

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL**



**T E S I S**

**Simulación e implementación de un modelo de transporte de  
contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra,  
Simón Bolívar, 2022.**

**Para optar el Título Profesional de:**  
**Ingeniero Ambiental**

**Autor:**

**Bach. Leslie Evelyn HERRERA SAAVEDRA**

**Asesor:**

**Mg. Lucio ROJAS VITOR**

**Cerro de Pasco – Perú – 2024**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL**



**TESIS**

**Simulación e implementación de un modelo de transporte de  
contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra,  
Simón Bolívar, 2022.**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Dr. Luis Alberto PACHECO PEÑA**  
**PRESIDENTE**

---

**Dr. Eleuterio Andrés ZAVALA SANCHEZ**  
**MIEMBRO**

---

**Mg. Edgar Walter PEREZ JUZCAMAYTA**  
**MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides  
Carrión Facultad de Ingeniería  
Unidad de Investigación**

**INFORME DE ORIGINALIDAD N° 100-2024-UNDAC/UIFI**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**Simulación e implementación de un modelo de transporte de  
contaminantes conservativos en flujos de agua del rio Ragra,  
Simón Bolívar, 2022.**

Apellidos y nombres de los tesistas:

**Bach. HERRERA SAAVEDRA, Leslie Evelyn**

Apellidos y nombres del Asesor:

**Mg, ROJAS VITOR, Lucio**

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería Ambiental**

Índice de Similitud

**16 %**

**APROBADO**

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 1 de abril del 2024



## DEDICATORIA

*A mi adorada madre, Patricia, por su apoyo incondicional y confianza en mí.*

*A mis hermanos, por el respaldo brindado.*

*Y a toda mi querida familia.*

*Atte. Less.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis hermanos, Luis y John, que colaboraron e hicieron posible el desarrollo y culminación de esta investigación.*

*A mi asesor, Ing. Lucio, por la orientación brindada.*

*A Uds., mi más grato respeto, estima y admiración.*

*Gracias.*

## RESUMEN

Esta investigación tuvo por objetivo general simular e implementar un modelo hidrodinámico capaz de describir el comportamiento del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra, ubicado en el Distrito de Simón Bolívar, Cerro de Pasco, 2022. El desarrollo de esta investigación surgió de la necesidad de predecir el comportamiento de la concentración de contaminantes metros abajo de los vertimientos de aguas residuales. La metodología utilizada consistió en la aplicación del ensayo de trazadores salinos en los flujos de agua del río, el trazador usado fue el Cloruro de Sodio (NaCl – sal común); las mediciones de conductividad se realizaron en un tramo del río aguas abajo del punto de inyección. Una vez identificados los parámetros hidrológicos y características morfológicas del río se procedió a la calibración del Modelo de Transporte de Solutos ADZ, para finalmente lograr la simulación. Los resultados evidencian la factibilidad de uso del modelo ADZ en el tramo del río aplicado, asimismo es trascendental el análisis de los parámetros hidrológicos del río, debido a que tras su calibración se puede determinar el Tiempo Medio de Viaje ( $T_s$ ), Tiempo de Retraso Advectivo ( $\tau$ ) y el Tiempo de Residencia ( $T_r$ ), siendo  $0,25 \text{ m}^2/\text{s}$  el Factor Dispersivo (DF) para las simulaciones.

**Palabras clave:** contaminante conservativo, zona de mezcla, ensayo de trazadores, modelo de transporte de solutos ADZ, simulación.

## ABSTRACT

The general objective of this research was to simulate and implement a hydrodynamic model capable of describing the behavior of the transport of conservative contaminants in water flows of the Ragra River, located in the Simón Bolívar District, Cerro de Pasco, 2022. The development of this research arose of the need to predict the behavior of the concentration of pollutants meters below wastewater discharges. The methodology used consisted of the application of the test of saline tracers in the water flows of the river, the tracer used was Sodium Chloride (NaCl – common salt); Conductivity measurements were carried out in a section of the river downstream of the injection point. Once the hydrological parameters and morphological characteristics of the river were identified, the ADZ Solute Transport Model was calibrated to finally achieve the simulation. The results show the feasibility of using the ADZ model in the section of the river applied; the analysis of the hydrological parameters of the river is also essential, because after its calibration the Average Travel Time (Ts), Delay Time can be determined, Advective ( $\tau$ ) and the Residence Time (Tr), with 0.25 m<sup>2</sup>/s being the Dispersive Factor (DF) for the simulations.

**Keywords:** conservative contaminant, mixing zone, tracer assay, ADZ solute transport model, simulation.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua viene siendo una problemática a nivel mundial, siendo el crecimiento poblacional y las actividades económicas las principales causas del déficit del agua. El crecimiento de la población trae consigo un aumento de la demanda del consumo agua y la necesidad del hombre para encontrar cada vez más fuentes de abastecimiento con las condiciones de calidad óptimas para el uso que se requiera viene siendo una preocupación del día a día (García, 2008), y esto debido a que estas fuentes de abastecimiento de agua natural vienen siendo contaminados como producto de la actividad antrópica propia de la humanidad.

En nuestra ciudad, la contaminación de los recursos hídricos es de principal interés ambiental y social, según lo señala el estudio de índices de calidad y contenido de metales pesados en el río San Juan de Chirinos (2022), quien realizó un análisis de calidad a los ríos Ragra y Andacancha como tributarios del río San Juan, en donde se evidencia mayor impacto en el río Ragra, siendo considerada por el autor con un Índice Calidad "Pobre", y esto debido a la presencia de diversos contaminantes.

Ante esta problemática, surge la necesidad de búsqueda de una herramienta que nos permita conocer el comportamiento del transporte de los contaminantes conservativos en flujos de agua, del río Ragra, de esta manera poder predecir el comportamiento de estas concentraciones aguas abajo en estudios posteriores. Así mismo, esta investigación propone el uso de Cloruro de Sodio (NaCl) como trazador conservativo, por su aplicación en diversos ensayos.

El problema planteado para el estudio es: ¿Cómo se podrá simular e implementar un modelo hidrodinámico capaz de describir el comportamiento del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra?, cuyo objetivo es, simular e implementar un modelo hidrodinámico capaz de describir el comportamiento del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra.

Asimismo, se realizaron ensayos in situ con trazador salino para la calibración del modelo de trasportes de contaminantes conservativos. Olivar (2015), en su investigación de calibración de transporte de solutos, señala que el modelo ADZ es el que mejor logra ajustar las simulaciones de tiempo de viaje y tiempo de retraso advectivo, indica también que este modelo es más sencillo de calibrar ya que solo requiere de 2 parámetros.

Existen diversas metodologías para determinar el coeficiente de dispersión de contaminantes en cuerpos de agua loticos, siendo importante recordar que no todos los cuerpos de agua tienen las mismas características, por ende, es decisión del investigador el uso del modelo y materiales a usar.

Los procedimientos que se llevaron a cabo en esta investigación se ordenarán por fases, como se menciona a continuación: fase de identificación y reconocimiento, fase de campo, fase de modelación y por último la fase de simulación.

El contenido de esta investigación se divide en capítulos estructurados, tal como se describe a continuación:

Capítulo I, en él se describe la problemática base de esta investigación, se formularon las preguntas problemas y objetivos; así como las justificaciones y limitaciones para el desarrollo de este estudio.

Capítulo II, se presenta un resumen de los principales conceptos a desarrollar en el estudio, antecedentes y definición de términos.

Capítulo III, se plantea una metodología a seguir para el desarrollo del estudio y las técnicas e instrumentos a utilizar para la recolección de datos.

Capítulo IV, se describen los resultados obtenidos con el ensayo de trazadores, el modelo de transporte de solutos ADZ y la simulación realizada para un tramo del río Ragra.

Finalmente, esta investigación describe las principales conclusiones y las recomendaciones a las investigaciones interesadas en este tema de estudio y a la comunidad en general.

Esta investigación pretende dar a conocer conceptos de transporte de contaminantes en flujos de agua, siendo un problema de interés local, nacional e internacional, de la misma manera, pretende ser parte de un análisis inicial para posteriores investigaciones de calidad de agua, efectos de contaminación con metales pesados, así como de la evaluación del impacto de un vertimiento en un cuerpo natural de agua.

## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRAC

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

### CAPÍTULO I

#### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2.	DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN. ....	3
1.3.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. ....	4
1.3.1.	PROBLEMA GENERAL: .....	4
1.3.2.	PROBLEMAS ESPECÍFICOS:.....	4
1.4.	FORMULACIÓN DE OBJETIVOS. ....	4
1.4.1.	OBJETIVO GENERAL .....	4
1.4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.5.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN. ....	5
1.5.1.	JUSTIFICACIÓN PRACTICA .....	5
1.5.2.	JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	5
1.5.3.	JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL. ....	6
1.5.4.	JUSTIFICACIÓN SOCIAL. ....	6
1.6.	LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	6

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1.	ANTECEDENTES DE ESTUDIO. ....	8
2.1.1.	INTERNACIONAL. ....	8
2.1.2.	NACIONAL.....	9

2.1.3.	LOCAL.....	12
2.2.	BASES TEÓRICO – CIENTÍFICAS. ....	13
2.2.1.	RÍO RAGRA- FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO .....	13
2.2.2.	TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.....	15
2.2.3.	MODELO MATEMÁTICO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS .....	18
2.2.4.	ZONA DE MEZCLA. ....	20
2.2.5.	TÉCNICA DE TRAZADORES. ....	22
2.2.6.	SIMULACIÓN DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES. ....	26
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS. ....	27
2.4.	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS: .....	29
2.4.1.	HIPÓTESIS GENERAL.....	29
2.4.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	29
2.5.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES. ....	30
2.5.1.	VARIABLES INDEPENDIENTES.....	30
2.5.2.	VARIABLES DEPENDIENTES. ....	30
2.5.3.	VARIABLES INTERVINIENTES.....	31
2.6.	DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES.....	31

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN. ....	33
3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN. ....	33
3.3.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN. ....	34
3.4.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	34
3.5.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	35
3.6.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	36
3.6.1.	TÉCNICAS. ....	36
3.6.2.	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	36
3.7.	SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN. ....	37
3.7.1.	EQUIPO DE MEDICIÓN DE CAMPO: MULTIPARÁMETRO. ....	37
3.7.2.	FORMATO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS: CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y CAUDAL. ....	37
3.8.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS. ....	38
3.9.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO. ....	38
3.10.	ORIENTACIÓN ÉTICA FILOSÓFICA Y EPISTÉMICA. ....	38

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....	40
4.1.1.	IDENTIFICACIÓN Y RECONOCIMIENTO DEL CAUCE.....	40
4.1.2.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CAUCE.....	42
4.1.3.	ENSAYO DE TRAZADORES. ....	50
4.2.	PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. ....	61
4.2.1.	PARÁMETROS DEL MODELO ADZ. ....	61
4.2.2.	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN O FRACCIÓN DISPERSIVA (DF).....	64
4.2.3.	SIMULACIÓN DEL MODELO ADZ. ....	64
4.3.	PRUEBA DE HIPÓTESIS. ....	66
4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....	68

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

Anexo N° 1: Ficha técnica del Equipo - Multiparámetro.

Anexo N° 2: Ficha Técnica de Sal común.

Anexo N° 3: Ficha de recolección de datos de campo- Formato.

Anexo N° 4: Cálculo del Tiempo medio de Viaje  $t_s$  , en PM1 y PM2.

Anexo N° 5: Parámetros Modelo ADZ.

Anexo N° 6: Distribución de Concentraciones del Modelo ADZ.

Anexo N° 7: Panel Fotográfico.

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico N° 1:</b> Secciones Transversales del río.....	46
<b>Gráfico N° 2.</b> Curvas de conductividad de PM1 y PM2 .....	55
<b>Gráfico N° 3:</b> Calibración del equipo 1 . .....	57
<b>Gráfico N° 4:</b> Calibración del equipo 2. ....	57
<b>Gráfico N° 5:</b> Curvas de Concentración VS Tiempo .....	60
<b>Gráfico N° 6:</b> Datos de Campo VS Simulación .....	65

## ÍNDICE DE IMÁGENES

<b>Imagen N° 1:</b> Area de estudio- Punto de Inyeccion de trazadores. ....	43
<b>Imagen N° 2:</b> Medicion del tramo y colocacion de cuerda .....	45
<b>Imagen N° 3:</b> Medicion del area de la seccion transversal del río .....	46
<b>Imagen N° 4:</b> Recorrido del flotador de PC1 a PC2 .....	47
<b>Imagen N° 5:</b> Georreferenciacion del punto de inyeccion de trazadores .....	50
<b>Imagen N° 6:</b> Punto de inyeccion de trazadores .....	51
<b>Imagen N° 7:</b> Ensayo de trazadores.....	53

## ÍNDICE DE MAPAS

<b>Mapa N° 1:</b> Río Ragra.....	14
<b>Mapa N° 2:</b> Ubicación del Río Ragra - Simón Bolívar.....	41
<b>Mapa N° 3:</b> Ubicación de los puntos de medición de caudal-PC Inicial y PC Final.....	44
<b>Mapa N° 4:</b> Puntos de secciones Transversales. ....	45
<b>Mapa N° 5:</b> Ubicación del Punto de Inyección de Trazadores. ....	51
<b>Mapa N° 6:</b> Ubicación de los Puntos de medición de Conductividad- Campaña 02. ....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 1:</b> Operacionalización de la variable dependiente .....	31
<b>Tabla N° 2:</b> Operacionalización de las variables independientes.....	31
<b>Tabla N° 3:</b> Coordenadas UTM de los puntos de medición de caudal.....	43
<b>Tabla N° 4:</b> Tiempo de viaje entre PC1 y PC4 a una D=10 m.....	47
<b>Tabla N° 5:</b> Tiempo medio de viaje y velocidad superficial.....	48
<b>Tabla N° 6:</b> Área y Volumen de las secciones transversales.....	48
<b>Tabla N° 7:</b> Caudal .....	49
<b>Tabla N° 8:</b> Coordenadas UTM del Punto de inyección de trazadores.....	51
<b>Tabla N° 9:</b> Coordenadas UTM de los puntos de medición de trazadores.....	52
<b>Tabla N° 10:</b> Variación de Conductividad en PM1 y PM2.....	54
<b>Tabla N° 11:</b> Medición de Concentración.....	56
<b>Tabla N° 12:</b> Concentración en PM1 y PM2.....	58
<b>Tabla N° 13:</b> Tiempo medio de Viaje (ts).....	63
<b>Tabla N° 14:</b> Tiempo de rezago o de primer arribo ( $\tau$ ).....	63
<b>Tabla N° 15:</b> Tiempo de Residencia (Tr).....	64
<b>Tabla N° 16:</b> Coeficiente de Dispersión o Fracción Dispersiva (DF).....	64
<b>Tabla N° 17:</b> Parametros del modelo ADZ.....	65
<b>Tabla N° 18:</b> Medidas Estadísticas.....	67

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del Problema.**

La contaminación del agua y su disponibilidad para el consumo en el futuro es una problemática a nivel mundial, según la ONU un 90% de las aguas residuales de los países en desarrollo son vertidas directamente a los ríos, lagos o el mar, sin previo tratamiento, se estima que para el 2030 el mundo tendrá que enfrentarse a un déficit del 40% de agua dulce y que la demanda de agua se incrementará en un 55% en el año 2050 (ONU, 2015, pp. 1, 6). Esta problemática ha sido plasmada en el Objetivo 6 de la Agenda 2030, en donde se enfatiza “mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, eliminación de vertimientos y minimización de la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar, aumentando el reciclaje y reutilización sin riesgos a nivel mundial”. (Naciones Unidas, 2018, p. 35)

En la actualidad el crecimiento de la población trae consigo un aumento de la demanda del consumo agua y la necesidad del hombre para encontrar cada vez más fuentes de abastecimiento con las condiciones de calidad óptimas para el uso que se

requiera viene siendo una preocupación del día a día (García, 2008), y esto debido a que estas fuentes de abastecimiento de agua natural vienen siendo contaminados como producto de la actividad antrópica propia de la humanidad; Incahuanaco et al. (2021) menciona que actualmente la contaminación por metales pesados ha atraído mucho la atención debido a que son tóxicos, no degradables, tienden a acumularse en los sedimentos, son persistentes en los cuerpos de agua y su diversidad de fuentes, por otro lado, es de amplio conocimiento que muchas industrias han contribuido con el vertimiento de metales pesados a los ríos, lagos y lagunas sin previo tratamiento.

En nuestro país, el encargado de administrar y vigilar las fuentes naturales de agua, autorizar volúmenes de uso y/o distribución, evaluación de instrumentos ambientales, otorgar derechos de agua, entre otras funciones, es la Autoridad Nacional del Agua (ANA), cuyos muestreos evidencian la contaminación de las fuentes de agua, sin embargo, con los resultados de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, a través de sus diversas campañas “no se puede estimar si existe una tendencia hacia la mejora o al deterioro en la calidad de sus aguas, ni el grado de contaminación que presenta” (Chirinos, 2022).

