $5.46 \times 10^{-10} \leq q \leq 1.09 \times 10^{-8}$ $K_a = 0.789(0.63 + 153465.5 S^{1.5})$ para $q > 1.09 \times 10^{-8}$ $K_a = 0.37(0.63 + 7640 S^{1.15})$ para $q < 5.46 \times 10^{-10}$	$S = \text{m/m}$ $q = \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}^2}$	Nuevos análisis a partir de los datos de Foree (1976).	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Ice y Brown (1978)	$K_a = 55 \frac{W^{7/8} S^{1/2} U^{1/2} g^{1/2}}{Q^{3/2}}$	$W = \text{m}$ $U = \text{m/s}$ $S = \text{m/m}$ $Q = \text{m}^3/\text{s}$	Basado en datos recolectados en muchos ríos pequeños en Oregon (EE.UU.).	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Grant (1978)	$K_a = 0.1748 \left(\frac{\Delta H}{t} \right)$	$\Delta H = \text{m}$ $t = \text{d}$	Basado en trazadores radioactivos desarrollado en los ríos Rock, Wisconsin e Illinois (EE.UU.). $7.36 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 29.16 \text{ m}^3/\text{s}$ $0.0762 \text{ m/s} \leq U \leq 0.4877 \text{ m/s}$ $0.000038 \text{ m/m} \leq S \leq 0.00066 \text{ m/m}$ $0.01 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 0.8 \text{ d}^{-1}$	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Shindala y Truax (1980)	$K_a = 0.233 \left(\frac{\Delta H}{t} \right)$ para $Q \leq 0.283 \text{ m}^3/\text{s}$ $K_a = 0.1748 \left(\frac{\Delta H}{t} \right)$ para $0.283 \text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 7.93 \text{ m}^3/\text{s}$	$\Delta H = \text{m}$ $t = \text{d}$	Basado en análisis estadísticos de coeficientes de reaeración para siete estados, donde se utilizó el método de trazadores radioactivos.	Bowie <i>et al.</i> (1985)

Activar Win

Autor (es)	K_a en base e (d^1 a $20\text{ }^\circ\text{C}$)	Unidades	Aplicabilidad y observaciones	Fuente
Parkhurs y Pomeroy (1972)	$K_a = 23.04 \frac{(1 + 0.17F^2)(SU)^{0.6}}{H}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$	Desarrollado en datos de 12 investigaciones en 12 alcantarillados y ríos.	Artículo Original y Rathbun (1977)
Lau (1972)	$K_a = 2515 \left(\frac{u_*}{U} \right)^3 \frac{U}{H}$	$u_* = \text{m/s}$ $U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Basado en un nuevo análisis de los datos de Thackston y Krenkel (1969), Krenkel (1960) y Churchill <i>et al.</i> (1962). Aplicable a ríos con : $H > 0.6 - 0.9 \text{ m}$ $U > 0.1524 \text{ m/s}$	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Bennett y Rathbun (1972)	$K_a = 32.5 \frac{U^{0.413} S^{0.273}}{H^{1.408}}$ $K_a = 5.585 \frac{U^{0.607}}{H^{1.689}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$	Estas 2 ecuaciones están basadas en unos nuevos análisis de registros de datos históricos. La segunda ecuación predice mejor, pero no tiene el término de la pendiente.	Bowie <i>et al.</i> (1985) y Rathbun (1977)
Tsivoglou y Wallace (1972)	$K_a = 0.1573 \left(\frac{\Delta H}{t} \right)$	$\Delta H = \text{m}$ $t = \text{d}$	Basado en datos de investigaciones realizadas con trazadores radioactivos en cinco ríos.	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Bansal (1973)	$K_a = 1.8 \frac{U^{0.6}}{H^{1.4}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Basado en un nuevo análisis de los datos de reaeración realizados por Churchill <i>et al.</i> (1962), O'Connor y Dobbins (1958) y Langbein y Durum (1967).	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Grant (1976)	$K_a = 0.262 \left(\frac{\Delta H}{t} \right)$	$\Delta H = \text{m}$ $t = \text{d}$	Basado en datos de 10 pequeños ríos en Wisconsin, usando técnicas de trazadores radioactivos. $0.008495 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 1.0477 \text{ m}^3/\text{s}$ $0.000227 \text{ m/m} \leq S \leq 0.01326 \text{ m/m}$ $2.1 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 55 \text{ d}^{-1}$	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Foree (1976)	$K_a = 0.266 + 12.26S^{1/2}$	$S = \text{m/m}$	La técnica usada fue la de trazadores radioactivos en pequeños ríos en Kentucky $0 \text{ m/m} \leq S \leq 0.0079548 \text{ m/m}$ $0.38 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 23.3 \text{ d}^{-1}$	Artículo Original y Bowie <i>et al.</i> (1985)

Autor (es)	K_a en base e (d^{-1} a $20\text{ }^\circ\text{C}$)	Unidades	Aplicabilidad y observaciones	Fuente
Long (1984)	$K_a = 1.923 \frac{U^{0.273}}{H^{0.894}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Conocida como la ecuación de "Texas" basada en datos recolectados en ríos Texas (EE.UU.).	Bowie <i>et al.</i> (1985)
Parker y Gay (1987)	$K_a = 312 \frac{U^{0.355} S^{0.438}}{H^{0.176}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$	Basado en una técnica de regresión múltiple a treinta grupos de datos que contenían características físicas hidrológicas y de calidad de agua. $0.122 \text{ m} \leq H \leq 1.92 \text{ m}$ $0.0396 \text{ m/s} \leq U \leq 0.655 \text{ m/s}$ $0.00017 \text{ m/m} \leq S \leq 0.0015 \text{ m/m}$ $0.4 \text{ d}^{-1} \leq K_a \leq 67.7 \text{ d}^{-1}$	Artículo Original
Melching y Flores (1999)	$K_a = 517 \frac{(US)^{0.524}}{Q^{0.242}}$ para ríos con rápidos y estanques, con $Q \leq 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ $K_a = 596 \frac{(US)^{0.528}}{Q^{0.136}}$ para ríos con rápidos y estanques, con $Q > 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ $K_a = 88 \frac{(US)^{0.313}}{H^{0.353}}$ para ríos controlados por la forma del canal, con $Q \leq 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ $K_a = 142 \frac{(US)^{0.333}}{H^{0.66} W^{0.243}}$ para ríos controlados por la forma del canal, con $Q > 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $W = \text{m}$ $S = \text{m/m}$ $Q = \text{m}^3/\text{s}$	Ecuaciones derivadas a partir de una compilación de datos K_2 obtenidos con el método de trazadores gaseosos, realizada por el USGS Estados Unidos. Este estudio incluyó 493 tramos en 166 ríos en 23 estados. Después de separar y eliminar las mediciones potencialmente erróneas, el grupo de datos se redujo a 370 mediciones, las cuales se dividieron en cuatro grupos, según el caudal del tramo.	Artículo Original
Thackston y Dawson (2001)	$K_a = 0.000025 \left(1 + 9F^{1/4}\right) \frac{u_*}{H}$	$H = \text{m}$ $u_* = \text{m/s}$	Realizaron una recalibración de la ecuación de Thackston y Krenkel (1969), a partir de los datos de O'Connor y Dobbins (1956), Churchill <i>et al.</i> (1962), Thackston y Krenkel (1969), Parkhurst y Pomeroy (1972), Ruhl y Smoot (1987) y Parker y DeSimone. Aplicable a ríos con velocidades bajas, con pequeños números de Froud ($F \leq 2$), sin	Artículo Original

Autor (es)	K_a en base e (d^{-1} a $20\text{ }^\circ\text{C}$)	Unidades	Aplicabilidad y observaciones	Fuente
Gualtieri <i>et al.</i> (2002)	$K_a = \frac{D_m^{2/3} v^{1/3}}{HR_{m-t}^{2/3} \bar{Y} \left(\frac{gS}{2g} \right)} = \frac{2^{2/3}}{Sc^{2/3} Re_{m-t}^{2/3}} \frac{U}{H} Re^{-1/3} F^{-2/3} S^{1/3}$ donde: $\bar{g} = \text{grupo adimensional} = T_s^3 / (\rho^3 v^4)$ $\bar{Y} = \text{grupo dimensional} = (v^2 \rho) / T_s$, en [L] $Re_{m-t} = 0.8663$ constante según observaciones de los autores Gualtieri <i>et al.</i> (2000)	$S = \text{m/m}$ $\bar{Y} = \text{m}$ $H = \text{m}$ $g = \text{m/s}^2$ $D_m = \text{m}^2/\text{s}$ $T_s = \text{Kg/s}^2$ $v = \text{m}^2/\text{s}$ $\rho = \text{Kg/m}^3$ $U = \text{m/s}$	Los autores proponen una aproximación teórica para comprender los procesos de transferencia de masas en la interfase agua-aire, la cual está basada en un análisis dimensional.	Artículo Original