Chirinos (2022), en su estudio de índices de calidad y contenido de metales pesados en el río San Juan, realizó un análisis de calidad a los ríos Ragra y Andacancha como tributarios del río San Juan, en donde se evidencia mayor impacto en el río Ragra, siendo considerada por el autor con un Índice Calidad “Pobre”, y esto debido a la presencia de diversos contaminantes según lo menciona a continuación:

*De los análisis de agua realizados en el periodo 2012 al 2018, se evidenció que existe incumplimiento muy significativo del ECA agua categoría 3- D1, principalmente por la presencia en concentraciones significativas de metales, DBO5 y más aun de Coliformes (p. 42).*

El autor señala también que el río Ragra aparte de ser impactado por el vertimiento de las aguas residuales de la ciudad, también se ve impactada por la presencia de la gran y mediana minería que hay en la zona.

Así mismo, García (2008) señala que la realización de campañas de monitoreo para conocer el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes en el agua no siempre serán la medida más apropiada para la regulación de la calidad del recurso debido a que existen más variables que hacen poco operativa esa alternativa, por ello se hace muy necesario recurrir a modelos matemáticos, “los cuales permiten evaluar de forma adecuada el comportamiento de la calidad del agua en una corriente natural, adicionalmente los modelos permiten la creación de escenarios a futuro, fundamentales para la planeación y gestión apropiada de los recursos naturales”(p. 9).

Con base a los datos de estudios descritos, surge la necesidad de búsqueda de una herramienta que nos permita conocer el comportamiento del transporte de los contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra, de esta manera poder predecir el impacto de estas concentraciones en la calidad del agua metros abajo en estudios posteriores. Así mismo, esta investigación propone el uso de Cloruro de Sodio (NaCl) como trazador conservativo, por su aplicación en diversos ensayos.

## **1.2. Delimitación de la Investigación.**

Esta investigación se limitará a la medición de concentraciones de NaCl como contaminante conservativo, no se tomará en consideración otros parámetros que no sean pertinentes al desarrollo del modelo de transporte y a su posterior simulación. Así mismo, el modelo a implementar solo será válido para el lugar de estudio en cuestión y para aquellos que tengan características similares a este. Cabe recalcar que el temporal del año es importante para el estudio, tal como lo señala la Autoridad Nacional del Agua y el Ministerio de Agricultura y Riego (2017) “en el caso de un vertimiento proyectado con un caudal constante a lo largo del año, será suficiente determinar las características

del cuerpo receptor en el periodo más crítico, es decir, en el periodo de estiaje” (p. 39). El desarrollo de la misma pretende servir de referencia de uso y aplicación en otros estudios de la misma línea de investigación.

### **1.3. Formulación del Problema.**

#### **1.3.1. Problema general:**

**PG:** ¿Cómo se podrá simular e implementar un modelo hidrodinámico capaz de describir el comportamiento del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra?

#### **1.3.2. Problemas específicos:**

**PE1:** ¿Qué modelo matemático de transporte de solutos es aplicable para la representación del sistema hidrodinámico de flujos de agua del río Ragra?

**PE2:** ¿Cuáles son los parámetros hidrodinámicos y las características morfológicas de los flujos de agua del río Ragra aplicables al modelo de transporte de contaminantes conservativos?

**PE3:** ¿De qué manera se podrá determinar el coeficiente de dispersión de los flujos de agua del río Ragra?

**PE4:** ¿De qué manera se podrá predecir el comportamiento de la dispersión longitudinal de contaminantes conservativos en flujos de agua?

### **1.4. Formulación de Objetivos.**

#### **1.4.1. Objetivo General**

**OG:** Simular e implementar un modelo hidrodinámico capaz de describir el comportamiento del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

**OE1:** Proponer un modelo matemático de transporte de solutos que represente el sistema hidrodinámico de los flujos de agua del río Ragra.

**OE2:** Determinar los parámetros hidrodinámicos y las características morfológicas de los flujos de agua del río Ragra aplicables al modelo de transporte de contaminantes conservativos.

**OE3:** Determinar el coeficiente de dispersión de los flujos de agua del río Ragra mediante la aplicación de un ensayo de trazadores.

**OE4:** Utilizar un software para predecir la dispersión longitudinal de contaminantes conservativos en flujos de agua.

#### **1.5. Justificación de la Investigación.**

##### **1.5.1. Justificación Práctica**

Esta investigación se justifica de manera práctica, debido a que no solo se hará uso de fuentes bibliográficas, sino que también se realizarán ensayos y muestreos in situ para la calibración del modelo de transportes de contaminantes conservativos, cuya finalidad será dar mayor soporte a la validez de los datos a utilizar.

##### **1.5.2. Justificación Metodológica**

Esta investigación se justifica de manera metodológica, debido a que tendrá como soporte las normas técnicas, protocolos y estudios con variables similares a esta, así mismo, los procedimientos serán cuidadosamente trabajados para el mayor entendimiento de esta.

En el mismo contexto, cabe recalcar que hay varias metodologías para determinar el coeficiente de dispersión de contaminantes en cuerpos de agua lóticos, siendo importante recordar que no todos los cuerpos de agua tienen las mismas

características, por ende, es decisión del investigador el uso del modelo y materiales a usar.

De acuerdo a la literatura consultada, no se encontró reglas o normas técnicas que regulen una metodología específica para los ensayos de trazadores, por lo tanto, se usó metodologías de ensayos de investigaciones anteriores.

#### **1.5.3. Justificación Ambiental.**

Esta investigación pretende dar a conocer conceptos de transporte de contaminantes en flujos de agua, siendo un problema de interés local, nacional e internacional, de la misma manera este estudio pretende ser parte de un análisis inicial para posteriores investigaciones de calidad de agua, efectos de contaminación con metales pesados, así como de la evaluación del impacto de un vertimiento en un cuerpo natural de agua.

#### **1.5.4. Justificación Social.**

Este proyecto de investigación es importante para la ciudadanía en general y sobre todo para la comunidades aledañas al río Ragra, quienes se ven afectados directamente por las condiciones de calidad del agua y los efectos a su salud , así mismo es importante también para estudiantes y profesionales, dado que propone metodologías de una recopilación de autores para determinar el transporte de contaminantes en un cuerpo receptor a través de la aplicación de cloruro de sodio, asimismo, será de gran utilidad para futuras investigaciones interesadas en estudios de cuerpos de agua y sus posibles impactos por vertimientos de aguas residuales.

### **1.6. Limitaciones de la Investigación.**

Una de las principales limitaciones en este proyecto de investigación es el costo de los instrumentos para realizar la medición de los parámetros hidrodinámicos del cuerpo receptor con validación acreditada, por ende, se optó por realizar ensayos para

medición de caudal y velocidad de flujo según la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y herramientas de medición comunes para la determinación de las características morfológicas del río. Así mismo, para el desarrollo del ensayo de trazadores, se vio por conveniente realizarlos en el laboratorio de Microbiología de la Undac debido a que cuenta con los equipos y materiales necesarios para el procedimiento.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de Estudio.

##### 2.1.1. Internacional.

**Ruiz (2017).** Tesis de Maestría: *Implementación de un Modelo de Calidad de Agua Aplicable a la Simulación de Metales Pesados en Corrientes con caso de Estudio en la Cuenca del Río Negro.* Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Esta investigación tiene como objetivo implementar un modelo de calidad de agua unidimensional que permita estudiar el comportamiento de la concentración de metales pesados a lo largo de una corriente. Según la metodología de trabajo se hizo uso de información secundaria necesaria para iniciar con la investigación, para luego realizar una descripción de la zona de estudio y diversas fuentes de información, posteriormente realizó una descripción de los métodos de modelación como el ADE, ADZ, y QUASAR ADZ. La investigación concluye que con el modelo se obtuvieron valores óptimos en la etapa preliminar y en el ejercicio de validación lo que indica que el uso de la estrategia cumple los fines propuestos, también recalca que para la modelación de la

calidad del agua se realizó una modelación hidráulica cuya metodología no descarta usar información de escala más fina para disminuir los grados de libertad. Finalmente, el investigador recomienda seleccionar adecuadamente el área de estudio, realizar una correcta definición de la hidráulica del sistema y del tramo de análisis.

### **2.1.2. Nacional.**

**Cerna y Rodríguez (2021).** Tesis de pregrado: *Modelamiento y simulación de la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río.* Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú.

Esta investigación tiene como objetivo modelar y simular la dispersión de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en un río de flujo turbulento. La investigación corresponde al tipo mixto con datos experimentales secundarios, siendo de nivel correlacional y de diseño cuasi experimental, explicativa y predictiva; según la metodología de trabajo se determinaron las características hidrodinámicas del río, para luego elaborar un modelo matemático con base al modelo ya existente de Streeter y Phelps. Para el desarrollo del modelo se usó el software Polymath. Como resultados se obtuvieron perfiles de concentración vs tiempo para cada longitud y a la vez la concentración vs distancia para cada tiempo. Los resultados concluyen en que se ha logrado modelar el proceso de desoxigenación como consecuencia de la carga orgánica carbonacea y nitrogenada, materia orgánica y déficit de oxígeno. los investigadores recomiendan utilizar el trabajo realizado para investigaciones experimentales preliminares.

**Nakaya y Saavedra (2020).** Tesis de pregrado: *Dispersión de contaminantes solubles en la cuenca baja del río Mala, provincia de Cañete, en época seca.* Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

Esta investigación tiene como objetivo simular la dispersión de contaminantes solubles mediante trazadores (Cloruro de Sodio y Rhodamina) en cursos de agua regular

e irregular en época seca, en la cuenca baja del río Mala a través de modelos unidimensionales. La investigación corresponde al tipo experimental con la obtención de datos en campo como fuente de información primaria; según la metodología de trabajo se determinaron las características hidrodinámicas de dos tramos de la cuenca del río Mala y mediante la técnica de inyección se usaron los marcadores midiendo la conductividad eléctrica de las muestras in situ, con la finalidad de obtener los coeficientes de dispersión, y a su vez elaborar un modelo unidimensional mediante la discretización de la ecuación de balance de masas, cuyos resultados indican que el tramo 2 fue más representativo por ser un tramo regular. Esta investigación concluye que las características hidrodinámicas dependen básicamente de la morfología del río y de las estaciones de muestreo; el coeficiente de dispersión es más bajo en el tramo irregular y se logró simular la dispersión de contaminantes a través de un modelo matemático, cabe tener en cuenta que los parámetros del modelo solo podrán ser usados en ríos con características similares al de la investigación.

**Claros et al. (2017).** Artículo científico: *Modelación de la dispersión de contaminantes del agua de la cuenca del río Huaura*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

Este artículo tiene como objetivo determinar un modelo matemático que permita conocer la dispersión de contaminantes del agua de la cuenca del río Huaura en el tramo Estación Alco – Desembocadura de Carquin. Esta investigación se realizó en el ámbito de la subcuenca del río Huaura, mediante la inyección de un trazador para evaluar la dispersión mediante la ecuación de advección- difusión unidimensional con coeficiente constante, se evaluó el aforo del caudal, por el método de flotadores, identificando un tramo del río Huaura con flujo uniforme, en periodo transicional a avenida. Los resultados permitieron determinar el caudal promedio y análisis de dispersión de contaminantes, como también se observó que el soluto se dispersa a

medida que se desplaza el fluido y se ve influenciado por el caudal. Esta investigación concluye con la determinación de la dispersión del modelo matemático mediante una ecuación y su margen de error correspondiente, también menciona que es importante tener un mayor número de datos experimentales para obtener mayor precisión en la simulación de advección, evaluando la composición química del trazador, identificando la interacción con el fluido.

**Quispe et al. (2016).** Artículo científico: *Dispersión de contaminantes en cursos de agua. Estudios en el río Chumbao, Perú.* Pontifica Universidad Católica Argentina, Buenos Aires, Argentina.

Este artículo tiene como fin estudiar el modo de dispersión de un contaminante vertido en un curso de agua mediante un método experimental que consiste en el uso de un marcador o sustancia traza. Según la metodología de trabajo el tramo en estudio es de 100 metros y la solución traza a usar es sal común (cloruro de sodio) vertido a través de un tubo de dos pulgadas, cuyas muestras fueron recolectadas cada treinta segundos en dirección río abajo. El parámetro a medir fue la conductividad eléctrica con la finalidad de obtener las concentraciones del marcador en cada punto, y con ello los posibles valores de los parámetros de dispersión de un contaminante. El artículo concluye que el cloruro de sodio como marcador es eficiente y factible por el bajo costo, ya que permite detectar en forma casi instantánea la dispersión de los contaminantes en tramo específico del río, indica también que es importante la frecuencia de muestreo para obtener un perfil de concentración acorde con el modelo matemático, por otro lado resulta necesario contar con un número mayor de mediciones para obtener un mejor ajuste en el modelo de dispersión. Finalmente se comprueba que un modelo simple de dispersión gaussiana representa de una manera suficientemente precisa las condiciones observadas.

### 2.1.3. Local.

**Chirinos (2021).** Tesis de Maestría: *Índice de calidad de agua y contenido de metales pesados en el río San Juan, Cerro de Pasco.* Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.

La investigación tuvo por objetivo determinar el índice de calidad de agua y de metales pesados en el río San Juan, durante el periodo 2012-2018. Para la estimación de la calidad del agua se aplicó el Índice de Calidad del Agua (ICA CCME) y el Índice de Metales Pesados (HPI), el estudio se basó en los resultados de los monitoreos de calidad de agua de la red de monitoreo de la Autoridad Nacional del Agua de los años 2012 al 2018, en cada punto de monitoreo. Los resultados encontrados evidencian impactos negativos en el río San Juan, el estudio concluyó que la parte alta, media y baja del río San Juan presentan una calidad de agua de buena, pobre y regular respectivamente. Los usos de agua que se pueden dar en el río San Juan de acuerdo a la calificación obtenida con el índice de calidad de agua ICA CCME, señalan que en la parte alta puede tener uso para la vida acuática, abastecimiento de agua, procesos industriales y riego sin restricciones; en la parte media solo es apto como cuerpo receptor de vertidos de aguas residuales por el grado de contaminación que presentó sus aguas; en la parte media final y baja su calificación fue regular y se recomienda el uso para riego restringido, explotación manual de materiales de construcción y recreación con contacto restringido.

**Rojas (2018).** Tesis de Pregrado: *Evaluación de parámetros físico-químico y microbiológico del río Ragra afluente del río San Juan, para determinar la categoría de sus aguas – Simón Bolívar.* Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar los parámetros físico-químico y microbiológico del Río Ragra, para determinar la categoría de sus aguas, siendo de tipo

descriptivo, no experimental cuantitativo; la población corresponde a la longitud total del Río Ragra, cuya muestra está constituida por dos puntos de muestreo ubicados al inicio del río Ragra y 100 metros antes de su afluencia con el río San Juan. Esta investigación concluye que se comprobó que los parámetros físico-químico y microbiológico del Río Ragra no cumplen en su totalidad con los Ecas-Agua que corresponde a la categoría 3 como es el caso de Sólidos Disueltos totales, Metales Totales (cobre, hierro, manganeso, plomo y zinc) y Microbiología (coliformes fecales). Finalmente recomienda que se debe implementar un sistema de fiscalización permanente por parte del estado peruano en el río Ragra, ya que como se pudo determinar estas aguas contienen metales totales (cobre, hierro, manganeso, plomo y zinc) producto de actividades mineras.

## **2.2. Bases Teórico – Científicas.**

### **2.2.1. Río Ragra- Fuentes de contaminación del recurso hídrico**

El río Ragra, es un afluente del río San Juan, cuyo nacimiento es producto del vertimiento de las aguas residuales del centro poblado de Paragsha, con una longitud de 7941 metros, finalizando su recorrido en el río San Juan a un kilómetro de la Comunidad Campesina de Yurajhuanca, tal como lo señala Rojas (2018), quien además describe el recorrido y las inmediaciones durante el trayecto (ver ilustración 1), tales como las desmonteras de Óxidos y Pirita de la empresa Cerro SAC, desmontera Excelsior, pasando por la relavera Quiulacocha, Quiulacocha y finalmente pasando Yurajhuanca. (pp. 9-11)

## Mapa N° 1: Río Ragra



**Nota.** Mapa adaptado de Rojas (2018): Evaluación de parámetros físico- químico y microbiológico del río Ragra. **Fuente.** Google Earth.