Definición de símbolos:

$F = \text{número de Froud} = \frac{U}{\sqrt{gH}}$

$Sc = \text{Número Schmidt} = \nu / D_m$

$Re = \text{Número de Reynolds}$

$D_L = \text{Coeficiente de dispersión longitudinal}$

$D_m = \text{Coeficiente de difusión molecular}$

$q = \text{Caudal del río dividido por el área de drenaje de la cuenca}$

$T_s = \text{Tensión superficial del agua}$

$\rho = \text{Peso específico del agua}$

$\Delta H = \text{Cambio en la elevación entre las estaciones aguas arriba y aguas abajo del tramo en estudio}$

$t = \text{Tiempo transcurrido entre los centroides de las curvas del trazador en los dos sitios de medición del tramo en estudio}$

$\nu = \text{Viscosidad cinemática}$

$H = \text{Profundidad media del agua}$

$W = \text{Ancho superior del canal o río}$

$S = \text{Pendiente}$

$U = \text{Velocidad media del flujo}$

$R = \text{Radio hidráulico}$

$g = \text{Aceleración de la gravedad}$

$u_* = \text{Velocidad de corte} = \sqrt{gRS}$

Fuente. Libro estudio del proceso de reaeración en el río Cauca. CVC y Univalle [13].

Anexo 5. Resultados de parámetros fisicoquímicos en el año 2018.

Imagen 1. Reporte de resultados de muestras de agua para hallar DBO₅ y DQO.

		CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL		Código: FT-POPA-LA027 Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 1 de 1	
Reporte N° 048 REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA-					
Fecha: Marzo 8 de 2018.					
Cliente Acueducto y Alcantarillado de Popayán				Solicitud N°: 037	
Dirección: Carrera 6 N° 4-49, Popayán			Teléfono: 3225779217		
Municipio de muestreo: Popayán			Fecha de Recepción: Febrero 27 de 2018. Fecha de Análisis: Febrero 27 a marzo 6.		
Muestreo:					
Plan de Muestreo N°		N/A			
Fecha de Muestreo		N/A			
Lugar de muestreo		Río Molino			
Procedimiento de muestreo		N/A			
Condiciones ambientales		N/A			
Identificación de la muestra					
Código Muestra		Sitio de Muestreo			
0132		Río Molino, Pueblillo			
0133		Río Molino, puente edificio Negret			
0134		Río Molino, barrio Junín, antes de barrio Ejido			
Resultados laboratorio					
Variable	Método	Unidad	Resultados		
			0132	0133	0134
DBO	SM 5210 B/SM 4500-OG	mg/L	< 0.9	0.9	4.7
DQO	SM 5220 D, modificado	mg/L	< 15	< 15	< 15
Observaciones:					
-Los resultados que se relacionan en este informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas. -Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.					
DIEGO ZULUAGA VERA Responsable Laboratorio Ambiental					
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA - NIT: 891.501.885 - 4 Carrera 7 # 1n – 28 Edificio Edgar Negret Dueñas Pbx: 833 32 32 Fax: 892 – 8293251 Línea verde: 018000932855 Popayán – Cauca – Colombia www.crc.gov.co					
Laboratorio: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8333232 Ext. 231					

Fuente. Laboratorio de la CRC, en la vereda González, Popayán.

. Imagen 2. Reporte de resultados de muestras de agua en la estación de muestreo río Molino en Pueblillo

ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A E.S.P.
 NIT 891.500.117-1
 RUIR 1-19001000 -1 SSPD

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PARTICULARES
 AGUA CRUDA

REGISTRO N°. R 1088

PROCEDENCIA: MUNICIPIO DE POPAYÁN
 FUENTE: RIO MOLINO
 ANÁLISIS SOLICITADO: **FÍSICO - QUÍMICO**
 PUNTO DE CAPTACIÓN: VEREDA PUEBLILLO
 ORDENADO POR: DIVISION AMBIENTAL
 RECOLECTADO POR: PAUL SANTIAGO HOYOS
 FECHA DE TOMA: 27 de febrero de 2018
 HORA DE TOMA: 07:00 A.M
 FECHA DE ANÁLISIS: 27 de febrero de 2018

ANÁLISIS	CONCENTRACIÓN	DATOS EXPRESADOS EN	NORMAS M.S.P. Octo. 1594 de 1984 R.O. Cruda
Conductividad (°)	44,5	µS/cm (Microsiemens / cm)	Hasta 1000
Turbiedad	24,00	N.T.U.	<= 10
Color Aparente.	37,9	Unidades Platino Cobalto, UPC	<= 75
pH	7,3	Unidades de pH	Entre 5.0 - 9.0
Alcalinidad Total	84,1	mg/L CaCO ₃	Hasta 200
Dureza Total	105,90	mg/L CaCO ₃	Hasta 300
Nitratos.	1,28	mg/L NO ₃ ⁻	Hasta 10.0
Nitritos	0,008	mg/L NO ₂ ⁻	Hasta 10.0
Temperatura	18,7	Grados Centígrados (°C)	
SDT .	22,3	mg/L	

NOTA: LA MUESTRA ANALIZADA TIENE EL PARÁMETRO DE TURBIEDAD POR FUERA DE LA NORMA DE AGUA CRUDA.

Carmen Lucía López Solís
CARMEN LUCÍA LÓPEZ SOLÍS
 Química

Laboratorio autorizado para la realización de análisis según Resolución No 1615 del 15 de Mayo de 2015 "Planta de Tratamiento Tablazo"
 (26) 32 64 08 Conmutador (26) 24 15 53 FAX. 24 20 14 - 24 04 66
 www.acueductopopayan.com

Fuente. Laboratorio del AAP, en el Tablazo, Popayán.

Imagen 3. Reporte de resultados de muestras de agua en la estación de muestreo río Molino en el barrio Centro.

ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A. E.S.P.
 NIT 891.500.117-1
 NUBR 1-19001000 -1 SSPD

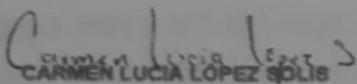
ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO AMBIENTAL PARTICULARES
AGUA CRUDA

REGISTRO N°. R 1086

PROCEDENCIA: MUNICIPIO DE POPAYÁN
 FUENTE: RÍO MOLINO
 ANÁLISIS SOLICITADO: **FÍSICO - QUÍMICO**
 PUNTO DE CAPTACIÓN: BARRIO CENTRO / FRENTE EDIFICIO NEGRET
 ORDENADO POR: DIVISION AMBIENTAL
 RECOLECTADO POR: PAUL SANTIAGO HOYOS
 FECHA DE TOMA: 27 de febrero de 2018
 HORA DE TOMA: 10:00 A.M.
 FECHA DE ANÁLISIS: 27 de febrero de 2018

ANÁLISIS	CONCENTRACIÓN	DATOS EXPRESADOS EN	NORMAS N.E.P. Dcto. 1594 de 1984 EN H ₂ O Crudo
Conductividad (°°)	80,2	µS/cm (Microsiemens / cm)	Hasta 1000
Turbiedad .	42,40	N.T.U.	<= 10
Color Aparente .	43,2	Unidades Platino Cobalto, UPC	<= 75
pH	7,0	Unidades de pH	Entre 5.0 - 9.0
Alcalinidad Total	45,1	mg/L CaCO ₃	Hasta 200
Dureza Total	83,80	mg/L CaCO ₃	Hasta 300
Nitratos	1,89	mg/L NO ₃ ⁻	Hasta 10.0
Nitritos	0,027	mg/L NO ₂ ⁻	Hasta 10.0
Temperatura	18,7	Grados Centígrados (°C)	
SDT.	30,1	mg/L	

NOTA: LA MUESTRA ANALIZADA TIENE EL PARÁMETRO DE TURBIEDAD POR FUERA DE LA NORMA DE AGUA CRUDA.


CARMEN LUCÍA LÓPEZ SOLÍS
 Química

Laboratorio autorizado para la realización de análisis según Resolución No 1515 del 16 de Mayo de 2016 "Planta de Tratamiento Tablazo"
 (28) 32 64 08 Conmutador: (28) 24 15 53 FAX: 24 20 14 - 24 04 66
www.acueductopopayan.com

Fuente. Laboratorio del AAP, en el Tablazo, Popayán.

Imagen 4. Reporte de resultados de muestras de agua en la estación de muestreo río Molino en el barrio Junín.


ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A. E.S.P.
 RIT 891.300.117-1
 RUIR 1-10001000 -1 SSPD



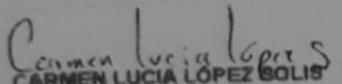
F.CEP.003 ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PARTICULARES V 5.0
AGUA CRUDA

REGISTRO N°. R 1087

PROCEDENCIA: MUNICIPIO DE POPAYÁN
FUENTE: RIO MOLINO
ANÁLISIS SOLICITADO: **FÍSICO - QUÍMICO**
PUNTO DE CAPTACIÓN: BARRIO JUNIN / ANTES DE UNIRSE AL EJIDO
ORDENADO POR: DIVISION AMBIENTAL
RECOLECTADO POR: PAUL SANTIAGO HOYOS
FECHA DE TOMA: 27 de febrero de 2018
HORA DE TOMA: 01:00 A.M
FECHA DE ANÁLISIS: 27 de febrero de 2018

ANÁLISIS	CONCENTRACIÓN	DATOS EXPRESADOS EN	NORMAS M.S.P. Dcto. 1584 de 1984 H ₂ O Cruda
Conductividad (**)	109,3	μS/cm (Microsiemens / cm)	Hasta 1000
Turbiedad	46,00	N.T.U.	≤ 10
Color Aparante	45,4	Unidades Platino Cobalto, UPC	≤ 75
pH	7,1	Unidades de pH	Entre 5.0 - 9.0
Alcalinidad Total	44,7	mg/L CaCO ₃	Hasta 200
Dureza Total	65,30	mg/L CaCO ₃	Hasta 300
Nitratos	2,86	mg/L NO ₃ ⁻	Hasta 10.0
Nitritos	0,147	mg/L NO ₂ ⁻	Hasta 10.0
Temperatura	19,7	Grados Centígrados (°C)	
SDT	54,7	mg/L	

NOTA: LA MUESTRA ANALIZADA TIENE EL PARÁMETRO DE TURBIEDAD POR FUERA DE LA NORMA DE AGUA CRUDA.


CARMEN LUCIA LOPEZ BOLIS
 Química

Laboratorio autorizado para la realización de análisis según Resolución No 1616 del 16 de Mayo de 2015 "Planta de Tratamiento Tablazo"
 (26) 32 64 08 Conmutador (26) 24 15 53 FAX: 24 20 14 - 24 04 66
www.acueductopopayan.com

Fuente. Laboratorio del AAP, en el Tablazo, Popayán.

Anexo 6. Metodología para hallar variables Hidráulicas, Ka predictivas y experimental en las estaciones de muestreo.

1. AFORO DEL CAUDAL, TASAS DE REAIREACIÓN PREDICTIVAS Y EXPERIMENTAL ESTACIÓN DE MUESTREO UNO, RÍO MOLINO EN PUEBLILLO.

1.1. AFORO DEL CAUDAL ESTACIÓN DE MUESTREO UNO.

Tabla 1. Datos de campo aforo del caudal.

OBSERVACION	RESULTADO
Ancho de la corriente (m)	9.0
Ancho recomendado franja (m)	1.5
Número de franjas (unidad)	6
Longitud en el tramo (m)	80
Diferencia de alturas en el tramo (m)	1.87

Fuente. Elaboración propia.

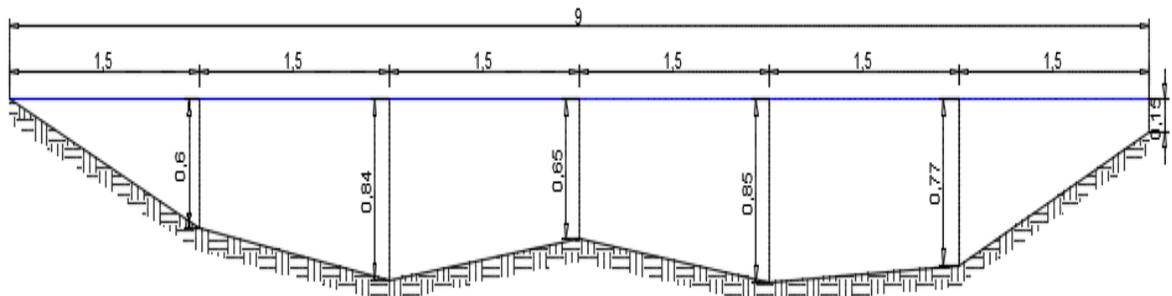
Tabla 2. Área en las secciones aforadas, estación uno.

SECCIONES	ANCHO (m)	PROFUNDIDAD (m)	FIG GEOMÉTRICA	ÁREA (m ²)
Sección 1	1.5	0.60	Triángulo	0.450
Sección 2	1.5	0.84	Trapezio	1.080
Sección 3	1.5	0.65	Trapezio	1.118
Sección 4	1.5	0.85	Trapezio	1.125
Sección 5	1.5	0.77	Trapezio	1.215
Sección 6	1.5	0.15	Trapezio	0.690

Profundidad media= 0.643

Fuente. Elaboración propia.

Imagen 1. Datos del caudal estación uno.



Fuente. Elaboración propia.

Se procede a medir la velocidad en cada vertical.

Tabla 3. Velocidad media en las verticales

VERTICALES	MÉTODO VELOCIDAD	PROFUNDIDAD (h) en (m)	CON EL % DE PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD MEDIA EN VERTICAL (m/s)
Vertical 1	60 %	0.60	0.360	0.32
Vertical 2	60 %	0.84	0.504	0.21
Vertical 3	60 %	0.65	0.390	0.28
Vertical 4	60 %	0.85	0.510	0.32
Vertical 5	60 %	0.77	0.462	0.16
Vertical 6	50%	0.15	0.075	0.12

Profundidad media: 0.643

Fuente. Elaboración propia.

Se halla la velocidad en cada sección y caudal total.

Tabla 4. Velocidad media en la estación y caudal total.

SECCIONES	VELOCIDAD MEDIA EN LAS VERTICALES (m/s)		VELOCIDAD EN CADA SECCIÓN (m/s)	ÁREA EN CADA SECCION (m ²)	VALORES DE CAUDALES UNITARIOS (m ³ /s)
Sección 1	No	0.32	0.320	0.450	0.144
Sección 2	0.32	0.21	0.265	1.080	0.286
Sección 3	0.21	0.28	0.245	1.118	0.274
Sección 4	0.28	0.32	0.300	1.125	0.338
Sección 5	0.32	0.16	0.240	1.215	0.292
Sección 6	0.16	0.12	0.140	0.690	0.097

Velocidad media= 0.252

Caudal total= 1.431

Fuente. Elaboración propia.

1.2. TASA DE REAIREACIÓN EMPÍRICA ESTACIÓN DE MUESTREO UNO.

Tabla 5. Variables necesarias para tasas de reaireación predictivas.

VARIABLES	RESULTADO
Longitud en el tramo (L_{tramo})	80 m
Velocidad media del agua (V_{med})	0,252 m/s o 21772.8 m/día
Diferencia de alturas en el tramo (ΔH)	1,87 m

Profundidad media (H_{med})	0,643 m
Temperatura hídrica del tramo (T°)	16,2 °C
Caudal (Q)	1,431 m ³ /s

Fuente. Elaboración propia.

1.2.1. Tasa de reaireación por Tsvoglou y Wallace:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = C \left(\frac{\Delta H}{t} \right) \quad \text{Ecuación. (4)}$$

$K_a(20^\circ\text{C})$ = Tasa de reaireación para T° hídrica a 20°C

ΔH = Diferencia de alturas en el tramo de estudio

C = Constante C, depende del caudal en el tramo.

$C = 0.360$ para $0.028 \leq Q \leq 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$

El caudal (**Q**) es **1.431 m³/s** se aplica **C = 0.177**

$C = 0.177$ para $0.708 \leq Q \leq 85 \text{ m}^3/\text{s}$

t = tiempo medio de viaje en el tramo.

$$t = \left(\frac{L \text{ tramo}}{V_{med}} \right)$$

$$t = \frac{80 \text{ m}}{21772.8 \frac{\text{m}}{\text{día}}}$$

$$t = 3.674 \times 10^{-3} \text{ día}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 0.177 \left(\frac{1.87 \text{ m}}{3.674 \times 10^{-3} \text{ día}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 90.090 \text{ día}^{-1}$$

Se debe obtener K_a para la temperatura hídrica en el tramo:

Se aplica la siguiente fórmula:

$$K_a \text{ final} = K_a(20^\circ\text{C}) (1.024)^{(T^\circ - 20^\circ\text{C})} \quad \text{Ecuación. (8)}$$

$$K_a \text{ final} = 90.090 \text{ día}^{-1} (1.024)^{(16.2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 82.326 \text{ día}^{-1}$$

1.2.2. Tasa de reaireación por Dobbins y O'Connor:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.93 \left(\frac{V_{med}^{0.5}}{H_{med}^{1.5}} \right) \quad \text{Ecuación. (5)}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.93 \left(\frac{0.252 \frac{m}{s}}{0.643 m^{1.5}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.826 \text{ dia}^{-1}$$

La ecuación es establecida en resultados de dia^{-1}

K_a para la temperatura hídrica del tramo

$$K_a \text{ final} = 3.826 \text{ dia}^{-1} (1.024^{(16.2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 3.496 \text{ dia}^{-1}$$

1.2.3. Tasa de reaireación por Owens y Gibbs:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 5.32 \left(\frac{V_{med}^{0.67}}{H_{med}^{1.85}} \right) \quad \text{Ecuación. (7)}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 5.32 \left(\frac{0.252 \frac{m}{s}}{0.643 m^{1.85}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 4.783 \text{ dia}^{-1}$$

K_a para la temperatura hídrica del tramo:

$$K_a \text{ final} = 4.783 \text{ dia}^{-1} (1.024^{(16.2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 4,371 \text{ dia}^{-1}$$

1.3. TASA DE REAIREACIÓN EXPERIMENTAL ESTACIÓN DE MUESTREO UNO.

Tabla 6. Variables necesarias para Tasa de reaireación experimental.

VARIABLE	RESULTADO
Concentración inicial de oxígeno disuelto (C_o)	8.0 mg/L

Concentración final de oxígeno disuelto (C_f)	7.95 mg/L
Velocidad media en el tramo (V_{med})	21772,8 m/día
Longitud en el tramo (L_{tramo})	80 m
Temperatura Hídrica del tramo (T°)	16.2 °C
Altitud (Alt_{Tramo})	1788 m.s.n.m.

Fuente. Elaboración propia.

Formula tasa de reaireación experimental:

$$\ln \left(\frac{(C_s - C_f)}{(C_s - C_o)} \right) = -K_a (\text{Tiempo}) \quad \text{Ecuación. (3)}$$

1.3.1. Concentración de saturación de oxígeno para la temperatura hídrica del tramo y la Presión Atmosférica.

La Concentración de saturación (C_s) se halla con los valores de la constante de la ley de Henry (K_H) para la temperatura de campo y los valores de presión parcial del oxígeno en el aire.

$$[C_s \text{ OD}] = K_H * P_g$$

$C_s \text{ OD}$ = Concentración de saturación de oxígeno en el agua (mg/L).

K_H = Constante de la Ley de Henry para la temperatura de campo (mol / L*Atm).

P_g = Presión parcial del gas en el aire (Atm)

El valor medio de oxígeno en el aire es de 21% y el sitio de muestreo tiene una Altitud de 1788 m.s.n.m.

$$\rightarrow P_g = 0,21 * P$$

Para hallar P_g (Atm) se debe aplicar la fórmula de (Thomann y Mueller) la cual dice que la presión Atmosférica cambia con la Altitud del tramo de estudio.

$$P = P_0 - 1,15 \times 10^{-4} \times H$$

P = Presión Atmosférica a la Altitud (Atm).

P_0 =Presión Atmosférica a nivel del mar (Atm).

H= Altitud (m)

$P = 1 \text{ Atm} - 1,15 \times 10^{-4} \times 1788 \text{ m}$

→ $P = 0,7944 \text{ Atm}$.

Por tanto el valor de $P_g = 0,21 * 0,7944 \text{ Atm}$

→ **$P_g = 0,1668 \text{ Atm}$** .

Ya se tiene el valor de la presión parcial del gas en el aire, ahora se debe hallar la constante de la ley de Henry para la temperatura de campo. La siguiente tabla tiene los valores de las constantes para sus respectivas temperaturas.

Tabla 7. Constante de la ley de Henry respecto a la temperatura hídrica.

TEMPERATURA (°C)	CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY [O ₂] (mol/L*Atm)
0	0,0021812
5	0,0019126
10	0,0016963
15	0,0015236
20	0,0013840
25	0,0012630

Fuente. Libro introducción a la Ingeniería Medio Ambiental.

Como la Temperatura Hídrica del tramo (T°) es igual a 16.2°C y este valor no está en la tabla anterior, es necesario interpolar los valores K_H [O₂].

Interpolando:

Tabla 8. Ley de Henry para la temperatura hídrica de estación de muestreo.

TEMPERATURA (°C)	K_H [O ₂] (mol/L*Atm)
15	0,0015236
16.2	X

20	0,0013840
----	-----------

Fuente. Elaboración propia.

Diferencia de temperatura= 20°C – 15°C → **Dif T°= 5°C**

Diferencia de Coeficiente ley Henry= 0,0015236 mol/L*Atm – 0,0013840 mol/L *Atm

→ Dif K_H (5°C) = 0,0001396 mol/L *Atm

$$\text{Dif } K_H (1^\circ\text{C}) = \frac{(\text{Dif } K_H 5^\circ\text{C})}{(\text{Dif } T^\circ)} \rightarrow K_H \text{ a } (1^\circ\text{C}) = \frac{0,0001396 \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{Atm}}}{5} \rightarrow \mathbf{K_H (1^\circ\text{C})} = 2,792 \times 10^{-5} \text{ mol/L} \cdot \text{Atm}$$

$$\text{Dif } K_H (0.2^\circ\text{C}) = \frac{(K_H 1^\circ\text{C})}{5} \rightarrow K_H (0.2^\circ\text{C}) = \frac{2,792 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{Atm}}}{5} \rightarrow \mathbf{K_H (0.2^\circ\text{C})} = 5,584 \times 10^{-6} \text{ mol/L} \cdot \text{Atm}$$

→ **Dif K_H (16.2°C)** = 0,0015236 mol/L *Atm – 2,792 x 10⁻⁵ mol/L *Atm – 5,584 x 10⁻⁶ mol/L *Atm

→ **Dif K_H (16.2°C)** = 1,49009 x 10⁻³ mol/L *Atm

Ya es posible hallar la concentración se saturación de oxígeno.

$$[C_s \text{ OD}] = K_H \cdot P_g$$

$$[C_s \text{ OD}] = (1,49009 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \cdot \text{Atm}) (0,1668 \text{ Atm})$$

$$[C_s \text{ OD}] = (2,48 \times 10^{-4} \frac{\text{mol Oxigeno}}{\text{Litro}}) \left(\frac{32 \text{ g}}{1 \text{ mol Oxigeno}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right)$$

$$[C_s \text{ OD}] = 7,94 \text{ mg/L}$$

Tasa de reaireación experimental:

$$\ln \left(\frac{(C_s - C_f)}{(C_s - C_o)} \right) = -K_a (\text{tiempo})$$

t= Tiempo medio de viaje en el tramo:

$$t = \frac{80 \text{ m}}{21772,8 \frac{\text{m}}{\text{día}}}$$

$$t = 0,003674 \text{ día}$$

$$\ln \left(\frac{7,94 \frac{mg}{L} - 7,95 \frac{mg}{L}}{7,94 \frac{mg}{L} - 8,00 \frac{mg}{L}} \right) = -K_a (0,003674 \text{ día})$$

$$\left(\frac{-1,79176}{0,003674 \text{ día}} \right) = -K_a$$

$$\rightarrow k_a = 487,686 \text{ día}^{-1}$$

2. AFORO DEL CAUDAL, TASAS DE REAIREACIÓN PREDICTIVAS Y EXPERIMENTAL ESTACIÓN DE MUESTREO DOS, RÍO MOLINO EN BARRIO CENTRO.

2.1. AFORO DEL CAUDAL ESTACIÓN DE MUESTREO DOS.

Tabla 9. Datos de campo aforo del caudal.

OBSERVACIÓN	RESULTADO
Ancho de la corriente (m)	7,7
Ancho recomendado franja (m)	1,0
Número de franjas (unidad)	8
Longitud en el tramo (m)	93
Diferencia de altura en el tramo (m)	0.39

Fuente. Elaboración propia.