Chirinos (2022), en su estudio de índices de calidad y contenido de metales pesados en el río San Juan, realizó un análisis de calidad a los ríos Ragra y Andacancha como tributarios del río San Juan, en donde se evidencia mayor impacto en el río Ragra, siendo considerada por el autor con un Índice Calidad “Pobre”, y esto debido a la presencia de diversos contaminantes según lo menciona a continuación:

*De los análisis de agua realizados en el periodo 2012 al 2018, se evidenció que existe incumplimiento muy significativo del ECA agua categoría 3- D1, principalmente por la presencia en concentraciones significativas de metales, DBO5 y más aun de Coliformes (p. 42).*

El autor señala también que el río Ragra aparte de ser impactado por el vertimiento de las aguas residuales de la ciudad, también se ve impactada por la presencia de la gran y mediana minería que hay en la zona, y esto se evidencia con un reporte del OEFA sobre el balance de agua de la unidad minera Cerro de Pasco:

*El balance de agua del proceso operativo, se origina con la captación de las aguas del tajo y la mina subterránea, dichas aguas son conducidas hacia la planta de neutralización ubicada al lado NW de la desmontera "Excelsior", en esta planta se unen con las aguas provenientes de la captación de Rumiallana, la captación de Pampa seca y captaciones diversas (de depósitos de desmontes y otros); Luego de su tratamiento las aguas son monitoreadas en el P-203 y vertidas a la quebrada Ragra que es un afluente del río San Juan. (OEFA, 2012)*

El reporte también señala que las aguas residuales captadas de la ciudad de Cerro de Pasco llegan al río San Juan por dos tramos sin previo tratamiento.

### **2.2.2. Transporte de contaminantes.**

Existen tres tipos de factores que determinan el destino de los contaminantes en el agua, según Espinoza et al. (2013) son: el tipo y clase de fuentes externas, el transporte de sustancias a través de varios elementos del ciclo hidrológico y la transformación química, biológica o bioquímica de las sustancias de una u otra forma. El autor menciona que alrededor de más de cinco mil compuestos son inventados anualmente y que llegan hacia los recursos hídricos superficiales y subsuperficiales, afectando la vida acuática y humana. (p. 21)

Para poder estudiar el transporte de contaminantes es necesario distinguir entre dos procesos importantes (Sanchez , 2017,p. 1):

- No existe ninguna interacción con el medio geológico, los contaminantes o solutos son no reactivos o conservativos, los procesos de transporte a estudiar son la advección, difusión y dispersión.
- Se producen interacciones entre las sustancias contenidas en el agua y en el medio geológico, se estudia la adsorción, precipitación o disolución, etc., y diversas reacciones químicas. En este caso se habla de reactivos químicos.

### 2.2.2.1. Advección.

Es el arrastre de la sustancia contaminante por el agua, en este proceso “el contaminante viajaría a la misma velocidad del agua y la extensión ocupada por el contaminante sería constante” (Sanchez , 2017).

Según Oyarzun L. (2007):

*El movimiento advectivo es descrito matemáticamente por la dirección y la magnitud de su velocidad, dado que, a pesar de la ocurrencia de dispersión, el centro de masa del elemento químico que es transportado por advección se mueve a la velocidad promedio del fluido, siempre y cuando no se produzca adsorción y retardo.*

La tasa a la cual un elemento químico es transportado por unidad de área (perpendicular a la dirección de movimiento), se expresa generalmente en términos de densidad de flujo (J) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$J = C \cdot V$$

Donde:

J: Densidad de flujo [Kg/(cm<sup>2</sup> \* s)]

C: Concentración (mg/L)

V: Velocidad (m/s)

### 2.2.2.2. Difusión- Primera ley de Fick.

En este segundo proceso, la sustancia contaminante se mueve desde un lugar de mayor concentración a uno de menor concentración. Podemos distinguir dos tipos de difusión:

**Difusión molecular**, por efecto del movimiento aleatorio de las partículas.

**Difusión turbulenta**, por efecto del movimiento aleatorio del aire o agua que acarrea el elemento químico. Para efectos de estudio se considerará que no

existe movimiento de fluido, debido a que la difusión es despreciable frente a la dispersión, en caso exista un flujo activo. En un líquido no contenido en un medio porosos, el flujo de masa está regido por la primera ley de Fick:

$$F = -D_m \frac{dC}{dx}$$

Donde:

F : Flujo de masa por unidad de tiempo y por unidad de sección perpendicular al flujo Kg/(m<sup>2</sup> \* s)

D<sub>m</sub> : Coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s)

C: Concentración (M/L<sup>3</sup>)

$\frac{dC}{dx}$  : Gradiente de concentraciones: entre dos puntos situados a una distancia dx existe una diferencia de concentraciones dC.

El signo negativo indica que el sentido de flujo es hacia la disminución de la concentración, es decir, el incremento de la concentración tiende a ser negativa a medida que aumenta la distancia de separación entre dos puntos.

La difusión es un fenómeno extremadamente lento, por lo tanto, solo será apreciable en medios en donde la difusión sea la única causa de movimiento del soluto y considerando periodos de tiempo grandes.

### **2.2.2.3. Dispersión.**

Según Chapra (1997), citado por Botero (2005), a diferencia de la difusión, en donde los movimientos aleatorios hacen que las partículas se esparzan, en la dispersión se presenta un movimiento diferenciado de las partículas con respecto al espacio. En una tubería, las partículas que se encuentran cerca de la pared se mueven lento, a diferencia de las que se encuentran en el centro, y esto es debido al esfuerzo cortante que hace la pared

de la tubería sobre las partículas; en el caso de los ríos, el efecto cortante lo realiza el viento en la superficie y también las orillas.

A su vez Sánchez (2017) menciona que la dispersión “mecánica” es la provocada por el movimiento del fluido a través de un medio poroso, estos pueden ser de dos tipos (p. 5):

**Dispersión longitudinal.** La dispersión longitudinal se puede definir como la difusión de un soluto a lo largo del eje longitudinal del flujo. Según Olivar (2015) “este proceso conduce a un cambio de las características de una nube de contaminación, que parte de un estado inicial de concentración y la baja varianza espacial, a un estado aguas debajo de baja concentración y alta varianza espacial” (p. 17).

Según Chapra (1997), citado por Olivar (2015) “en los ríos y estuarios predomina la dispersión debido a las fuertes tensiones causadas por los grandes flujos medios y la limitación de canales”. La dispersión longitudinal se produce cuando (Sánchez, 2017):

- Las moléculas que encuentran un camino más tortuoso se retrasan.
- Las moléculas que encuentran caminos más anchos avanzan más rápido.
- Las moléculas que circulan por el centro de los canales intergranulares avanzan más rápido que los que circulan cerca de los granos.

**Dispersión transversal.** Es debido a la constante bifurcación de los caminos que encuentra el fluido.

### 2.2.3. Modelo matemático de transporte de solutos

Los procesos de transporte de solutos en cuerpos de agua se representan mediante modelos, Olivar (2015) señala que “para poder representar correctamente los procesos de transporte y desarrollar modelos de tiempos de viaje se utilizan modelos de transporte de solutos” (p.18). En este proyecto se trabajará con modelos

unidimensionales que han sido desarrollados por diversos autores entre los que se mencionaran a continuación:

Modelo distribuido de Advección - Dispersión ADE (Advection-Diffusion equation) desarrollado por Taylor (1954).

- Modelo de Almacenamiento Transitorio distribuido unidimensional TS (Transient Storage) desarrollado por Bencala y Walter (1983).
- Modelo agregado alternativo de Zona Muerta Agrupado ADZ (Aggregated Dead Zone model) desarrollado por Young y Wallis (1983).

### 2.2.3.1. Modelo agregado alternativo de Zona Muerta Agrupado ADZ.

Olivar (2015), en su investigación de calibración de transporte de solutos, señala que el modelo ADZ es el que mejor logra ajustar las simulaciones de tiempo de viaje y tiempo de retraso advectivo, indica también que este modelo es más sencillo de calibrar ya que solo requiere de 2 parámetros. Asimismo, Camacho y Cantor (2006), señala que los parámetros del ADZ son identificables y que determinan un óptimo global, presentando un claro sentido físico, a su vez, también recomienda la metodología GLUE (p. 50). Por lo expuesto, en este proyecto se usará el modelo de transporte de solutos unidimensional ADZ de Beer and Young (1983).

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{1}{tm - \tau} [Cu(tm - \tau) - C(t)] \quad DF = 1 - \frac{\tau}{tm}$$

Donde:

t : tiempo (T),

Cu(t) : concentración de entrada al río

C(t) : concentración de salida en la frontera aguas abajo (ML-3)

$t_m$  (T) : tiempo medio de viaje

$\tau$  (T) : tiempo de rezago o primer arribo (tiempo de viaje).

$t_m$  y  $\tau$  : se miden con ensayos de trazadores.

#### **2.2.4. Zona de mezcla.**

La guía metodológica de la Autoridad Nacional del Agua y el Ministerio de Agricultura y Riego (ANA y MINAGRI, 2017) señalan que el comportamiento de las concentraciones de contaminantes en un cuerpo de agua sigue dos procesos:

- El primer proceso es después del vertimiento, el agua natural se mezcla con las aguas residuales, siguiendo un proceso físico de dispersión, cuya velocidad dependerá de las características hidrodinámicas del cuerpo de agua receptor.
- El segundo proceso es el que caracteriza el comportamiento de las concentraciones del cuerpo natural con la carga de los procesos químicos, físicos y microbiológicos, comúnmente denominados, autodepuración.

Según Autoridad Nacional del Agua (2017), la zona de mezcla “es aquel volumen de agua en el cuerpo receptor en el que se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y de dispersión” (p. 37), sin tener en consideración otros factores como el decaimiento bacteriano, la sedimentación, la asimilación en materia orgánica y la precipitación química.

La finalidad de la zona de mezcla es delimitar una región determinada en donde se realiza la mezcla completa de las aguas residuales (efluente) y el agua del cuerpo receptor, y a su vez, usar la capacidad que tiene el cuerpo receptor para diluir. Cabe tener en cuenta que las concentraciones de la zona de mezcla exceden el ECA-agua, y que, al estar permitido, el agua de esa zona no se debería usar.

La extensión de la zona de mezcla dependerá de los siguientes factores :

- Ubicación del punto de vertimiento.

- Las características hidráulicas del cuerpo receptor.
- Turbulencia del cuerpo de agua
- La velocidad de flujo
- La profundidad.
- Morfología del cauce.

#### 2.2.4.1. Modelo matemático – Zona de mezcla.

Para la realización de los cálculos, la Autoridad Nacional del Agua y el Ministerio de Agricultura y Riego (2017) proponen el Método Simplificado desarrollado por La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA). La longitud de la zona de mezcla se calculará con la siguiente ecuación:

$$L_{ZdM} = \frac{(W_{min})^2 u}{2\pi D_y}$$

Donde:

$L_{ZdM}$  = Longitud de mezcla (m).

$W_{min}$  = Ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 metros aguas abajo del vertimiento (m).

$u$  = Velocidad de flujo media del río en la ubicación del vertimiento (m/s).

$D_y$  = Coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento. Para el cálculo de  $D_y$  se usará la siguiente ecuación:

$$D_y = c \times d \times u^*$$

Donde:

$C$  = Factor de irregularidad del cauce.

$d$  = Profundidad media del río aguas abajo del vertimiento (m).

$u^*$  = velocidad de corte (m/s). Para el cálculo se usará la siguiente ecuación:

$$u^* = \sqrt{(g \times d \times s)}$$

Donde :

$g$  = Aceleración por gravedad con un valor de 9.80665 m/s<sup>2</sup>

$s$  = Pendiente del cauce aguas abajo(m/m).

#### 2.2.5. Técnica de trazadores.

Según Zojer (1983):

*La tecnología de trazadores constituye el método más apropiado para seguir el movimiento del agua; las técnicas de trazadores se han desarrollado hace muchos años atrás debido a los avances de la hidroquímica, la química y en especial de la física isotópica, siendo usada por el hombre de forma artificial en los ciclos hidrológicos.*

Los trazadores químicos que se introducen al agua de manera artificial deben cumplir los siguientes requisitos:

- No deben aparecer de forma natural en el sistema de aguas (o solo en cantidades muy pequeñas).
- Deben ser solubles.
- No deben hacer daño, teniendo en consideración el higiene y condiciones médicas que permitan que el agua se siga usando.
- No debe haber interferencia física, química, fotoquímica o biológica con el trazador.
- No deben alterar las propiedades hidráulicas naturales del agua subsuperficial.
- Con relación al subsuelo, no deben ser retenidos por absorción, reacciones químicas con rocas, intercambio iónico o sedimentación.
- Debe ser de fácil detección.

#### **2.2.5.1. Trazador ideal.**

Antigüedad et al. (1988) señala que un trazador ideal será aquel que se mueva a la misma velocidad que el agua, de tal manera que permita determinar el mayor número de factores de flujo. por lo tanto, será necesario que cumpla los siguientes requisitos:

- Estabilidad química y biológica en el agua ensayada.
- Que no reaccione ni sea retenido por el terreno, que presente débil adsorción y absorción.
- Que no altere las características de flujo del acuífero.
- Que sea fácil de detectar cualitativa y cuantitativamente, incluso a baja concentración. Ello permitirá el uso de pequeñas cantidades de dicho trazador.
- Que este ausente de las aguas naturales o presente en bajas concentraciones.
- Que no sea toxico ni molesto para los seres vivos.
- Que sea fácil de transportar y manejar.
- Precio económico y que sea fácil de adquirir en el mercado.
- Que no contamine permanentemente el terreno o durante un largo periodo de tiempo, lo cual permitirá la repetición del ensayo.

#### **2.2.5.2. Trazador real.**

No existe un trazador que cumpla todos los requisitos, sin embargo, el conocimiento de estos en el desarrollo de diversos estudios, pueden permitir correcciones que hagan que sea más aprovechable. Cada trazador tiene usos determinados y habrá que tener conocimiento de una serie de principios

técnicos, económicos, de disponibilidad y sanitarios que aconsejen su uso (Antigüedad et al.,1988).

**Trazadores químicos solubles.** Según Zojer (1983), las sales inorgánicas, como el cloruro de Sodio (NaCl) y el cloruro de Potasio (KCl), se han empleado durante mucho tiempo para rastrear agua subterránea y sobre todo en zonas kársticas. Estos trazadores, por lo general, son bastante solubles; el autor sugiere analizar la sal antes de su disolución para obtener información sobre la distribución de sus iones. En su estudio de trazadores también menciona que existen trazadores químicos que no se combinan con el cloruro, como lo es el nitrato, pero el alto contenido de nitrato de las aguas residuales limita su empleo; en algunos estudios también han empleado Bórax (HBO<sub>2</sub>), pero carece de solubilidad y más la alta concentración de desechos del ambiente interfieren el tránsito del trazador.

Antigüedad et al. (1988), en su estudio *“Los trazadores en la hidrogeología kárstica”*, clasifico los trazadores solubles en varios tipos que son:

- Cloruro Sódico (NaCl). Normalmente se determina el cloro con un electrodo específico. El sodio se puede determinar por espectrometría de llama hasta 0.1 ppm. No es útil en aguas con elevado contenido natural (utilizable si el contenido en cloruros es inferior a 50-100 ppm). Se necesitan soluciones concentradas de mayor densidad que el agua natural, lo cual puede generar molestias para el consumo, además de variaciones en las características de flujo. El análisis químico se puede realizar por conductivimetría. No toxico. Asequible.
- Cloruro Cálcico (Cl<sub>2</sub>Ca)
- Cloruro de Litio (ClLi)
- Cloruro Amónico (ClNH<sub>4</sub>).

- Hidróxido de Litio monohidratado (LiOH.H<sub>2</sub>O)
- Dicromato Sódico (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>Na<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O)
- Ioduro Potásico (IK)
- Nitrito Sódico (NO<sub>2</sub>Na).
- Ácido Bórico (BO<sub>3</sub>H<sub>3</sub>).
- Bórax o Tetraborato de Sodio (B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>Na<sub>2</sub>. 10H<sub>2</sub>O)
- Bromoformo.
- Fenoles, Azucares, Complejos Cianurados, Detergentes comerciales.

**Trazadores químicos colorantes.** Son fácilmente solubles y detectables visualmente con fluorímetros o fotocolorímetros. Poseen gran estructura molecular lo que hace favorable su retención, principalmente usados en acuíferos kársticos, donde suelen presentar bajas tasas de restitución. Existen varios productos fluorescentes, algunos más conocidos que otros, Antigüedad et al., (1988) clasificó a estos trazadores en tipos:

- Uranina o Fluoresceína Disódica o Fluoresceína soluble.
- Rhodamina B (C<sub>28</sub>H<sub>31</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Cl)
- Rhodamina WT
- Eosina (2', 4', 5', 7 -tetrabromofluoresceína, disódica, sal)
- Azul de metileno
- Azul de anilina
- Fucsina.
- Piranina (1, 3, 6-pirentrisulfónico ácido 8-hidroxitrisódico sal)
- Tinopal o Tinopal CBS-X o Triazimylaminostilben.

### **2.2.5.3. Inyección de trazadores en corrientes de agua.**

En los estudios de transporte de solutos se puede distinguir dos tipos de inyección de trazadores:

**Inyección continua.** El trazador es inyectado a una determinada tasa, luego en la estación de medición aguas abajo se toman muestras hasta que se tenga una concentración constante. Este tipo de inyección busca generar una pluma que pueda ser registrada aguas abajo y, de esta manera, determinar la dilución y la manera en la que el trazador se esparce a medida que se aleja del punto de inyección (Kilpatrick y Wilson, 1989, citado por Botero, 2005).

**Inyección instantánea.** En este tipo de experimentos se inyecta un volumen determinado de trazador en el cuerpo de agua durante un periodo de tiempo corto. De la misma forma que la inyección continua, la respuesta es medida en una estación aguas abajo hasta asegurarse que toda la nube haya pasado. Estos experimentos suelen realizarse para determinar las características dispersivas de las corrientes (López, 2001, citado por Botero, 2005)

### **2.2.6. Simulación de Transporte de contaminantes.**

La bibliografía referente a simulación y software de simulación son amplias, diversas investigaciones usaron el Wasp, Hec-Ras, Mat Lab, Qual2k, Aquatool, etc., estos pueden ser de uso libre y de pago, y su funcionalidad radica en el modelamiento de calidad de agua.

Así mismo, Microsoft Excel también es factible para la realización de simulaciones a través de sus hojas de cálculo, tal como lo señala Chang (2011):

*La hoja de cálculo es capaz de obtener perfiles de concentración en función: del tiempo para una posición fija, de la longitud del río para un tiempo fijo, del ancho del río para un tiempo fijo y de la profundidad del río para un tiempo fijo, según sea el caso. Las limitantes de esta hoja de cálculo son: supone que la*

*sección transversal del río es un paralelepípedo rectangular en toda su longitud y que su profundidad es constante a lo largo y ancho del río; calcula la concentración de un solo contaminante generado por una fuente en cada corrida del programa. (p. 40)*

Con base en las bibliografías consultadas, este proyecto de investigación hará uso del software que mejor se adecue a los datos del modelamiento ADZ.

### **2.3. Definición de Términos.**

**Contaminantes conservativos.** Es aquel cuya concentración permanece constante siempre y cuando no haya afluentes naturales que disminuyan su concentración o aportes de carga contaminante que aumente la concentración. En este grupo se encuentran la mayoría de sales, los metales en concentraciones bajas y en condiciones de pH neutro y los contaminantes orgánicos persistentes (COP), entre otros. (ANA y MINAGRI, 2017)

**Cuerpo de agua natural lóxico.** Son masas de agua que tiene una dirección definida de movimiento, entre ellos tenemos los ríos, manantiales, riachuelos, quebradas, arroyos.

**Contaminantes no conservativos.** Su comportamiento no es conservativo. Entre ellos se encuentran los compuestos orgánicos, los patógenos y los metales, debido a que después del vertimiento varía la disponibilidad de oxígeno disuelto o el pH. (ANA y MINAGRI, 2017)

**Trazador conservativo.** Es aquel compuesto químico que, al entrar en contacto con el agua no pierde sus componentes y se conserva, siendo usado para la simulación de dispersión de contaminantes. Entre ellos se tiene las sales y para fines de esta investigación se usó el cloruro de sodio.

**Experimento.** Es una prueba que consiste en provocar un determinado fenómeno en condiciones específicas con la finalidad de analizar sus efectos a través de su manipulación.

**Modelo matemático.** Es aquel que usa fórmulas matemáticas para representar la relación entre variables, parámetros, etc.

**Simulación.** Es una herramienta para la evaluación y el análisis de sistemas nuevos o ya existentes.

**Calibrador.** Es una sustancia específica de concentración conocida que se usa en lugar de la muestra real, cuya finalidad es servir como factor de corrección, en este caso, un modelo de transporte de solutos.

**Calidad de agua.** Es el conjunto de características físicas, químicas, composición y estado de los organismos que habitan en el agua.

**Técnica.** Es un conjunto de procedimientos o recursos que se usan en un arte, en una ciencia o en una actividad determinada.

**Hidrodinámica.** Es el estudio del movimiento de los líquidos con relación a las causas que lo originan.

**Fenómeno físico.** Son los cambios que sufre la materia, sustancia o cuerpo, pero sin alterar su composición.

**Coefficiente de dispersión.** Es un parámetro fundamental requerido para implementar un modelo de dispersión de contaminantes en un curso fluvial.

**Vertimiento.** Es la descarga final de sustancias, elementos, compuestos, etc. a un cuerpo de agua receptor.

**Parámetros hidrodinámicos.** Es cualquier elemento que disminuye la resistencia, potencia o vigor del agua, tales como el caudal, gravedad, viscosidad, coeficientes hidrodinámicos, velocidad, presión, flujo, etc.

**Características morfológicas de un río.** Es la estructura de los cuerpos de agua, como las secciones transversales, los perfiles, etc.

## **2.4. Formulación de Hipótesis:**

### **2.4.1. Hipótesis General.**

#### **2.4.1.1. Hipótesis Alternativa (Hi).**

**Hi:** El conocimiento del coeficiente de dispersión longitudinal a través de la calibración de un modelo de transporte de solutos, sumado a la aplicación de un software, permitirán simular e implementar un modelo hidrodinámico del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra.

#### **2.4.1.2. Hipótesis Nula (Ho).**

**Ho:** El conocimiento del coeficiente de dispersión longitudinal a través de la calibración de un modelo de transporte de solutos, sumado a la aplicación de un software, no permitirán simular e implementar un modelo hidrodinámico del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra.

### **2.4.2. Hipótesis Específicas.**

#### **2.4.2.1. Hipótesis específicas alternativas (Hi).**

- 1.** El modelo matemático de transporte de solutos propuesto permitirá representar el sistema hidrodinámico de los flujos de agua del río Ragra.
- 2.** Los parámetros hidrodinámicos y las características morfológicas de los flujos de agua del río Ragra, permitirán desarrollar el modelo de transporte de contaminantes conservativos.
- 3.** La aplicación de un ensayo de trazadores permitirá determinar el coeficiente de dispersión de los flujos de agua del río Ragra.

4. El software desarrollado, permitirá simular el proceso de dispersión longitudinal de contaminantes conservativos en flujos de agua.

#### **2.4.2.2. Hipótesis específicas nulas (H<sub>0</sub>)**

1. El modelo matemático de transporte de solutos propuesto no permitirá representar el sistema hidrodinámico de los flujos de agua del río Ragra.
2. Los parámetros hidrodinámicos y las características morfológicas de los flujos de agua del río Ragra, no permitirán desarrollar el modelo de transporte de contaminantes conservativos.
3. La aplicación de un ensayo de trazadores no permitirá determinar el coeficiente de dispersión de los flujos de agua del río Ragra.
4. El software desarrollado, no permitirá simular el proceso de dispersión longitudinal de contaminantes conservativos en flujos de agua.

### **2.5. Identificación de Variables.**

#### **2.5.1. Variables Independientes**

- X1. Modelo matemático de transporte de solutos.
- X2. Parámetros hidrodinámicos y características morfológicas del flujo de agua.
- X3. Ensayo de trazadores.
- X4. Software de simulación.

#### **2.5.2. Variables Dependientes.**

- Y. Simulación e implementación de un modelo de transporte de contaminantes conservativos.

### 2.5.3. Variables Intervinientes.

Z. Otros parámetros físicos, químicos y biológicos.

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores.

**Tabla N° 1:** Operacionalización de la variable dependiente.

Variable Dependiente	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnica	Instrumento
Y: Simulación e implementación de un modelo de transporte de contaminantes conservativos.	Desarrollo de un modelo con características propias de un flujo de agua para describir comportamientos y simular escenarios futuros metros más abajo del tramo en estudio.	Calibración del modelo	Concentración - tiempo	Análisis de datos	Software de simulación
		Verificación del modelo	Concentración - tiempo		

**Fuente.** El autor.

**Tabla N° 2:** Operacionalización de las variables independientes.

Variable independiente	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnica	Instrumento
X1: Modelo matemático de transporte de solutos	Herramienta matemática para representar numéricamente el transporte de solutos en flujos de agua.	Modelo ADE	Advección, dispersión	Análisis de contenido.	Fuentes de información secundaria
		Modelo TS	Zona de almacenamiento		
		Modelo ADZ	Tiempo t, concentración mg/l		
X2: Parámetros hidrodinámicos y características morfológicas del flujo de agua	Elementos fundamentales para la implementación de un modelo numérico de transporte.	Parámetros hidrodinámicos del flujo de agua	Tiempo T, caudal Q, velocidad V	Observación sistemática	Equipo de medición en campo: wincha, cronometro. Libreta de apuntes.
		Características morfológicas del flujo de agua	Longitud del tramo		
X3: Ensayo de trazadores	Experimento cuyos resultados	Tiempo medio de viaje	$t_m(T)$ - Tiempo	Análisis de datos	Equipo de medición en campo: wincha,

	arrojan datos útiles para el modelado de un cuerpo de agua, a través del uso de NaCl como contaminante conservativo.	Tiempo de rezago o arribo	$\tau$ (T) - Tiempo		cronometro. Libreta de apuntes.
		Concentración de NaCl	us/cm-Conductividad eléctrica	Observación no participante o de laboratorio	Conductímetro, multiparámetro
X4: Software de simulación	Herramienta útil para representar los resultados del modelo matemático a través de programación y bases de datos.	Datos de entrada		Análisis de datos en un programa	Programa de Simulación
		Estabilidad de programa			

**Fuente.** El autor.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

#### **3.1. Tipo de Investigación.**

Por el enfoque, esta investigación corresponde al tipo cuantitativo, debido a que “utiliza la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías” (Hernandez et al., 2014, p. 4), así mismo, es secuencial probatorio debido a que cada etapa se sigue en un orden estricto que no se debe alterar.

Por los medios utilizados para obtener los datos, esta investigación es de campo, debido a que la información recaudada provendrá de ensayos y muestreos in situ en un cuerpo de agua.

#### **3.2. Nivel de Investigación.**

Por el nivel de conocimientos que se adquieren, esta investigación corresponde al tipo exploratorio, cuyo fin es tratar un problema de investigación poco investigado, (Hernandez et al., 1994). Según Quezada (2010) la investigación exploratoria es aquella que se realiza con el propósito de destacar los aspectos fundamentales de una

problemática determinada y encontrar los procedimientos adecuados para elaborar una investigación posterior.

### **3.3. Métodos de investigación.**

Esta investigación seguirá los procedimientos del método no experimental, es decir, se observará y analizará los datos de la realidad del fenómeno en estudio sin modificarla, por ende, no se realizará la manipulación deliberada de las variables (Hernández et al., 2014, p. 152); asimismo, también se aplicará el método explicativo, en donde se buscará explicar el cómo y el porqué del objeto de estudio a través de modelos. (Quezada, 2010, p. 33)

Los procedimientos que se llevarán a cabo en esta investigación se ordenarán por fases, como se muestra a continuación:

**Fase de identificación y reconocimiento.** Se identificará el área de estudio y los puntos estratégicos para el ensayo de trazadores, a su vez, se determinará las características hidrodinámicas y morfológicas del cuerpo receptor.

**Fase de campo.** Se realizará la medición de caudal y posteriormente se realizará el ensayo de trazadores con la obtención de datos in situ.

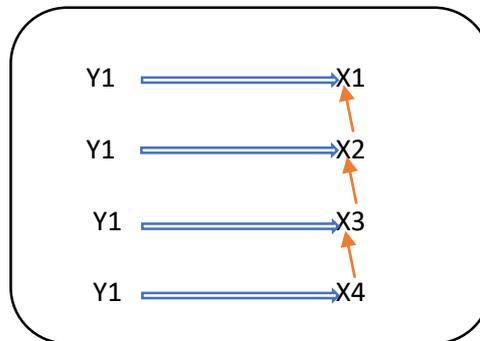
**Fase de modelación.** Se desarrollará el modelo matemático ADZ para transporte de solutos y se calibrará para obtener concentración a partir de conductividad, dato necesario para el modelo de dispersión de solutos.

**Fase de simulación.** Con el uso de un software de simulación y las hojas de cálculo de Microsoft Excel, se desarrollará la simulación del modelo de transporte de solutos en un cuerpo de agua receptor.

### **3.4. Diseño de la Investigación.**

Esta investigación corresponde al diseño no experimental transeccional correlacional- causal, debido a que pretende analizar relaciones causales. Según

Hernández et al. (2014), este diseño “describe las relaciones entre dos o más categorías, conceptos o variables en un momento determinado, ya sea en términos correlacionales, o en función de las relaciones causa-efecto”. (p. 158)



Donde:

**X1, X2, X3 y X4.** Variables independientes

**Y1.** Variable dependiente

### 3.5. Población y Muestra.

La población “representa una colección completa de elementos que poseen características comunes” (Quezada, 2010, p. 95), que es definida por el objetivo de la investigación y no rigurosamente por su ubicación o límites geográficos. Por lo expuesto, esta investigación estará constituida por todos los parámetros de flujo a lo largo del cuerpo de agua receptor en el área de estudio.

La muestra es un subgrupo de la población con características particulares, siendo representativas en las investigaciones de enfoques cuantitativos (Hernández et al., 2014, p. 175); por ende, será un muestreo no probabilístico intencionado, que según Sánchez y Reyes (2015) es aquella muestra seccionada de la población por ser representativa para el estudio. En esta investigación la muestra estará representada por las características morfológicas y parámetros hidrodinámicos de un tramo de flujo de agua del río Ragra.

### 3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

#### 3.6.1. Técnicas.

En esta investigación se aplicará técnicas directas e indirectas, es decir, la primera hace referencia a aquellas que requieren una relación presencial del investigador con el objeto de estudio y la segunda, al uso de información de fuentes escritas primarias o secundarias según se requiera (Sanchez y Reyes, 2015,p. 149-152); entre ellas tenemos:

**Observación sistemática.** Para el desarrollo de la investigación la estación de estiaje es fundamental, por ende, la observación debe ser planeada para esa temporada del año.

**Observación no participante y de laboratorio.** Para la calibración de las curvas de conductividad - concentración, las muestras serán llevadas a un laboratorio para su posterior análisis.

**Análisis de contenido.** Para efectos de esta investigación, será necesario la consulta de fuentes documentales que hayan tratado las mismas variables de estudio, como lo son manuales, tesis y artículos científicos.

#### 3.6.2. Instrumentos de Recolección de Datos.

Un instrumento de investigación es aquel que se emplea durante la recolección de datos, y para la selección de los mismos se tendrá en consideración la validez y confiabilidad. Para fines de este estudio se usarán los siguientes instrumentos:

**Libreta de apuntes.** Para determinar las características morfológicas e hidrológicas del cuerpo de agua receptor.

**Formatos para recolección de datos en campo.** Para conductividad eléctrica (ensayo de trazadores), determinación de caudal (Q).

**Equipos de medición en campo.** Multiparámetro calibrado, wincha y/o flexómetro, cámara fotográfica, cronómetro, GPS.

### **3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.**

#### **3.7.1. Equipo de medición de campo: Multiparámetro.**

En esta investigación se hizo uso de 02 Multiparámetros del Laboratorio de Microbiología de la UNDAC.

**Selección.** Los equipos a usar fueron seleccionados por su correcta funcionalidad para los datos a medir y facilidad de transporte a campo.

**Validación.** “La validez del contenido se obtiene mediante las opiniones de expertos y al asegurarse de que las dimensiones medidas por el instrumento sean representativas del universo o dominio de dimensiones de las variables de interés” (Hernández et al., 2014, p. 298). Para fines de esta investigación, los datos obtenidos por estos instrumentos son válidos por ser equipos del laboratorio de la Undac.

**Confiabilidad.** Es el “grado en que un instrumento produce resultados consistentes y coherentes” (Hernández et al., 2014, p. 200); para ello se realizaron mediciones de conductividad en soluciones de concentraciones conocidas, y así obtener una relación con base a un coeficiente de correlación entre ambos.

#### **3.7.2. Formato para recolección de datos: Conductividad Eléctrica y Caudal.**

En esta investigación se hizo uso de 02 formatos para la recolección de datos, los mismos que fueron obtenidos en campo durante las campañas de medición.

**Selección.** Para la selección del tipo de formato a usar, se consultó con bibliografía a nivel nacional e internacional, cuyas investigaciones contienen variables similares al de esta investigación.

**Validación.** Los instrumentos fueron elaborados teniendo como referencia investigaciones realizadas y validadas a nivel nacional e internacional.

**Confiabilidad.** Es el “grado en que un instrumento produce resultados consistentes y coherentes” (Hernández et al., 2014, p. 200); para ello se realizaron mediciones de

conductividad y de caudal en diferentes campañas de medición in situ, y así obtener datos confiables.

### **3.8. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos.**

En esta investigación se procesarán los datos de forma secuencial y el análisis de los mismos dependerán de la etapa en la que se encuentra el desarrollo de la metodología, por ello, se procederá a describir el procesamiento y análisis de la siguiente manera:

**Ensayo de trazadores.** Se ordenarán los datos en hojas de cálculo por tiempo medido en segundos y concentración de NaCl.

**Modelamiento matemático de Transporte de contaminantes conservativos.** Se realizará un análisis matemático para el desarrollo del modelo y se calibrará el modelo ADZ en hojas de cálculo para obtener el coeficiente de dispersión.