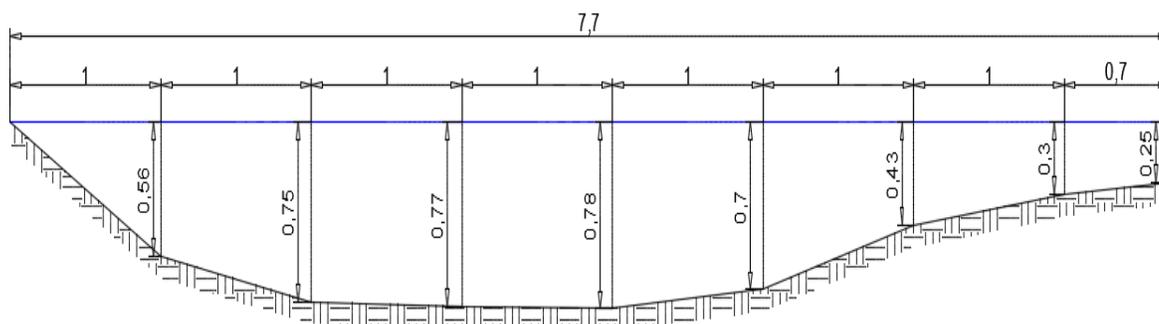
Tabla 10. Área en las secciones aforadas, estación dos.

SECCIONES	ANCHO (m)	PROFUNDIDAD (m)	FIG GEOMÉTRICA	ÁREA (m ²)
Sección 1	1.0	0.56	Triángulo	0.280
Sección 2	1.0	0.75	Trapezio	0.655
Sección 3	1.0	0.77	Trapezio	0.760
Sección 4	1.0	0.78	Trapezio	0.775
Sección 5	1.0	0.70	Trapezio	0.740
Sección 6	1.0	0.43	Trapezio	0.565
Sección 7	1.0	0.30	Trapezio	0.365
Sección 8	0.7	0.25	Trapezio	0.193

Profundidad media= 0.568

Fuente. Elaboración propia.

Imagen 2. Datos de aforo del caudal estación dos.



Fuente. Elaboración propia.

Se procede a medir la velocidad en cada vertical

Tabla 11. Velocidad media en las verticales

VERTICALES	MÉTODO VELOCIDAD	PROFUNDIDAD (h) en (m)	CON EL % DE PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD MEDIA EN VERTICAL (m/s)
Vertical 1	60 %	0.56	0.336	0.39
Vertical 2	60 %	0.75	0.450	0.48
Vertical 3	60 %	0.77	0.462	0.54
Vertical 4	60 %	0.78	0.468	0.42
Vertical 5	60 %	0.70	0.420	0.43
Vertical 6	60%	0.43	0.258	0.16
Vertical 7	50%	0.30	0.150	0.12
Vertical 8	50%	0.25	0.125	0.24

Fuente. Elaboración propia.

Se halla la velocidad en cada sección:

Tabla 12. Velocidad media en la estación y caudal Total.

SECCIONES	VELOCIDAD MEDIA EN LAS VERTICALES (m/s)		VELOCIDAD EN CADA SECCIÓN (m/s)	ÁREA EN CADA SECCIÓN (m ²)	VALORES DE CAUDALES UNITARIOS (m ³ /s)
Sección 1	No	0.39	0.390	0.280	0.109
Sección 2	0.39	0.48	0.435	0.655	0.285
Sección 3	0.48	0.54	0.510	0.760	0.388
Sección 4	0.54	0.42	0.480	0.775	0.372
Sección 5	0.42	0.43	0.425	0.740	0.315
Sección 6	0.43	0.16	0.295	0.565	0.167

Sección 7	0.16	0.12	0.140	0.365	0.051
Sección 8	0.12	0.24	0.180	0.193	0.035

Velocidad media= 0.357

Caudal total= 1.722

Fuente. Elaboración propia.

2.2. TASAS DE REAIREACIÓN PREDICTIVAS ESTACIÓN DE MUESTREO DOS.

Tabla 13. Variables necesarias para tasas de reaireación predictivas.

VARIABLES	RESULTADO
Longitud en el tramo (L_{tramo})	93 m
Velocidad media del agua (V_{med})	0.357 m/s o 30844.8 m/día
Diferencia de alturas en el tramo (ΔH)	0.39 m
Profundidad media (H_{med})	0.568 m
Temperatura hídrica del tramo (T°)	17.6 °C
Caudal (Q)	1.722 m ³ /s

Fuente. Elaboración propia.

2.2.1. Tasa de reaireación por Tsvoglou y Wallace:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = C \left(\frac{\Delta H}{t} \right) \quad \text{Ecuación. (4)}$$

C= Constante C depende del caudal existente.

C= 0.360 para $0.028 \leq Q \leq 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$

{El caudal **Q** es **1.722 m³/s** se aplica **C= 0.177**

C= 0.177 para $0.708 \leq Q \leq 85 \text{ m}^3/\text{s}$.

t= tiempo medio de viaje en el tramo.

$$t = \left(\frac{L_{\text{tramo}}}{V_{\text{med}}} \right)$$

$$t = \frac{93 \text{ m}}{30844.8 \frac{\text{m}}{\text{día}}}$$

$$t = 3.015 \times 10^{-3} \text{ día.}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 0.177 \left(\frac{0.39 \text{ m}}{3.015 \times 10^{-3} \text{ día}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 22.896 \text{ día}^{-1}$$

Se debe obtener K_a para la temperatura hídrica en el tramo, entonces se aplica la siguiente fórmula:

$$K_a \text{ final} = K_a(20^\circ\text{C}) (1.024^{(T^\circ - 20^\circ\text{C})}) \quad \text{Ecuación. (8)}$$

$$K_a \text{ final} = 22.896 \text{ día}^{-1} (1.024^{(17.6^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 21.629 \text{ día}^{-1}$$

2.2.2. Tasa de reaeración por Dobbins y O'Connor:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.93 \left(\frac{V_{med}^{0.5}}{H_{med}^{1.5}} \right) \quad \text{Ecuación. (5)}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.93 \left(\frac{0.357 \frac{\text{m}^{0.5}}{\text{s}}}{0.568 \text{ m}^{1.5}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 5.485 \text{ día}^{-1}$$

K_a para la temperatura hídrica del tramo

$$K_a \text{ final} = 5.485 \text{ día}^{-1} (1.024^{(17.6^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 5.182 \text{ día}^{-1}$$

2.2.3. Tasa de reaeración por Owens y Gibbs:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 5.32 \left(\frac{V_{med}^{0.67}}{H_{med}^{1.85}} \right) \quad \text{Ecuación. (7)}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 5.32 \left(\frac{0.357 \frac{\text{m}^{0.67}}{\text{s}}}{0.568 \text{ m}^{1.85}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 7.597 \text{ día}^{-1}$$

K_a para la temperatura hídrica del tramo:

$$K_a \text{ final} = 7.597 \text{ día}^{-1} (1.024^{(17.6^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

→ $K_a \text{ final} = 7.177 \text{ dia}^{-1}$

2.3. TASA DE REAIREACIÓN EXPERIMENTAL ESTACIÓN DE MUESTREO DOS.

Tabla 14. Variables necesarias para Tasa de reaireación experimental.

VARIABLE	RESULTADO
Concentración inicial de oxígeno disuelto (C_o)	7.52 mg/L
Concentración final de oxígeno disuelto (C_f)	7.57 mg/L
Velocidad media en el tramo (V_{med})	30844,8 m/día
Longitud en el tramo (L_{tramo})	93 m
Temperatura Hídrica del tramo (T°)	17.6 °C
Altitud (Alt_{tramo})	1732 m.s.n.m

Fuente. Elaboración propia

Formula tasa de reaireación experimental:

$$\ln \left(\frac{C_s - C_f}{C_s - C_o} \right) = -K_a (\text{Tiempo}) \quad \text{Ecuación. (3)}$$

2.3.1. Concentración de saturación de oxígeno para la temperatura hídrica del tramo y la presión Atmosférica.

La Concentración de saturación (C_s) se halla con los valores de la constante de la ley de Henry (K_H) para la temperatura de campo y los valores de presión parcial del oxígeno en el aire.

$$[C_s \text{ OD}] = K_H * P_g$$

$C_s \text{ OD}$ = Concentración de saturación de oxígeno en el agua (mg/L).

K_H = Constante de la Ley de Henry para la temperatura de campo (mol / L*Atm).

P_g = Presión parcial del gas en el aire (Atm)

El valor medio de oxígeno en el aire es de 21% y el sitio de muestreo tiene una Altitud de 1732 m.s.n.m.

$$\rightarrow P_g = 0,21 * P$$

Para hallar P_g (Atm) se debe aplicar la fórmula de (Thomann y Mueller) la cual dice que la presión Atmosférica cambia con la Altitud del tramo de estudio.

$$P = P_0 - 1,15 \times 10^{-4} \times H$$

P = Presión Atmosférica a la Altitud (Atm).

P_0 = Presión Atmosférica a nivel del mar (Atm).