**Simulación del transporte de contaminantes conservativos.** Con el conocimiento del coeficiente de dispersión de flujo, se procederá a simular el comportamiento de las concentraciones a través de las hojas de cálculo y gráficos de Microsoft Excel.

### **3.9. Tratamiento Estadístico.**

Los datos procedentes del ensayo de trazadores, conjuntamente con el desarrollo del modelo de transporte de solutos se desarrollarán en las hojas de cálculo de Microsoft Excel, y se hará uso de la estadística descriptiva e inferencial para el tratamiento estadístico.

### **3.10. Orientación ética Filosófica y Epistémica.**

Esta investigación se regirá a los principios éticos de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, tal como lo señala el Manual del investigador de la Undac (2019, p. 26), los que se mencionan a continuación:

**Protección a las personas.** Para el desarrollo del ensayo y muestreos en el cuerpo de agua, será indispensable la colaboración de personas, por ende, se tiene previsto manejar sus identidades en estricta privacidad.

**Cuidado al medio ambiente y el respeto a la biodiversidad.** Para salvaguardar la integralidad de los sistemas bióticos y abióticos, y todo aquel elemento que forma parte del área de estudio, esta investigación se realizará bajo el seguimiento estricto de protocolos y normas de muestreo en cuerpos de agua, con la finalidad de no alterar ni afectar el medio ambiente.

**Responsabilidad, rigor científico y veracidad.** Las fuentes teóricas y prácticas, los métodos y datos a utilizarse en esta investigación, serán válidos, fiables y contarán con la credibilidad necesaria para el desarrollo correcto de la misma, siendo un soporte esencial las fuentes bibliográficas y anexos.

**Respeto a la normativa nacional e internacional.** Esta investigación se realizará respetando las leyes y normas pertinentes a los cuerpos de agua, ya sean nacionales e internacionales.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

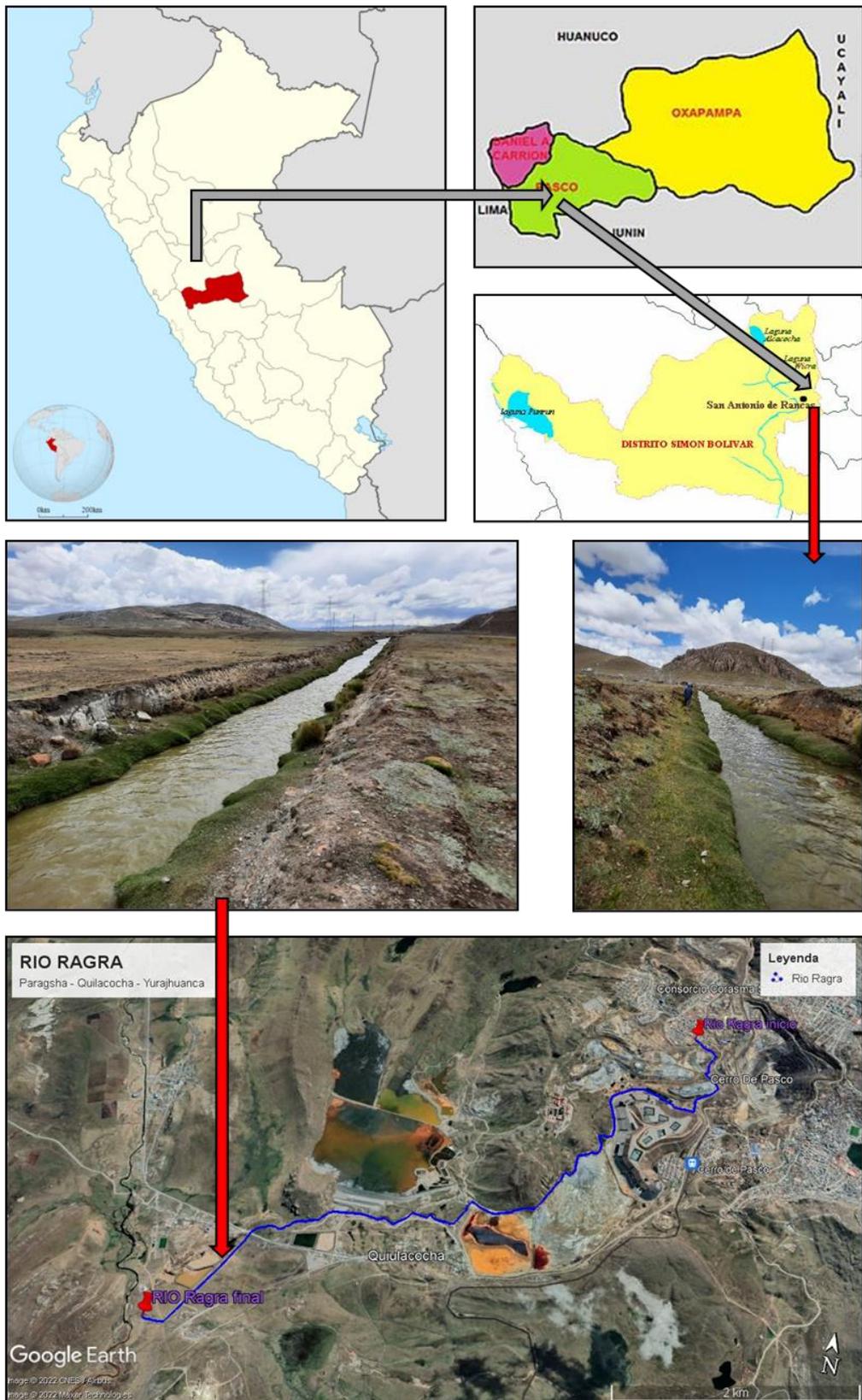
#### **4.1. Descripción del trabajo de campo.**

Para el desarrollo de esta investigación, se realizaron procedimientos en campo para la identificación y reconocimiento del río, y para el ensayo de trazadores, por ende, se realizó 02 visitas, la primera para determinar las características morfológicas e hidrológicas de río y la segunda para el ensayo de trazadores.

##### **4.1.1. Identificación y reconocimiento del cauce.**

Esta investigación se realizó en el río Ragra, en el tramo perteneciente a Yurajhuanca, perteneciente al distrito de Simón Bolívar. Es a su vez un afluente del río San Juan, y por la calidad de sus aguas es de Categoría 3 (agua para riego y bebida de animales- ECA del Agua) (Rojas, 2018). Para identificar el tramo idóneo para el estudio, se tuvo en consideración las características morfológicas del cauce, tales como la forma del río, y sobre todo la accesibilidad. A continuación, se muestra la ubicación del área de estudio.

**Mapa N° 2:** Ubicación del Río Ragra - Simón Bolívar.



**Fuente.** Google Earth.

#### Localización Geográfica

**Departamento** : Pasco  
**Provincia** : Pasco  
**Distrito** : Simón Bolívar  
**Centro Poblado** : C.C. Yurajhuanca

#### Coordenadas Geográficas (UTM-WGS 84)

**Altitud** : 4214  
**Norte** : 8816464  
**Este** : 357344

#### **4.1.2. Características Físicas del Cauce.**

Se realizó una visita a campo el día 01 de diciembre del 2022, para el reconocimiento de la zona e identificar el tramo del río Ragra a investigar. El clima estuvo soleado, con el cielo parcialmente despejado; un día anterior no hubo presencia de lluvias, asimismo no hubo corrientes de aire significativas que pudieran alterar la medición de caudal con flotador.

Se observó que no había puntos de vertimiento de aguas residuales aguas arriba y aguas abajo. A una distancia de 100 metros aproximadamente, se observó el pastar de ovejas. La visita tuvo una duración de cuatro (04) horas, siendo la hora de llegada a las 8.30 am. Durante el transcurso de ese tiempo se realizaron las mediciones correspondientes.

Así mismo se identificó el punto para la inyección de trazadores, por ser de fácil acceso y con condiciones de uniformidad de cauce tal como se muestra en las siguientes imágenes.

**Imagen N° 1:** Área de estudio. Punto de inyección de trazadores.



**Fuente.** El autor.

### **Medición de caudal.**

Como definición de caudal se infiere que es el volumen de agua que atraviesa un espacio en un tiempo determinado. Al identificar el punto de Inyección del Trazador salino, el siguiente procedimiento fue ubicar los puntos para medición de caudal, para ello el tramo elegido debía cumplir con las condiciones de homogeneidad necesaria para las mediciones. Asimismo, el método elegido fue el de flotadores, por ser más accesible en materiales y facilidad de medición. A continuación, se muestra las coordenadas de la medición de caudal:

**Tabla N° 3:** Coordenadas UTM de los puntos de medición de caudal.

<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
<b>PC-Inicial</b>	A 10 m del punto de inyección.	8816445	0357344
<b>PC-Final</b>	A 30 m del punto PC-Inicial	8816415	0357332

**Fuente.** El autor.

### Mapa N° 3: Ubicación de los puntos de medición de caudal-PC Inicial y PC Final



**Fuente.** Google Earth.

Para una correcta medición se siguió los procedimientos del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N°010-2016-ANA), siendo 4 las secciones transversales (separación de 10 m una de otra) establecidas para los cálculos.

#### **Materiales:**

Se utilizaron los siguientes materiales: Estacas de madera, Varilla recta de madera, wincha, flexómetro, cuerda o pabilo, pelotas de tecnopor, cronómetro (celular), formato de recolección de datos, cámara de celular.

#### **Procedimiento de medición de caudal:**

- a) Se procedió a medir con una wincha 3 tramos de 10 metros a partir del primer punto georreferenciado. Con los puntos de caudal ya identificados, se colocaron estacas de madera y cuerdas para delimitar el tramo a medir.

**Mapa N° 4:** Puntos de secciones Transversales.



**Fuente.** Google Earth.

**Imagen N° 2:** Medición del tramo y colocación de cuerda.



**Fuente.** El autor.

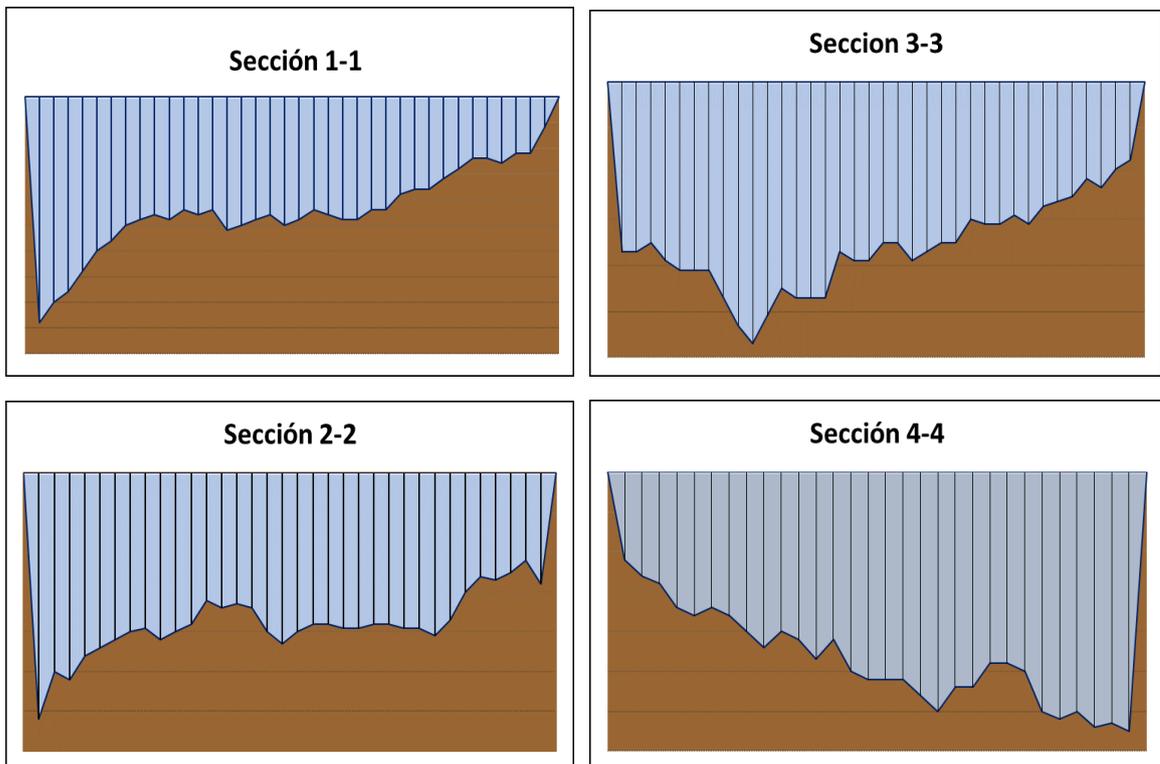
- b) Para medir las áreas de las secciones transversales de los 4 puntos se usó una varilla recta de madera y un flexómetro, y se tomaron medidas cada 10 cm de sección transversal. Este procedimiento se realizó en los 4 puntos. (Ver gráfico 01)

**Imagen N° 3:** Medición de área de la sección transversal del río.



**Fuente.** El autor.

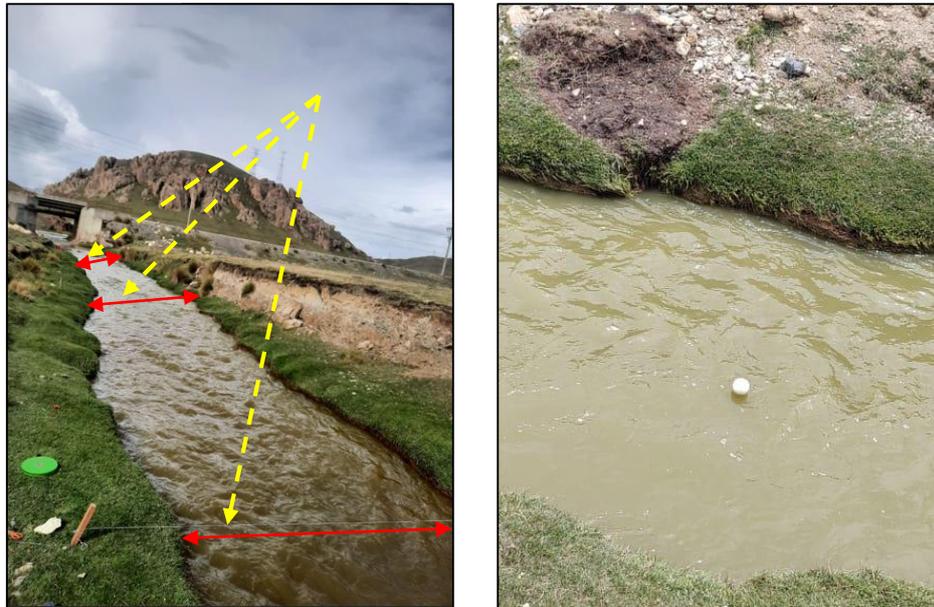
**Gráfico N° 1:** Secciones Transversales del río.



**Fuente.** El autor.

- c) En el punto PC-Inicial se soltó la pelota de Tecnopor y se midió el tiempo en el que recorre hasta el punto PC- Final. Se realizaron 10 repeticiones para determinar el tiempo medio de viaje.

**Imagen N° 4:** Recorrido del flotador de PC1 al PC2.



**Fuente.** El autor.

Se tomaron tiempos parciales y totales de recorrido del flotador desde el PC1 hasta el PC4, siendo los resultados de tiempo total los que se usaron para la determinación de caudal. (Ver Tabla 04)

**Tabla N° 4:** Tiempo de viaje entre PC1 y PC4 a una  $D=30$  m.

N° DE REPETICIONES	TIEMPO DE RECORRDO (s)
1	24.45
2	22.91
3	22.30
4	23.60
5	22.34
6	24.02
7	22.94
8	24.31
9	24.61
10	22.36

**Fuente.** El autor.

Con los tiempos de recorrido ya determinados, se procedió a determinar el tiempo de medio de viaje y volumen correspondiente tal como se observa en la Tabla 05 y 06.

**Tabla N° 5:** Tiempo medio de viaje y velocidad superficial.

TIEMPO MEDIO DE VIAJE (S)	VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL CAUCE (m/s)
<b>23.384</b>	<b>1.285</b>

**Fuente.** El autor.

**Tabla N° 6:** Área y Volumen de las secciones transversales.

CÁLCULO DE VOLUMEN			
Sección	Área	Longitud	Volumen
1-1	0.79	0	0
2-2	0.63	10	6.25
3-3	0.64	10	6.395
4-4	0.69	10	6.8875
<b>Sumatoria de Volumen</b>			<b>19.5325</b>

**Fuente.** El autor.

- d) Finalmente se realizaron los cálculos de acuerdo a la siguiente ecuación (ANA, 2016):

$Q = V / t$
-------------

Donde:

Q : Caudal.

v : Volumen (m<sup>3</sup>).

t : Tiempo (s)

Tabla N° 7: Caudal.

TABLA DE CÁLCULO DE CAUDAL	
Volumen total (m <sup>3</sup> )	19.533
Tiempo (s)	23.384
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.835

**Fuente.** Datos tomados de la Tabla 05 y 06.

El caudal se obtuvo a través de los datos presentados en las tablas 05 y 06, siendo el resultado de 0.835 (m<sup>3</sup>/s). Los datos obtenidos fueron necesarios para determinar la longitud de zona de mezcla.

### Zona de Mezcla.

Al determinar el caudal, el siguiente procedimiento fue determinar la longitud de zona de mezcla. Para la realización de los cálculos, la Autoridad Nacional del Agua y el Ministerio de Agricultura y Riego (2017) proponen el Método Simplificado desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA). La longitud de la zona de mezcla se calculará con la siguiente ecuación:

$$L_{zdm} = \frac{(W_{min})^2 u}{2\pi D_y} \quad (\text{Ecuación 01})$$

Donde :

$L_{zdm}$  : Longitud de mezcla (m).

$W_{min}$  : Ancho medio del cuerpo de agua en un tramo de 500 metros aguas abajo del vertimiento (m).

$u$  : Velocidad de flujo media del rio en la ubicación del vertimiento (m/s).

$D_y$  : Coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento.

El desarrollo de la ecuación dio como resultado un LZDM= 47 metros aproximadamente, la profundidad del cauce tuvo variaciones, siendo el dato usado 0.42 m, y en cuanto al ancho medio se usó 3.1 m, y la velocidad de flujo medio usado fue 1.285 m/s, obtenido en la medición de caudal, por ende, se pudo determinar que las mediciones de trazadores deben realizarse a una longitud de zona de mezcla de 47 metros aguas abajo desde el punto de inyección PT.

#### 4.1.3. Ensayo de Trazadores.

##### Punto de inyección de Trazador Salino.

Tras la observación del cauce y de la morfología del mismo, se procedió a determinar el punto de inyección de trazadores y su posterior georreferenciación con GPS. Se tomo de referencia el Punto de Monitoreo de Calidad de Agua PM-01, ubicado en el margen derecho del río Ragra (ver Imagen 05).

**Imagen N° 5:** Georreferenciación del punto de Inyección de Trazadores.



**Fuente.** El autor. **Nota.** Se usó un GPSmap 62sc

Las coordenadas obtenidas en el Punto de Inyección son las siguientes:

**Tabla N° 8:** Coordenadas UTM del Punto de inyección de trazadores.

Punto	Descripción	Norte	Este
PT	Río Ragra – Margen izquierdo del Puente - Yurajhuanca.	8816449	0357345

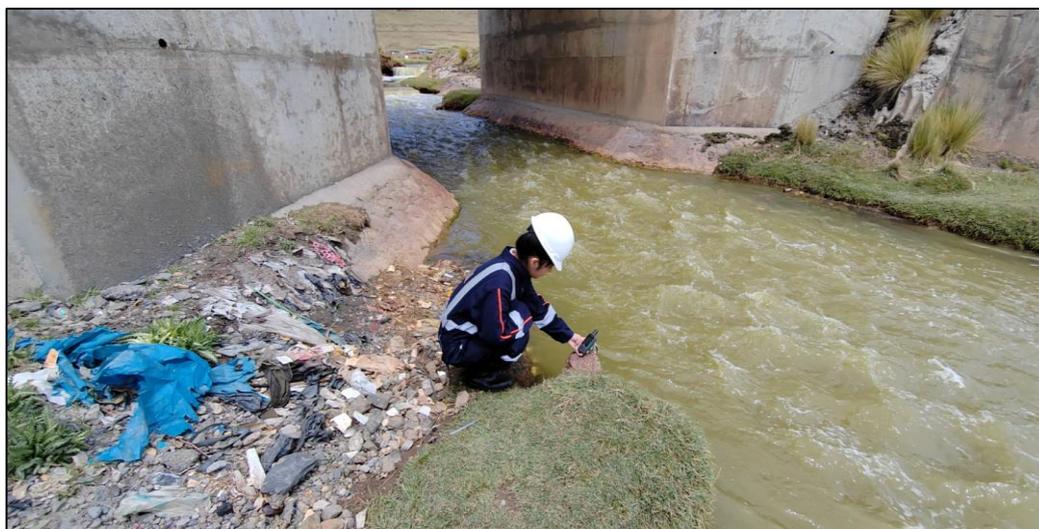
**Fuente.** El autor.

**Mapa N° 5:** Ubicación del Punto de Inyección de Trazadores.



**Fuente.** Google Earth.

**Imagen N° 6:** Punto de inyección de trazadores.



**Fuente.** El autor.

Tal como se observa en la imagen, las coordenadas se tomaron al margen derecho del cauce, debido a que la uniformidad del cauce parte desde ese punto en adelante.

### Puntos de Medición de Conductividad.

Luego de determinar la longitud de la zona de mezcla, se identificaron los puntos para la medición de conductividad, los que fueron georreferenciados. Inicialmente, se hizo una primera visita, cuyas mediciones no se realizaron de forma adecuada por la inexperiencia del investigador, por lo tanto, se tuvo una segunda visita, cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 09.

**Tabla N° 9:** Coordenadas UTM de los puntos de medición de trazadores.

Punto	Descripción	Norte	Este
<b>PM1</b>	A 50 m del punto de inyección PT.	8816355	0357329
<b>PM2</b>	A 50 m del punto de medición PM1.	8816399	0357324

**Fuente.** El autor.

**Mapa N° 6:** Ubicación de los Puntos de medición de Conductividad.



**Fuente.** Google Earth.

### **Materiales para el ensayo:**

Los materiales usados para la realización del ensayo fueron: 1 balde de 20 litros, 4Kg. de Sal, varilla para mezclar, 02 multiparámetros, 03 pares de guantes y 03 pares de botas, formato de recolección de datos, cámara y cronómetro de celular, soluciones buffer para calibración rápida de pH, Conductividad y OD, Piseta con agua destilada.

### Procedimientos del ensayo:

- a) Para la preparación de la mezcla, se usó 4 kg de Sal y 20 litros de agua. La cantidad de Sal a usar se realizó teniendo en consideración el ECA del Agua (DS-004-2017-MINAM), para ríos de categoría 3.
- b) La inyección de la mezcla se realizó en el punto PT de forma instantánea durante 2 segundos. Se procedió a medir la conductividad de forma simultánea en ambos puntos de medición con multiparámetros. Las mediciones se realizaron cada 05 segundos por un lapso de 06 minutos.

**Imagen N° 7:** Ensayo de Trazadores.



**10.a.** Inyección de Trazador salino.



**10.b.** Medición de Conductividad.

**Fuente.** El autor.

### Curvas de Conductividad.

Los datos de conductividad obtenidos en los puntos PM1 y PM2, fueron recopilados cada 05 segundos por 06 minutos, siendo la conductividad inicial de PM1 2205 us/cm y de PM2, 2332 us/cm, y a partir de estos datos se pudo obtener el incremento en ambos puntos, tal como se observa en la siguiente tabla y gráfico:

**Tabla N° 10:** Variación de Conductividad en PM1 y PM2.

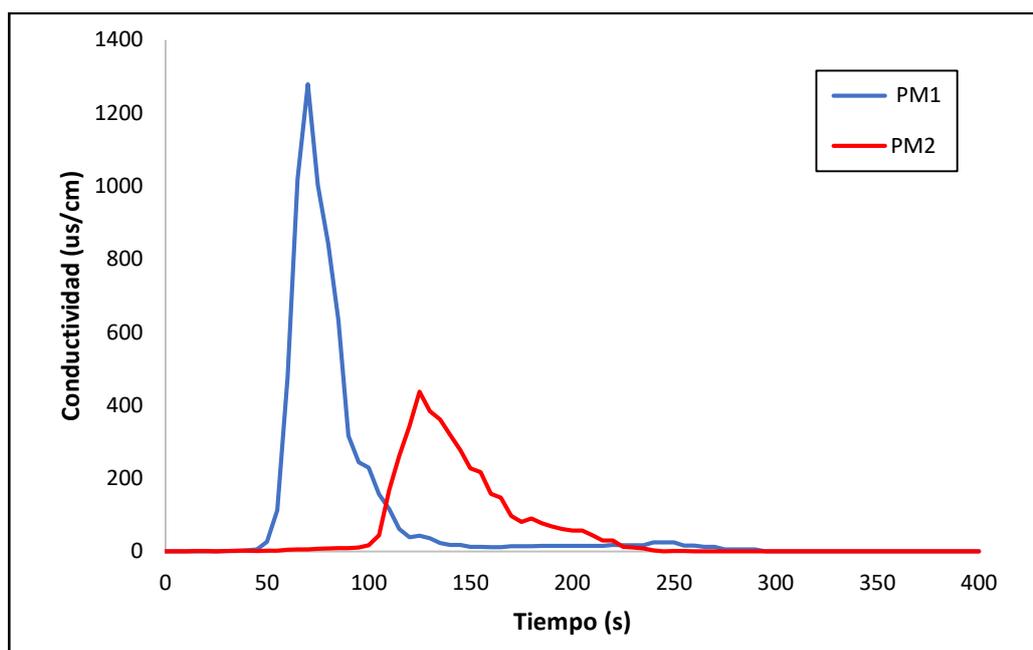
PUNTO PM1			PUNTO PM2		
Nº	Tiempo (s)	PM1	Nº	Tiempo (s)	PM2
1	0	0	1	0	0
2	5	0	2	5	0
3	10	0	3	10	0
4	15	0	4	15	1
5	20	0	5	20	1
6	25	0	6	25	0
7	30	1	7	30	1
8	35	1	8	35	2
9	40	3	9	40	2
10	45	6	10	45	1
11	50	27	11	50	2
12	55	113	12	55	2
13	60	477	13	60	5
14	65	1019	14	65	6
15	70	1279	15	70	6
16	75	1003	16	75	7
17	80	844	17	80	8
18	85	632	18	85	9
19	90	317	19	90	9
20	95	244	20	95	11
21	100	229	21	100	17
22	105	157	22	105	44
23	110	116	23	110	169
24	115	62	24	115	262
25	120	39	25	120	344
26	125	43	26	125	437
27	130	36	27	130	384
28	135	23	28	135	361
29	140	18	29	140	319
30	145	18	30	145	277
31	150	13	31	150	228
32	155	13	32	155	217
33	160	12	33	160	158
34	165	12	34	165	147
35	170	14	35	170	97
36	175	14	36	175	81
37	180	14	37	180	90
38	185	15	38	185	77
39	190	15	39	190	69
40	195	15	40	195	62
41	200	15	41	200	57

42	205	15	42	205	57
43	210	15	43	210	44
44	215	15	44	215	30
45	220	18	45	220	30
46	225	17	46	225	13
47	230	17	47	230	11
48	235	17	48	235	8
49	240	25	49	240	3
50	245	25	50	245	0
51	250	25	51	250	1
52	255	16	52	255	1
53	260	16	53	260	0
54	265	13	54	265	0
55	270	13	55	270	0
56	275	6	56	275	0
57	280	6	57	280	0
58	285	6	58	285	0
59	290	6	59	290	0
60	295	0	60	295	0
61	300	0	61	300	0
62	305	0	62	305	0
63	310	0	63	310	0
64	315	0	64	315	0
65	320	0	65	320	0
66	325	0	66	325	0
67	330	0	67	330	0
68	335	0	68	335	0
69	340	0	69	340	0
70	345	0	70	345	0
71	350	0	71	350	0
72	355	0	72	355	0
73	360	0	73	360	0

**Fuente.** Datos obtenidos por el investigador durante el ensayo de trazadores.

La tabla anterior muestra los datos más representativos en ambos puntos de medición. La conductividad pico en PM1 se registró a los 70 segundos con 1279 us/cm, y en PM2 a los 125 segundos con 427 us/cm, estos datos se representan a través de un gráfico de dispersión de conductividad y tiempo, tal como se puede observar en el siguiente gráfico.

**Gráfico N° 2:** Curvas de conductividad de PM1 y PM2.



**Fuente.** Tabla 12.

**Calibración de equipos de medición.**

Para la medición de conductividad se usaron 2 multiparámetros, uno para cada punto; sin embargo, los datos necesarios para el modelamiento deben ser en términos de concentración, por ende, se requiere realizar una calibración a partir de concentraciones conocidas.

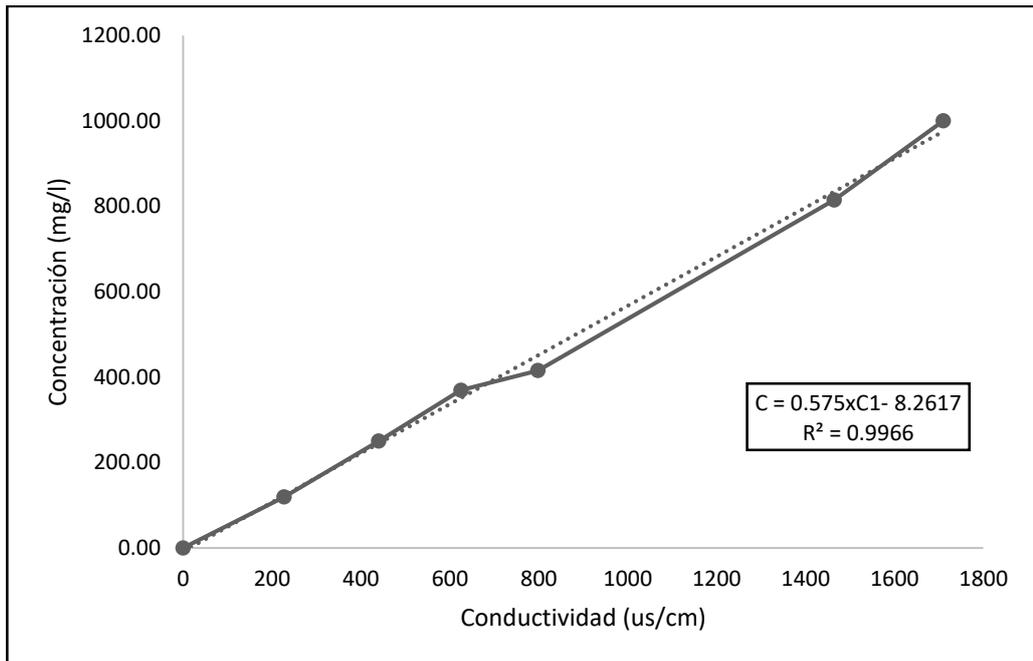
**Tabla N° 11:** Medición de Concentración.

MUESTRA	AGUA ml	SAL mg	CONCENTRACION mg/L
1	200	0	0.00
2	200	23.9	119.50
3	200	50	250.00
4	200	73.9	369.50
5	200	83.1	415.50
6	200	163	815.00
7	200	200	1000.00

**Fuente.** El autor.

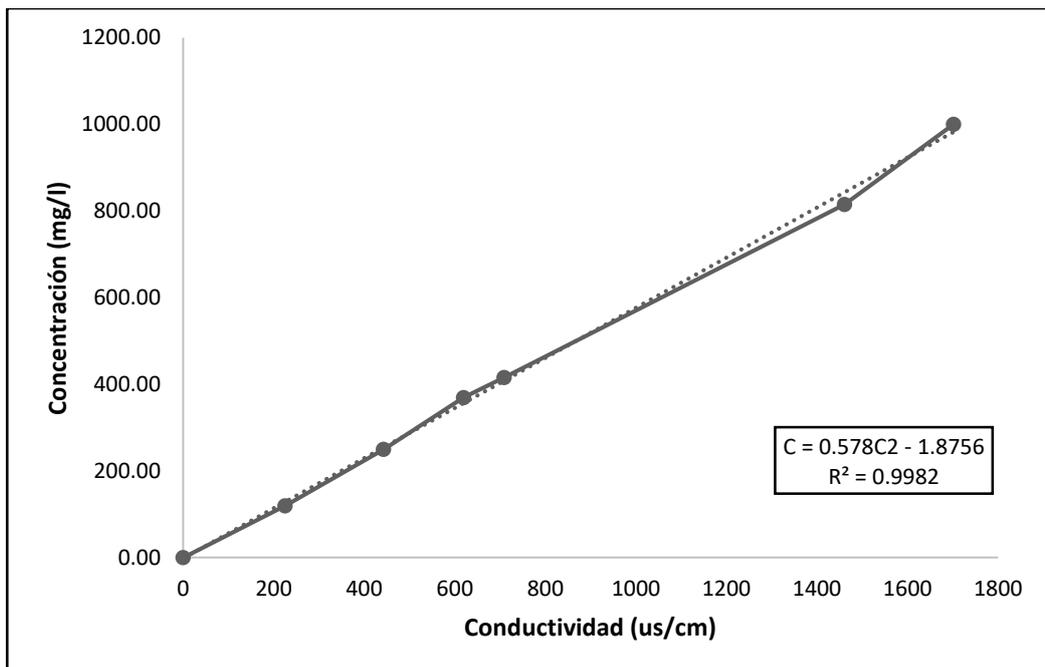
A través de los datos de la tabla 13, es posible obtener una gráfica y una ecuación de la recta que describa el comportamiento de la conductividad y la concentración en cada equipo, tal como se muestra en los siguientes gráficos.