H = Altitud (m)

$$P = 1 \text{ Atm} - 1,15 \times 10^{-4} \times 1732 \text{ m}$$

$$\rightarrow P = 0,8008 \text{ Atm.}$$

Por tanto el valor de $P_g = 0,21 * 0,8008 \text{ Atm}$

$$\rightarrow P_g = 0,1682 \text{ Atm.}$$

Ya se tiene el valor de la presión parcial del gas en aire, ahora se debe hallar la constante de la ley de Henry (K_H) para la temperatura de campo. La siguiente tabla tiene los valores de las constantes para sus respectivas temperaturas.

Tabla 15. Constante de la ley de Henry respecto a la temperatura hídrica.

TEMPERATURA (°C)	CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY [O ₂] (mol/L*Atm)
15	0,0015236
20	0,0013840
25	0,0012630

Fuente. Libro introducción a la Ingeniería Medio Ambiental.

Como la Temperatura Hídrica del tramo (T°) es igual a 17.6°C y este valor no está en la tabla anterior, es necesario interpolar los valores K_H [O₂].

Interpolando:

TEMPERATURA (°C)	K_H [O ₂] (mol/L*Atm)
15	0,0015236

17.6	X
20	0,0013840

Tabla 16. Ley de Henry para la temperatura hídrica de estación de muestreo.

Fuente. Elaboración propia.

Diferencia de temperatura= 20°C – 15°C → **Dif T°= 5°C**

Diferencia de Coeficiente ley Henry= 0,0015236 mol/L*Atm – 0,0013840 mol/L*Atm

→ Dif K_H (5°C)= 0,0001396 mol/L*Atm

Dif K_H (1°C)= $\frac{(Dif\ K_H\ 5^\circ C)}{(Dif\ T^\circ)} \rightarrow K_H\ a\ (1^\circ C) = \frac{0,0001396 \frac{mol}{L*Atm}}{5} \rightarrow K_H\ (1^\circ C) = 2,792 \times 10^{-5}$
mol/L*Atm

Dif K_H (0.1°C)= $\frac{(K_H\ 1^\circ C)}{10} \rightarrow K_H\ (0.2^\circ C) = \frac{2,792 \times 10^{-5} \frac{mol}{L*Atm}}{10} \rightarrow K_H\ (0.2^\circ C) = 2,792 \times 10^{-6}$
mol/L*Atm

→ **Dif K_H (17.6°C)** = 0,0015236 mol/L*Atm – (2,792 x 10⁻⁵ mol/L*Atm (2)) – (2,792 x 10⁻⁶ mol/L*Atm (6))

→ **Dif K_H (17.6°C)** = 1,45101 x 10⁻³ mol/L*Atm

Ya es posible hallar la concentración se saturación de oxígeno.

[Cs OD]= K_H * P_g

[Cs OD]= (1,45101 x 10⁻³ mol/L*Atm) (0,1682 Atm)

[Cs OD]= $(2,441 \times 10^{-4} \frac{mol\ Oxigeno}{Litro}) (\frac{32\ g}{1\ mol\ Oxigeno}) (\frac{1000\ mg}{1\ g})$

[Cs OD]= 7,81 mg/L

Tasa de reaireación experimental:

$\ln \left(\frac{(C_s - C_f)}{(C_s - C_o)} \right) = -K_a (\text{Tiempo})$

t= Tiempo medio de viaje en el tramo:

$t = \frac{93\ m}{30844,8 \frac{m}{día}}$

t= 0,003015 día

$$\ln \left(\frac{7,81 \frac{mg}{L} - 7,57 \frac{mg}{L}}{7,81 \frac{mg}{L} - 7,52 \frac{mg}{L}} \right) = -K_a (0,003015 \text{ día})$$

$$\left(\frac{-0,18924}{0,003015 \text{ día}} \right) = -K_a$$

→ $k_a = 62,7662 \text{ día}^{-1}$

3. AFORO DEL CAUDAL, TASAS DE REAIREACIÓN PREDICTIVAS Y EXPERIMENTAL ESTACIÓN DE MUESTREO TRES, RIO MOLINO EN EL BARRIO JUNÍN ANTES DE UNIRSE AL RIO EJIDO.

3.1. AFORO DEL CAUDAL ESTACIÓN DE MUESTREO TRES.

Tabla 17. Datos de campo aforo del caudal.

OBSERVACIÓN	RESULTADO
Ancho de la corriente (m)	9.5
Ancho recomendado franja (m)	1.5
Número de franjas (unidad)	7
Longitud en el tramo (m)	95
Diferencia de altura en el tramo (m)	0.93

Fuente. Elaboración propia

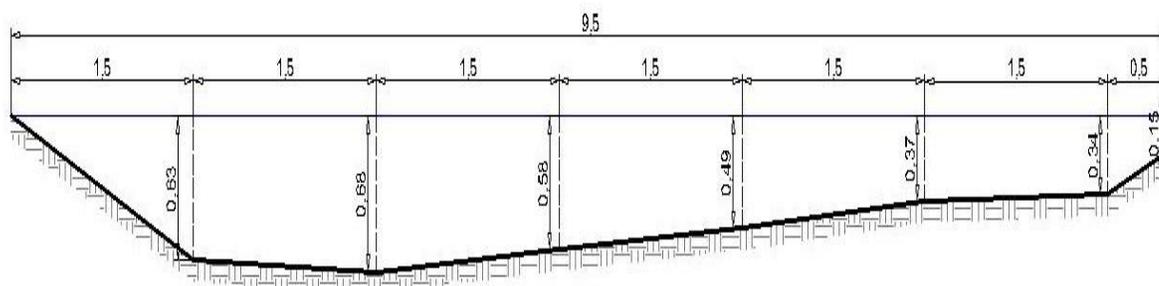
Tabla 18. Área en las secciones aforadas, estación tres.

SECCIONES	ANCHO (m)	PROFUNDIDAD (m)	FIG GEOMÉTRICA	ÁREA (m ²)
Sección 1	1.5	0.63	Triángulo	0.473
Sección 2	1.5	0.68	Trapezio	0.983
Sección 3	1.5	0.58	Trapezio	0.945
Sección 4	1.5	0.49	Trapezio	0.803
Sección 5	1.5	0.37	Trapezio	0.645
Sección 6	1.5	0.34	Trapezio	0.533
Sección 7	0.5	0.15	Trapezio	0.123

Profundidad media= 0.463

Fuente. Elaboración propia

Imagen 3. Datos de aforo del caudal estación tres.



Fuente. Elaboración propia

Se procede a medir la velocidad en cada vertical

Tabla 19. Velocidad media en las verticales.

VERTICALES	METODO VELOCIDAD	PROFUNDIDAD (h) en (m)	CON EL % DE PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD MEDIA EN VERTICAL (m/s)
Vertical 1	60 %	0.63	0.378	0.10
Vertical 2	60 %	0.68	0.408	0.75
Vertical 3	60 %	0.58	0.348	0.65
Vertical 4	60 %	0.49	0.294	0.70
Vertical 5	50 %	0.37	0.185	0.46
Vertical 6	50%	0.34	0.170	0.29
Vertical 7	50%	0.15	0.075	0.13

Profundidad media. 0,463

Fuente. Elaboración propia.

Se halla la velocidad en cada sección:

SECCIONES	VELOCIDAD MEDIA EN LAS VERTICALES (m/s)		VELOCIDAD EN CADA SECCION (m/s)	AREA EN CADA SECCION (m ²)	VALORES DE CAUDALES UNITARIOS (m ³ /s)
Sección 1	No	0.10	0.100	0.473	0.0473
Sección 2	0.10	0.75	0.425	0.983	0.418

Sección 3	0.75	0.65	0.700	0.945	0.662
Sección 4	0.65	0.70	0.675	0.803	0.542
Sección 5	0.70	0.46	0.580	0.645	0.374
Sección 6	0.46	0.29	0.375	0.533	0.200
Sección 7	0.29	0.13	0.210	0.123	0.026

Tabla 20. Velocidad media en la estación y caudal Total.

Velocidad media= 0.438 Caudal total= 2.269

Fuente. Elaboración propia.

3.2. TASA DE REAIREACIÓN EMPÍRICA ESTACIÓN DE MUESTREO TRES.

Tabla 21. Variables necesarias para tasas de reaireación predictivas.

VARIABLES	RESULTADO
Longitud en el tramo (L_{tramo})	95 m
Velocidad media del agua (V_{med})	0.438 m/s o 37843.2 m/día
Diferencia de altura en el tramo (ΔH)	0.93 m
Profundidad media (H_{med})	0.463 m
Temperatura hídrica del tramo (T°)	20.2 °C
Caudal (Q)	2.269 m ³ /s

Fuente. Elaboración propia.

1.1.1. Tasa de reaireación por Tsvoglou y Wallace:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = C \left(\frac{\Delta H}{t} \right) \quad \text{Ecuación. (4)}$$

C= Constante C depende del caudal existente.