**Gráfico N° 3: Calibración del equipo 1.**



**Fuente.** Tabla 12.

**Gráfico N° 4: Calibración del equipo 2.**



**Fuente.** Tabla 12.

Del Gráfico 04 y 05 se puede observar que el rango para el equipo 01 es más grande a comparación del equipo 02, aunque las pendientes se parecen cada una posee

una curva diferente. La siguiente ecuación nos permitirá calibrar las mediciones del equipo 1 y 2.

$C = 0.575 \times C1 - 8.2617$	$C = 0.578 \times C2 - 1.8756$
Equipo 1	Equipo 2

Donde:

C = Concentración en mg/L.

C1= Conductividad en us/cm del equipo 1.

C2= Conductividad en us/cm del equipo 2.

### Curvas de Concentracion.

Con la aplicación de las ecuaciones mencionadas en párrafos anteriores, se obtuvo la concentración (mg/L), parámetro necesario para el modelamiento ADZ, tal como se observa en la siguiente tabla:

**Tabla N° 12:** Concentración en PM1 y PM2.

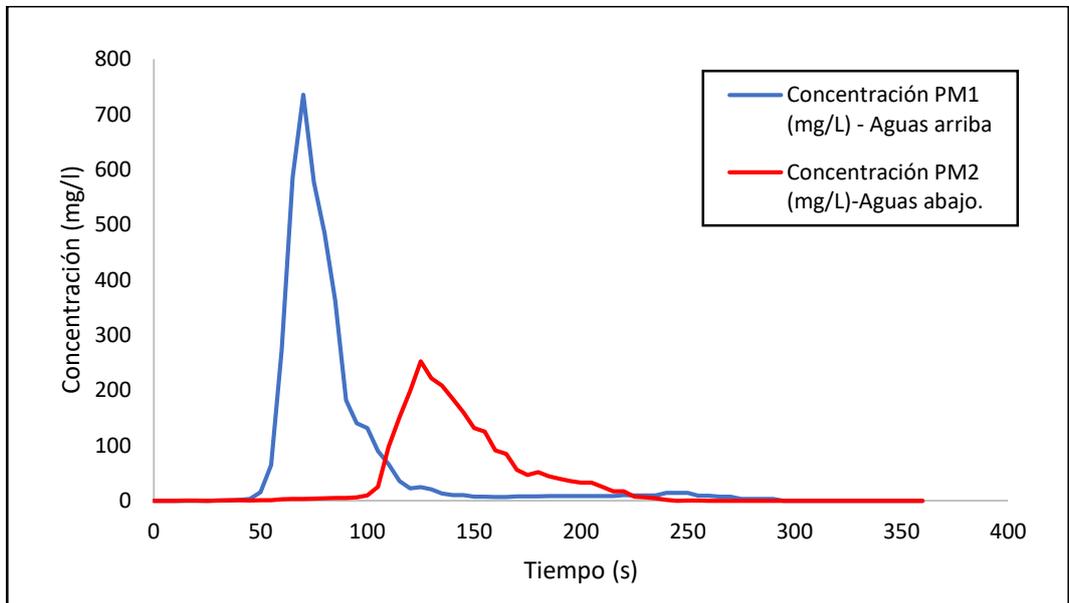
PM1			PM2		
N°	Tiempo (s)	Concentración PM1 (mg/L) - Aguas arriba	N°	Tiempo (s)	Concentración PM2 (mg/L)-Aguas abajo.
1	0	0	1	0	0
2	5	0	2	5	0
3	10	0	3	10	0
4	15	0	4	15	0.578
5	20	0	5	20	0.578
6	25	0	6	25	0
7	30	0.575	7	30	0.578
8	35	0.575	8	35	1.156
9	40	1.725	9	40	1.156
10	45	3.45	10	45	0.578
11	50	15.525	11	50	1.156
12	55	64.975	12	55	1.156
13	60	274.275	13	60	2.89
14	65	585.925	14	65	3.468
15	70	735.425	15	70	3.468
16	75	576.725	16	75	4.046

17	80	485.3	17	80	4.624
18	85	363.4	18	85	5.202
19	90	182.275	19	90	5.202
20	95	140.3	20	95	6.358
21	100	131.675	21	100	9.826
22	105	90.275	22	105	25.432
23	110	66.7	23	110	97.682
24	115	35.65	24	115	151.436
25	120	22.425	25	120	198.832
26	125	24.725	26	125	252.586
27	130	20.7	27	130	221.952
28	135	13.225	28	135	208.658
29	140	10.35	29	140	184.382
30	145	10.35	30	145	160.106
31	150	7.475	31	150	131.784
32	155	7.475	32	155	125.426
33	160	6.9	33	160	91.324
34	165	6.9	34	165	84.966
35	170	8.05	35	170	56.066
36	175	8.05	36	175	46.818
37	180	8.05	37	180	52.02
38	185	8.625	38	185	44.506
39	190	8.625	39	190	39.882
40	195	8.625	40	195	35.836
41	200	8.625	41	200	32.946
42	205	8.625	42	205	32.946
43	210	8.625	43	210	25.432
44	215	8.625	44	215	17.34
45	220	10.35	45	220	17.34
46	225	9.775	46	225	7.514
47	230	9.775	47	230	6.358
48	235	9.775	48	235	4.624
49	240	14.375	49	240	1.734
50	245	14.375	50	245	0
51	250	14.375	51	250	0.578
52	255	9.2	52	255	0.578
53	260	9.2	53	260	0
54	265	7.475	54	265	0
55	270	7.475	55	270	0
56	275	3.45	56	275	0
57	280	3.45	57	280	0
58	285	3.45	58	285	0
59	290	3.45	59	290	0
60	295	0	60	295	0
61	300	0	61	300	0
62	305	0	62	305	0

63	310	0	63	310	0
64	315	0	64	315	0
65	320	0	65	320	0
66	325	0	66	325	0
67	330	0	67	330	0
68	335	0	68	335	0
69	340	0	69	340	0
70	345	0	70	345	0
71	350	0	71	350	0
72	355	0	72	355	0
73	360	0	73	360	0

**Fuente.** El autor.

**Gráfico N° 5:** Curvas de Concentración VS Tiempo.



**Fuente.** El autor.

El Grafico 05 muestra el vs entre la concentración y el tiempo obtenido a través de la calibración de los equipos. Posterior a la calibración, se halló el área bajo la curva de concentración para determinar el Estado Estable de Ganacia (SSG), a través del método de trapecios. Estos resultados podrían indicar si hay ingresos o salidas que aumenten o disminuyan la conductividad del río, así como también la asimilación propia; si el resultado es mayor a 1, el río está en estado de ganancia, y si es menor a 1, está en estado de pérdida; en este caso, el resultado es menor a 1, y esto podría ser por

la asimilación del río o por su afluencia al Río San Juan que se ubica a 1 km aproximadamente. A través de estos resultados, también se puede hacer estimaciones de caudal en los puntos de medición, y según los resultados obtenidos, el río tiene un caudal en aumento, y esto se debe a que a lo largo de su recorrido se descargan en él, aguas residuales.

#### 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

##### 4.2.1. Parámetros del Modelo ADZ.

Para el modelamiento del transporte de solutos, se aplicará el modelo unidimensional ADZ de Beer and Young (1983), que se describe de la siguiente manera:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{1}{ts - \tau} [Cu(ts - \tau) - C(t)] \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$DF = 1 - \frac{\tau}{ts} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- t : Tiempo (T).
- Cu(t) : Concentración de entrada al río.
- C(t) : Concentración de salida en la frontera aguas abajo.
- tm ó ts (T) : Tiempo medio de viaje.
- τ (T) : Tiempo de rezago o primer arribo.

Asimismo, es posible desarrollarlo en tiempo discreto, para representar las diferentes conexiones entre cada uno de los parámetros del modelo, (Gonzalez y Camacho, 2008, p.61) con la siguiente ecuación:

$$C_k = -aC_{k-1} + b_0 Cu_{k-\delta} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$C_k$  = Concentración aguas abajo.

$C_u$  = Concentración aguas arriba.

$K$  = Instante de muestreo.

$\delta$  = Tiempo en múltiplos de  $\tau$

$a$  =  $-\exp(-\Delta T / \tau)$

$b$  =  $1 + a$

Para el desarrollo de la ecuación es necesario conocer el valor de los parámetros, siendo el ensayo de trazadores indispensable para determinar el Tiempo medio de viaje ( $t_s$ ) y el Tiempo de rezago ( $\tau$ ).

#### **Tiempo medio de Viaje ( $t_s$ ):**

Para determinar el valor del Tiempo medio de Viaje ( $t_s$ ) se plantea la siguiente ecuación:

$$t_s \approx \frac{\sum_i A_i \times t_i}{\sum_i A_i} = \frac{\sum_i (c_i \Delta t_i) \times t_i}{\sum_i (c_i \Delta t_i)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

La ecuación 4 requiere el conocimiento de las concentraciones  $C_i$  a través de un tiempo determinado en ambos puntos de medición PM1 y PM2. El desarrollo detallado se puede observar en los anexos; a continuación, se muestra los resultados obtenidos tras la aplicación del ensayo de trazadores:

**Tabla N° 13:** Tiempo medio de Viaje (ts).

PUNTOS DE MEDICION	X (m)	ts	Δts
PM1	50	86.27	57.06
PM2	100	143...	

**Fuente.** El autor.

**Tiempo de rezago o de primer arribo (τ):**

El tiempo de rezago o primer arribo (τ) se describe como el tiempo de llegada de las primeras partículas a cada punto de medición. Para la obtención de este parámetro se tuvo como referencia la interpretación de los parámetros de la metodología ADZ, de Constain (2013), los resultados se muestran a continuación:

**Tabla N° 14:** Tiempo de rezago o de primer arribo (τ).

PUNTOS DE MEDICION	X (m)	τ	Δτ
PM1	50	51.21	42.86
PM2	100	94.07	

**Fuente.** El autor.

**Tiempo de Residencia (Tr):**

El tiempo de Residencia es el desfase de las concentraciones en una curva, es decir, desde el primer arribo y el tiempo de máxima concentración de la masa efectiva del soluto. Para determinar el Tiempo de Residencia (Tr) se plantea la siguiente ecuación:

$$Tr = Ts - \tau \quad (\text{Ecuación 5})$$

Los resultados se muestran a continuación:

**Tabla N° 15:** Tiempo de Residencia (Tr).

PUNTOS DE MEDICION	X (m)	$\Delta t_s$	$\Delta \tau$	Tr
PM1	50	57.06	42.86	14.20
PM2	100			

**Fuente.** Tabla 13 y 14.

#### 4.2.2. Coeficiente de Dispersión o Fracción Dispersiva (DF).

Para determinar el valor del Coeficiente de Dispersión se plantea la siguiente ecuación:

$$DF = 1 - \frac{\tau}{ts} \quad (\text{Ecuación 2})$$
$$DF = \frac{Tr}{ts} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Los resultados se muestran a continuación:

**Tabla N° 16:** Coeficiente de Dispersión o Fracción Dispersiva (DF).

PUNTOS DE MEDICION	X (m)	$\Delta t_s$ (s)	Tr (s)	DF
PM1	50	57.06	14.20	0.25
PM2	100			

**Fuente.** Tabla 13, 15.

#### 4.2.3. Simulación del Modelo ADZ.

Con el valor de los Parámetros del Modelo de transporte de Solutos ADZ, se procedió a realizar la simulación a través de la ecuación 3, en donde se obtuvo diferentes simulaciones que muestran el comportamiento de las concentraciones de sal (contaminante conservativo) aguas abajo de la inyección de trazadores. Los datos usados para la implementación del modelo se muestran a continuación:

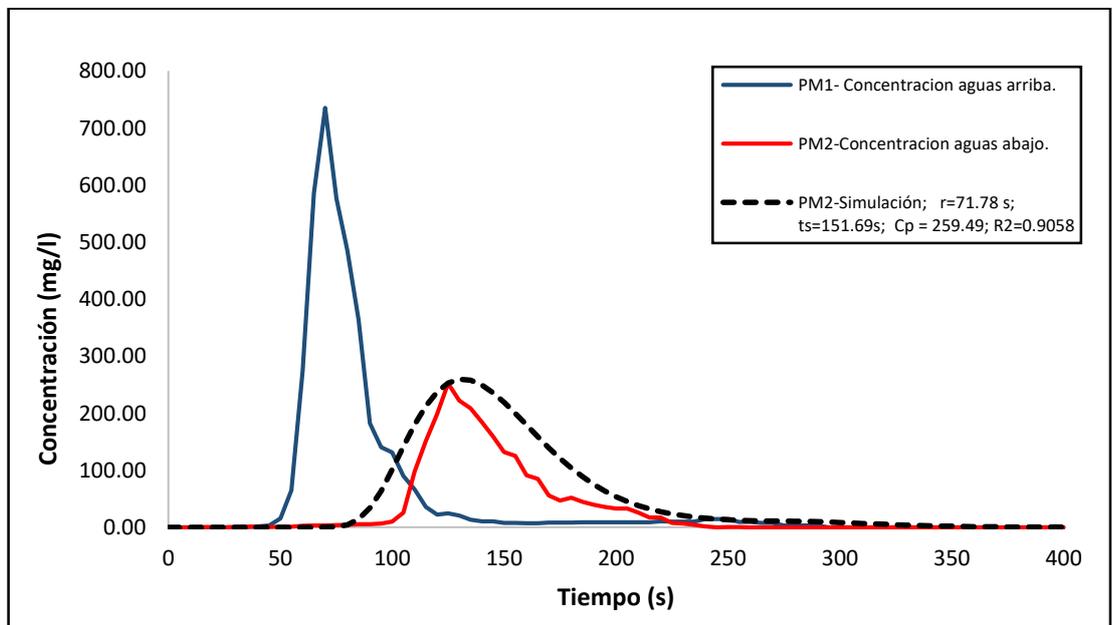
**Tabla N° 17: Parámetros Modelo ADZ**

PARAMETROS ADZ			
<b>ts1</b>	86.27	<b>ts2</b>	143.33
<b>ts</b>	57.06		
<b>τ1</b>	51.21	<b>τ2</b>	94.07
<b>τ</b>	42.86		
<b>tr</b>	14.20		
<b>DF</b>	0.25		
<b>a</b>	-0.703218891		
<b>bo</b>	0.296781109		
<b>ΔT</b>	5		
<b>δ</b>	5		
Masa de NaCl (Kg)	4		
Distancia de PT a PM1 (m)	50		
Distancia de PM1 a PM2 (m)	50		
Distancia Total (m)	<b>100</b>		

**Fuente.** El autor.

De las simulaciones obtenidas, el que tuvo mejor ajuste con el punto PM2 (aguas abajo), se muestra en la siguiente gráfica:

**Gráfico N° 6: Datos de Campo VS Simulación.**



**Fuente.** El autor.

Se puede observar en el gráfico 05, que según el modelo ADZ, el tiempo que tardó el contaminante conservativo (trazador NaCl) en ser conducida de PM1 a PM2 tiene un valor  $r = 71,78s$ , el tiempo que tardó en dispersarse ( $t_s$ ) fue  $151.69s$  y la concentración pico máxima fue  $259.49 \text{ mg/l}$ ; esto quiere decir, que a partir de las concentraciones de PM1 y PM2, y con los valores de los parámetros mostrados en la tabla 05, se obtiene una nueva distribución denominada Modelo ADZ, cuya finalidad es simular las concentraciones de salida (concentración de PM2) a partir de las concentraciones de entrada (concentración de PM1). Asimismo, la curva del Modelo ADZ presenta una distribución de concentraciones con valores semejantes en un 95 % de PM2.

#### **4.3. Prueba de Hipótesis.**

Las Hipótesis planteadas para este estudio son:

**Hi:** El conocimiento del coeficiente de dispersión longitudinal a través de la calibración de un modelo de transporte de solutos, sumado a la aplicación de un software, permitirán simular e implementar un modelo hidrodinámico del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra.

**Ho:** El conocimiento del coeficiente de dispersión longitudinal a través de la calibración de un modelo de transporte de solutos, sumado a la aplicación de un software, no permitirán simular e implementar un modelo hidrodinámico del transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra.

De acuerdo a los resultados obtenidos en campo y en gabinete, se determinó validar la prueba de hipótesis a través la medida estadística R- cuadrado, o también conocida como coeficiente de determinación, valor que indica que tan cerca están los datos de a línea de regresión ajustada, siendo las condiciones de validación las siguientes:

- Un valor de 1.0 indica un ajuste perfecto, por ende, un modelo muy fiable para previsiones futuras.
- Un valor de 0.0 indica que el cálculo no logra modelar los datos con precisión en absoluto.

Asimismo, se usó la medida estadística R, denominado coeficiente de correlación, siendo las condiciones de validación las siguientes:

- Cuanto más se aproxima a 0, la relación es débil.
- Los valores r positivos indican correlación positiva, en donde las variables tienden a incrementarse juntos.
- Los valores r negativos indican una correlación negativa, en la que los valores de una variable tienden a incrementarse mientras que los valores de la otra variable descienden.