C= 0.360 para $0.028 \leq Q \leq 0.28$ m³/s

{El caudal **Q** es **2.269** m³/s se aplica **C= 0.177**

C= 0.177 para $0.708 \leq Q \leq 85$ m³/s.

t= tiempo medio de viaje en el tramo.

$$t = \left(\frac{L_{\text{tramo}}}{V_{\text{med}}} \right)$$

$$t = \frac{95 \text{ m}}{37843.2 \frac{\text{m}}{\text{día}}}$$

$$t = 2.510 \times 10^{-3} \text{ día}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 0.177 \left(\frac{0.93 \text{ m}}{2.510 \times 10^{-3} \text{ día}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 65.582 \text{ día}^{-1}$$

Se debe obtener K_a para la temperatura hídrica en el tramo, entonces se aplica la siguiente fórmula:

$$K_a \text{ final} = K_a(20^\circ\text{C}) (1.024^{(T^\circ - 20^\circ\text{C})}) \quad \text{Ecuación. (8)}$$

$$K_a \text{ final} = 65.582 \text{ día}^{-1} (1.024^{(20.2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 65.894 \text{ día}^{-1}$$

1.1.2. Tasa de reaireación por Dobbins y O'Connor:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.93 \left(\frac{V_{med}^{0.5}}{H_{med}^{1.5}} \right) \quad \text{Ecuación. (5)}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 3.93 \left(\frac{0.438 \frac{\text{m}}{\text{s}}^{0.5}}{0.463 \text{ m}^{1.5}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 8.256 \text{ día}^{-1}$$

K_a para la temperatura hídrica del tramo

$$K_a \text{ final} = 8.256 \text{ día}^{-1} (1.024^{(20.2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 8.295 \text{ día}^{-1}$$

1.1.3. Tasa de reaireación por Owens y Gibbs:

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 5.32 \left(\frac{V_{med}^{0.67}}{H_{med}^{1.85}} \right) \quad \text{Ecuación. (7)}$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 5.32 \left(\frac{0.438 \frac{\text{m}}{\text{s}}^{0.67}}{0.463 \text{ m}^{1.85}} \right)$$

$$K_a(20^\circ\text{C}) = 12.717 \text{ día}^{-1}$$

Ka para la temperatura hídrica del tramo:

$$K_a \text{ final} = 12.717 \text{ seg}^{-1} (1.024^{(20.2^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})})$$

$$\rightarrow K_a \text{ final} = 12.778 \text{ día}^{-1}$$

3.3. TASA DE REAIREACIÓN EXPERIMENTAL ESTACIÓN DE MUESTREO TRES.

Tabla 22. Variables necesarias para Tasa de reaireación experimental.

VARIABLE	RESULTADO
Concentración inicial de oxígeno disuelto (C_o)	6.57 mg/L
Concentración final de oxígeno disuelto (C_f)	6.67 mg/L
Velocidad media en el tramo (V_{med})	37843,2 m/día
Longitud en el tramo (L_{tramo})	95 m
Temperatura Hídrica del tramo (T°)	20.2 °C
Altitud en el tramo ($A_{altitud}$)	1701 m.s.n.m.

Fuente. Elaboración propia

Formula tasa de reaireación experimental:

$$\ln \left(\frac{C_s - C_f}{C_s - C_o} \right) = -K_a (\text{Tiempo}) \quad \text{Ecuación. (3)}$$

3.3.1. Concentración de saturación de oxígeno para la temperatura hídrica del tramo y la Presión Atmosférica.

La Concentración de saturación (C_s) se halla con los valores de la constante de la ley de Henry (K_H) para la temperatura de campo y los valores de presión parcial del oxígeno en el aire.

$$[C_s \text{ OD}] = K_H * P_g$$

$C_s \text{ OD}$ = Concentración de saturación de oxígeno en el agua (mg/L).

K_H = Constante de la Ley de Henry para la temperatura de campo (mol / L*Atm).

P_g = Presión parcial del gas en el aire (Atm)

El valor medio de oxígeno en el aire es de 21% y el sitio de muestreo tiene una Altitud de 1701 m.s.n.m.

$$\rightarrow P_g = 0,21 * P$$

Para hallar P_g (Atm) se debe aplicar la fórmula de (Thomann y Mueller) la cual dice que la presión Atmosférica cambia con la Altitud del tramo de estudio.

$$P = P_0 - 1,15 \times 10^{-4} \times H$$

P = Presión Atmosférica a la Altitud (Atm).

P_0 = Presión Atmosférica a nivel del mar (Atm).

H = Altitud (m)

$$P = 1 \text{ Atm} - 1,15 \times 10^{-4} \times 1701 \text{ m}$$

$$\rightarrow P = 0,8044 \text{ Atm.}$$

Por tanto el valor de $P_g = 0,21 * 0,8044 \text{ Atm}$

$$\rightarrow \mathbf{P_g = 0,1689 \text{ Atm.}}$$

Ya se tiene el valor de la presión parcial del oxígeno a la altitud de muestreo, ahora se debe hallar la constante de la ley de Henry para la temperatura de campo. La siguiente tabla tiene los valores de las constantes para sus respectivas temperaturas.

Tabla 23. Constante de la ley de Henry respecto a la temperatura hídrica.

TEMPERATURA (°C)	CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY [O ₂] (mol/L*Atm)
15	0,0015236
20	0,0013840
25	0,0012630

Fuente. Libro introducción a la Ingeniería Medio Ambiental.

Como la Temperatura Hídrica del tramo (T°) es igual a 20,2°C y este valor no está en la tabla anterior, es necesario interpolar los valores $K_H [O_2]$.

Interpolando:

Tabla 24. Ley de Henry para la temperatura hídrica de estación de muestreo.

TEMPERATURA (°C)	K _H [O ₂] (mol/L*Atm)
20	0,0013840
20.2	X
25	0,0012630

Fuente. Elaboración propia.

Diferencia de temperatura= 25°C – 20°C → **Dif T°= 5°C**

Diferencia de Coeficiente ley Henry= 0,0013840 mol/L*Atm – 0,0012630 mol/L*Atm

→ Dif K_H (5°C) = 0,000121 mol/L*Atm

$$\text{Dif } K_H (1^\circ\text{C}) = \frac{(\text{Dif } K_H 5^\circ\text{C})}{(\text{Dif } T^\circ)} \rightarrow K_H \text{ a } (1^\circ\text{C}) = \frac{0,000121 \frac{\text{mol}}{\text{L*Atm}}}{5} \rightarrow \mathbf{K_H (1^\circ\text{C})} = 2,42 \times 10^{-5} \text{ mol/L*Atm}$$

$$\text{Dif } K_H (0.2^\circ\text{C}) = \frac{(K_H 1^\circ\text{C})}{10} \rightarrow K_H (0.2^\circ\text{C}) = \frac{2,42 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L*Atm}}}{5} \rightarrow \mathbf{K_H (0.2^\circ\text{C})} = 4,84 \times 10^{-6} \text{ mol/L*Atm}$$

→ **Dif K_H (20.2°C)** = 0,0013840 mol/L*Atm – 4,84 x 10⁻⁶ mol/L*Atm

→ **Dif K_H (20.2°C)** = 1,3792 x 10⁻³ mol/L*Atm

Ya es posible hallar la concentración se saturación de oxígeno.

$$[C_s \text{ OD}] = K_H * P_g$$

$$[C_s \text{ OD}] = (1,3792 \times 10^{-3} \text{ mol/L*Atm}) (0,1689 \text{ Atm})$$

$$[C_s \text{ OD}] = (2,329 \times 10^{-4} \frac{\text{mol Oxígeno}}{\text{Litro}}) \left(\frac{32 \text{ g}}{1 \text{ mol Oxígeno}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right)$$

$$[C_s \text{ OD}] = 7,45 \text{ mg/L}$$

Tasa de reaireación experimental:

$$\ln \left(\frac{(C_s - C_f)}{(C_s - C_o)} \right) = -K_a (\text{Tiempo})$$

t= Tiempo medio de viaje en el tramo:

$$t = \frac{95 \text{ m}}{37843,2 \frac{\text{m}}{\text{día}}}$$

$$t = 0,002510 \text{ día}$$

$$\ln \left(\frac{7,45 \frac{mg}{L} - 6,67 \frac{mg}{L}}{7,45 \frac{mg}{L} - 6,57 \frac{mg}{L}} \right) = -K_a (0,002510 \text{ día})$$

$$\left(\frac{-0,12063}{0,002510 \text{ día}} \right) = -K_a$$

$$\rightarrow k_a = 48,0598 \text{ día}^{-1}$$

Anexo 7. Pruebas estadísticas no paramétricas de Moses.

PRUEBA DE MOSES PARA O'CONNOR-OWENS

Estadísticos de prueba^{a,b}

	VALOR
Amplitud de grupo de control observado	5
Sig. (unilateral)	,800
Valores atípicos recortados de cada extremo	. ^c

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: METODO

c. El grupo de control es demasiado pequeño para eliminar valores atípicos.

PRUEBA DE MOSES PARA O'CONNOR-TSIVOGLOU

Estadísticos de prueba^{a,b}

	VALOR
Amplitud de grupo de control observado	3
Sig. (unilateral)	,000
Valores atípicos recortados de cada extremo	. ^c

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: METODO

c. El grupo de control es demasiado pequeño para eliminar valores atípicos.

PRUEBA DE MOSES PARA OWENS-TSIVOGLOU

Estadísticos de prueba^{a,b}

	VALOR
Amplitud de grupo de control observado	3
Sig. (unilateral)	,000
Valores atípicos recortados de cada extremo	. ^c

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: METODO

c. El grupo de control es demasiado pequeño para eliminar valores atípicos.

PRUEBA DE MOSES PARA O'CONNOR-EXPERIMENTAL

Estadísticos de prueba^{a,b}

	VALOR
Amplitud de grupo de control observado	3
Sig. (unilateral)	,000
Valores atípicos recortados de cada extremo	. ^c

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: METODO

c. El grupo de control es demasiado pequeño para eliminar valores atípicos.

PRUEBA DE MOSES PARA OWENS-EXPERIMENTAL

Estadísticos de prueba^{a,b}

	VALOR
Amplitud de grupo de control observado	3
Sig. (unilateral)	,000
Valores atípicos recortados de cada extremo	. ^c

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: METODO

c. El grupo de control es demasiado pequeño para eliminar valores atípicos.

PRUEBA DE MOSES PARA TSIVOGLU-EXPERIMENTAL

Estadísticos de prueba^{a,b}

	VALOR
Amplitud de grupo de control observado	5
Sig. (unilateral)	,800
Valores atípicos recortados de cada extremo	. ^c

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: METODO

c. El grupo de control es demasiado pequeño para eliminar valores atípicos.

Anexo 8. Imágenes del proceso metodológico.

Imágenes 1. Equipos de medición de variables de campo y laboratorio.



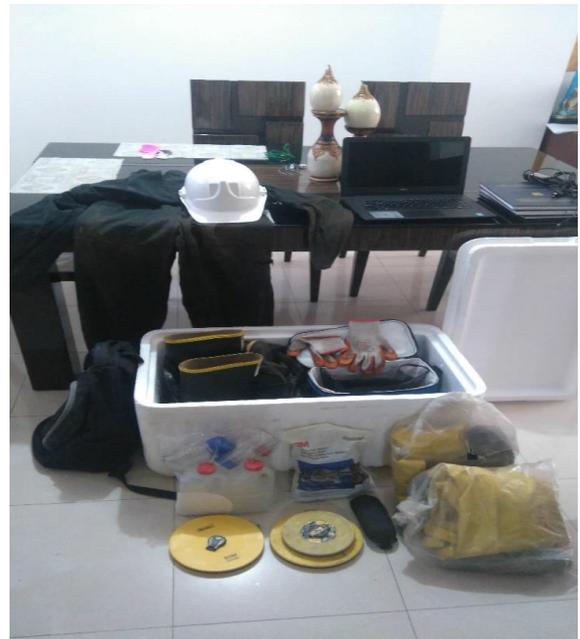
Mira de precisión.



Molinete con sensor



Equipo multiparamétrico.



Equipo de protección personal.



Mira de precisión con trípode.



Sondas multiparamétricas.



Turbidímetro.



Espectrofotómetro.



Campana desecadora.



Balanza analítica.



Horno secador.



Incinerador.

Imágenes 2. Medición de caudal por el método área velocidad.



Aforo del caudal, estación uno.



Aforo del caudal, estación dos.



Aforo del caudal, estación tres.

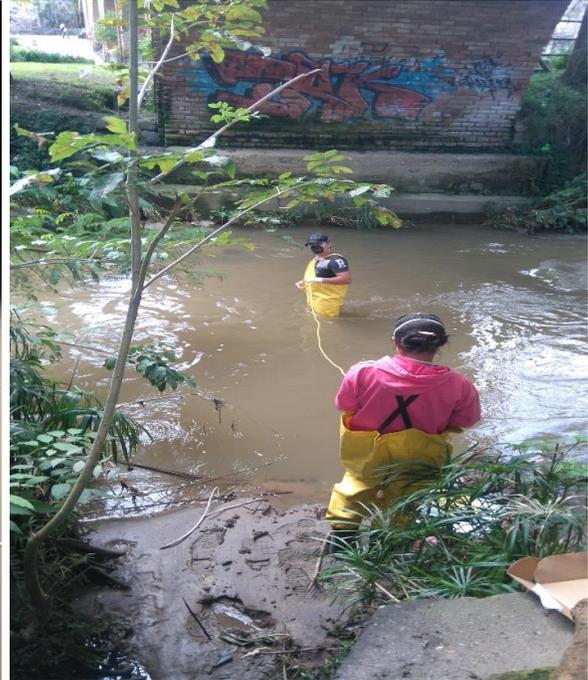


Personal colaborador.

Imágenes 3. Obtención de parámetros fisicoquímicos in situ y muestreo simple.



Análisis Fisicoquímico in situ E. uno.



Análisis F y Q in situ E. dos.



Análisis F y Q in situ E. tres.



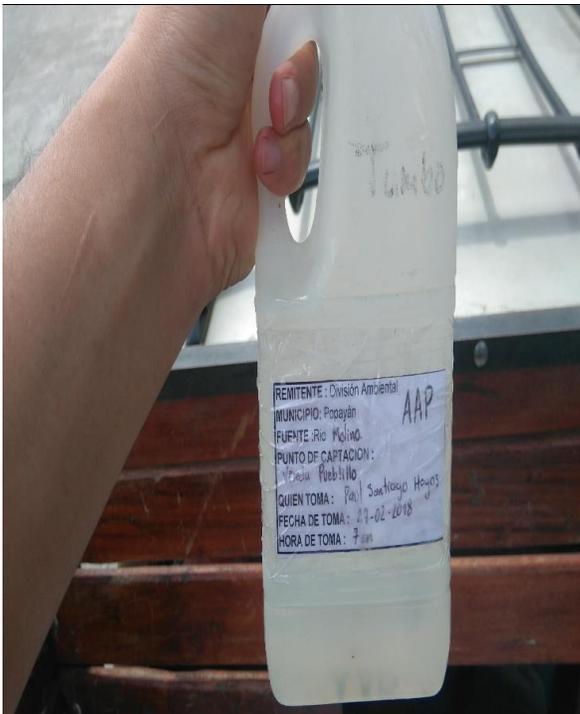
Muestreo simple estación uno.



Muestreo simple estación dos.



Muestreo simple E. tres.



Muestra simple rotulada.



Muestras refrigeradas.

Imágenes 4. Medición de diferencia de altura en las estaciones de muestreo.



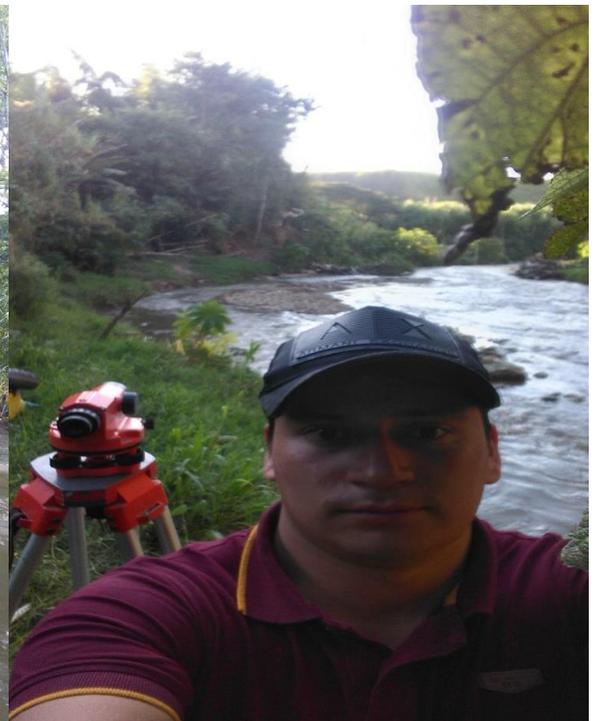
Nivel de precisión.



Diferencia de alturas E. uno.



Diferencia de alturas E. dos.



Diferencia de alturas E. tres.