Ambas medidas estadísticas se realizaron en las hojas electrónicas de Microsoft Excel, siendo los resultados los siguientes:

**Tabla N° 18:** Medidas Estadísticas.

MEDIDAS ESTADISTICAS	SIMULACIÓN
R	0.95175501
R-CUADRADO	0.90583759

**Fuente.** El autor.

De acuerdo a los resultados obtenidos, tanto el R Y R-cuadrado, presentan datos cercanos al valor 1.0, considerando que los valores de correlación no son perfectos, se asume que los valores son positivos, por ende, **se acepta la Hipótesis Alternativa Hi** y se rechaza la Hipótesis nula Ho, debido a que si se logró modelar y simular el transporte de contaminantes conservativos en flujos de agua del río Ragra.

#### **4.4. Discusión de resultados.**

Según el ANA (2016), en su Protocolo para el monitoreo de la calidad del agua, señala la importancia de considerar una longitud de zona de muestra para realizar muestreos y ensayos; por ende, se determinó estos valores durante el trabajo de campo; en tanto los resultados indicaron que la longitud mínima debía ser 47 metros. Bajo estas consideraciones, el ensayo de trazadores realizado posteriormente cumplieron con los requerimientos del ANA, dando validez a los datos obtenidos en campo.

Según los resultados de Nakaya y Saavedra (2020) en la Estación 2, los puntos 1 y 2 no superan el 40 % de diferencia de concentración, estando a una distancia de 40 metros, lo que difiere de este trabajo. La presente investigación tuvo 50 metros de separación de PM1 y PM2 y la diferencia de concentraciones supera el 40%, esto podría ser por la forma del cauce del río, siendo un factor importante para las diferencias de concentraciones, a parte que las profundidades del río y las velocidades son distintas. Esto quiere decir, que, a mayor caudal y profundidad del cauce, mayores serán las diferencias de concentraciones entre los puntos de medición.

El trazador usado para los ensayos fue la sal común, por la diversidad de ensayos realizados y su efectividad para obtener datos necesarios para la modelación de cauces, por ende, en este trabajo se usaron 4kg de sal en 12 litros de agua del río, considerando que el cauce tiene vertimiento de aguas residuales. Según Chirinos (2022), el río Ragra es considerado como fuente de aguas residuales domésticas y aguas industriales; esto respondería a la variación de concentraciones en ambos puntos.

El Tiempo medio de viaje ( $t_s$ ) nos permite determinar el tiempo de recorrido de la masa efectiva del centroide del soluto en el cauce del río Ragra, en PM1 y PM2. Asimismo, la diferencia entre el Tiempo medio de viaje ( $t_s$ ) de ambos puntos, nos permite conocer la variación de tiempo necesario para que la masa efectiva del centroide recorra de PM1 a PM2. Según los datos obtenidos en el ensayo de trazadores, se requiere 86.27

segundos para que el centroide de la masa efectiva se presente en PM1 desde el Punto de inyección (PT), y 143.33 segundos para PM2. La variación entre PM1 y PM2 es de 57.06 segundos.

Según el ensayo de trazador salino, las primeras partículas arribaron a PM1 a los 51.21 segundos desde el Punto de Inyección ubicado a 50 metros; y a los 94.07 segundos a PM2, ubicado a 100 metros. La variación entre ambos es de 42.86 segundos, siendo este dato necesario para el cálculo de Tiempo de Residencia y el Coeficiente de Dispersión.

El tiempo de Residencia ( $T_r$ ) determinado a través del ensayo de trazador salino es de 14.20 segundos entre PM1 y PM2.

La tabla 17 muestra los parámetros iniciales necesarios para la calibración. Se observa que en el punto PM1 estuvo ubicado a 50 metros del punto de inyección, respetando los cálculos de zona de mezcla, con una concentración máxima de 735.425 mg/l y con la velocidad obtenida por el método de caudal de la primera campaña. En el punto PM2, la distancia considerada fue de 100 metros del punto de inyección, es decir a 50 metros del punto PM1, en donde se obtuvo una concentración máxima de 252.59 mg/l.

Así mismo, se determinó el tiempo de retraso advectivo, el tiempo de residencia  $T_r$  y el DF que es el factor de dispersión. Los parámetros del modelo ADZ se trabajaron a partir del factor  $\Phi$ , de acuerdo a la interpretación de los parámetros del modelo ADZ de Constain (2013). De acuerdo a sus interpretaciones se pudo desarrollar los cálculos a través de las curvas de concentración halladas in situ por el método de trazadores.

En cuanto a los valores de coeficiente de dispersión o fracción dispersiva, Nakaya y Saavedra (2020), obtuvieron un valor de 0.18 m<sup>2</sup>/s y 2.05 m<sup>2</sup>/s, a diferencia del valor obtenido para el río Ragra que fue de 0.25 m<sup>2</sup>/s; esto se debe a que la

diferencia de caudales es significativa, por ende, podemos inferir que el coeficiente de dispersión depende sustancialmente del volumen del cuerpo hídrico.

“La fracción dispersiva representa el volumen total del tramo que participa en el flujo que se considera completamente mezclada, o la fracción de tiempo de retención en el cual la sustancia disuelta es dispersada”. (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2013). En la tabla 19, se observa también que el valor de DF (fracción dispersiva) es inferior a uno (01), por ende, se puede inferir que el predominio del transporte es de tipo advectivo.

## CONCLUSIONES

1. El modelo de Transporte de solutos ADZ, ofrece mayor accesibilidad y confiabilidad en sus ecuaciones, ya que ofrece una mejor representación del cauce, a diferencia del modelo ADE y TS que requieren mayores datos y ecuaciones complejas, asimismo no consideran las zonas muertas del cauce, siendo este un factor importante al momento de modelar y simular.
2. Se logró determinar los parámetros hidrodinámicos y características morfológicas del río Ragra a través de la medición de caudal y la determinación de zona de mezcla, siendo estos datos necesarios para los cálculos del modelo de transporte de solutos ADZ.
3. El ensayo de trazadores con el uso de NaCl permitió determinar los parámetros necesarios para la calibración del modelo. Así mismo, a través del ensayo se logró obtener el valor del Tiempo Medio de Viaje, Tiempo de Retraso Advectivo, Tiempo de Residencia y el Factor Dispersivo DF con un valor de 0.25 m<sup>2</sup>/s.
4. La simulación realizada a través de las hojas de cálculo de Microsoft Excel permitió reflejar el comportamiento del modelo ADZ comparada con los datos experimentales de campo, a través de los parámetros calibrados del modelo ADZ.

## RECOMENDACIONES

### **A los investigadores.**

1. Realizar más campañas para la medición de caudal, teniendo en consideración los periodos de lluvias y de estiaje, con la finalidad de obtener datos representativos para el modelo ADZ.
2. Realizar calibraciones de los parámetros de medición de los equipos a utilizar antes del ensayo de trazadores.
3. Considerar un número de personas adecuado para la realización del ensayo de trazadores, con el fin de recolectar los datos de forma adecuada; asimismo se recomienda contar con mejores recursos económicos para acceder a equipos que ofrezcan mayor validez y confiabilidad de resultados.
4. Realizar mediciones de conductividad en intervalos menores a 10 segundos.
5. Usar las medidas de seguridad necesarias para salvaguardar la integridad física de los participantes en la investigación.

### **A la comunidad en general.**

1. Tomar conciencia sobre la contaminación de los recursos hídricos, y sobre las repercusiones a la calidad de vida a las poblaciones aledañas.
2. Promover estudios de calidad hídrica mediante modelos de simulación de transporte de contaminantes no conservativos y conservativos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antigüedad, I., Ibarra, V., & Morales, T. (1988). Aplicación de los trazadores en la investigación hidrogeológica de los acuíferos Karsticos. *Los trazadores en la hidrogeología Karstica :Metodología de su uso e interpretación de los ensayos de trazado*, 31 - 45. San Sebastián, País Vasco: MUNIVE. Recuperado el 1 de Abril de 2021
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2013). *Metodología de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial*. Ministerio del Ambiente, Bogotá. Recuperado el 15 de Enero de 2023, de [https://www.anla.gov.co/01\\_anla/documentos/ciudadania/03\\_partic\\_ciudadana/con-pub/Metodologia\\_-\\_Longitud\\_de\\_Influencia\\_de\\_Vertimientos.pdf](https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/ciudadania/03_partic_ciudadana/con-pub/Metodologia_-_Longitud_de_Influencia_de_Vertimientos.pdf)
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Guía/Manual, Unidad Hidrográfica, Lima. Recuperado el 14 de Noviembre de 2022
- Autoridad Nacional del Agua y Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua* (Primera ed.). (A. M. Rodríguez Paredes, Ed.) Per. Recuperado el 1 de Junio de 2021
- Botero Jaramillo, J. (2005). *Estudios de inyección instantánea de trazadores en ríos de montaña*. Universidad de los Andes, Bogotá. Recuperado el 13 de Abril de 2021
- Cajas, D. (2014). Dispersión de contaminación en medio acuático, aproximación numérica y simulación computacional- Bahía Buenaventura-Colombia. *Congreso Nacional del Medio Ambiente*. Brasil. Recuperado el 4 de Enero de 2021
- Camacho, L. A., & Cantor, M. A. (2006). Calibración y análisis de la capacidad predictiva de modelos de transporte de solutos en un río de montaña colombiano. En *Avances en recursos hidráulicos* (págs. 39-52). Bogotá, Colombia. Recuperado el 7 de Junio de 2021

- Cañon Zambrano , J. D. (2004). *Estudios con trazadores e investigación de modelos de transporte de solutos en un río de montaña-Quebrada Lejía*. Universidad de los Andes, Bogotá.  
Recuperado el 4 de Enero de 2021
- Cerna Mendez, K. K., & Rodríguez Pacheco, M. J. (2021). *Modelamiento y Simulación de la Dispersión de una Mezcla de contaminantes Orgánicos e Inorgánicos en un río*. Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Lima.  
Recuperado el 3 de Julio de 2021, de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/63435>
- Chang, E. (2011). *Simulación de la dispersión de contaminantes en un río*. Universidad de Carabobo, Valencia. Recuperado el 2 de Enero de 2021
- Chirinos Malaga , C. E. (2021). *Índice de Calidad de Agua y contenido de Metales Pesados en el río San Juan, Cerro de Pasco* . Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina , Lima. Recuperado el 4 de Enero de 2022
- Claros Guerrero , E. M., Cipriano Bautista, J. G., Cabello Blanco, J. J., Chirito Laurencio, S. I., Ramirez Mundaca, F. E., Leon Romero, R., . . . Alberto Gonzales , Y. G. (2017). Modelación de la dispersión de contaminantes del agua de la cuenca del río Huaura - 2017. *Repositorio Institucional*. Recuperado el 4 de Enero de 2021
- Espinoza Rivas, R. L., Vinicio Merino, A., & Zavaleta Lemus, R. M. (2013). *Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del río Suquiapa, Santa Ana*. Tesis de Grado, Universidad de El Salvador, San Salvador . Recuperado el 2 de Enero de 2020
- García Quintero , H. A. (2008). *Modelación de la calidad del agua en corrientes naturales mediante sistemas no lineales acoplados*. Tesis de maestría , Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Recuperado el 2 de Abril de 2022, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/3809/GarciaQuinteroHermesAlfonso2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Garrido, A., Perez Damian, J. L., & Enriquez Guadarrama, C. (2010). Delimitacion de las cuencas funcionales de las cuencas hidrograficas de Mexico. En A. Garrido, & H. Cotler, *Las cuencas hidrograficas de Mexico. Diagnostico y priorizacion* (Instituto Nacional de Ecologia ed.). Mexico. Recuperado el 6 de Enero de 2021
- Gonzalez Pinzon, R. A., & Camacho Botero, L. A. (2008). *SOLUTE TRANSPORT TOOL V. 1.0.* Manual , Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingenieria Civil y Matematica, Bogotá. Recuperado el 1 de Diciembre de 2022, de <https://es.scrib.com/document/562214747/STTool-Manual-Usuario>
- Hernandez Sampieri , R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (1994). *Metologia de la investigacion* (Primera ed.). Colombia: McGRAW-HILL. Recuperado el 1 de Junio de 2021
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodologia de la investigacion* (Sexta ed.). (M. A. Toledo Castellanos, Ed.) Mexico: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. Recuperado el 1 de Junio de 2021
- Incahuanaco Naveros, J., Montalvan Vasquez, R., & Davila Lima, Y. (2021). Contaminacion por metales pesados (As,B, Cd, Cr, Cu, Fe y Pb) en sedimentos superficiales del estuario Boca del río,Ilo, Moquegua,Peru 2021. *Sincretismo, 01(001)*. Recuperado el 20 de Febrero de 2022
- Nakaya Yamashiro, D. A., & Saavedra Diaz, S. M. (2020). *Dispersion de contaminantes solubles en la cuenca baja del río Mala, provincia de Cañete, en epoca seca*. Universidad Cientifica del Sur, Lima. Recuperado el 2 de Enero de 2021
- OEFA. (2012). *Reporte Publico del Informe W1244-2012-OEFAIDS*. Reporte, Cerro de Pasco. Recuperado el 24 de Agosto de 2022, de [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=10067](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=10067)
- OEFA. (2012). *Reporte Publico del Informe W913- 2012-OEFA/DS*. Reporte, Cerro de Pasco. Recuperado el 23 de Agosto de 2022, de [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=10104](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=10104)

- Olivar Medina, J. D. (2015). *Análisis de trazadores y calibración y comparación de modelos de transporte de solutos en tramos largos de los Ríos Arzobispo y Fucha*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá D.C. Recuperado el 3 de Junio de 2021
- Oyarzun L., R. (2007). Temas ambientales. En C. -Chile. Chile. Recuperado el 15 de Febrero de 2021
- Quezada Lucio, N. (2010). *Metodología de la investigación* (Primera ed.). Lima, Peru: Macro EIRL. Recuperado el 1 de Junio de 2021
- Quispe Prado, W., Herrera, L., Sinchez Muñoz, J., Parodi, M., Matar, M., Gomez Insausti, J., . . . Luccini, E. (2016). Dispersión de contaminantes en cursos de agua. Estudios en el río Chumbao, Peru. *Energeia*, 14(14). Recuperado el 2 de Enero de 2021
- Rojas Deudor, O. M. (2018). *Evaluación de Parámetros físico-químico y microbiológico del río Ragra afluente del río San Juan, para determinar la categoría de sus aguas - Simon Bolívar - Pasco- 2018*. Tesis de Pregrado, Cerro de Pasco. Recuperado el 15 de Diciembre de 2021, de [http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/529/1/T026\\_72554099\\_T.pdf](http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/529/1/T026_72554099_T.pdf)
- Ruiz Jaramillo, L. M. (2017). *Implementación de un Modelo de Calidad de agua aplicable a la Simulación de Metales Pesados en corrientes con caso de estudio en la Cuenca del Negro*. Tesis de Maestría, Medellín. Recuperado el 21 de Agosto de 2022
- Sanchez Carlessi, H., & Reyes Meza, C. (2015). *Metodología y Diseños en la Investigación Científica* (Quinta ed.). Lima, Peru: Vision Universitaria. Recuperado el 2022 de Julio de 15
- Sanchez San Roman, J. J. (2017). Transporte de contaminantes. En D. d.-U. Salamanca, *Hidrología, Hidrogeología* (págs. 1-13). Salamanca, España. Recuperado el 10 de Febrero de 2021

Sanchez Velez, A. S., Garcia Nuñez, R. M., & Palma Trujano, A. (2013). *La cuenca hidrografica: unidad basica de planeacion y manejo de recursos naturales* (Primera ed.). Mexico.

Recuperado el 4 de Enero de 2021

SEMARNAT. (2013). *Cuencas hidrograficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestion* (Primera edicion ed.). Mexico D.F., Mexico. Recuperado el 4 de Enero de 2021

SENAMHI. (2011). ¿Que es una cuenca hidrologica? En Z. I. Novoa Goicochea (Ed.), *Aguas subterranas - Acuíferos. 1*, pág. 9. Lima: Sociedad Geografica de Lima. Recuperado el 4

de Enero de 2021

Zojer, H. (1983). *Tecnica de trazadores*. 44 - 58. (G. Nagore, Trad., & I. H. Mexico, Recopilador)

Austria, Austria. Recuperado el 7 de Marzo de 2021

# **ANEXOS**

## Anexo N° 1: Ficha técnica del Equipo - Multiparámetro.



### Ficha Técnica del Producto Medidor Multiparamétrico de pH/ORP/CE/OD/Presión/Temperatura

Hanna Instruments SAS  
www.hannacolombia.com

## Medidor Multiparamétrico de pH/ORP/CE/OD/Presión/Temperatura

HI 98194



### Descripción

El HI98194 es un medidor Multiparamétrico portátil impermeable con registro que monitorea hasta 12 parámetros de calidad del agua los cuales son 6 medidos y 6 calculados. La sonda multisensor con microprocesador permite la medición de parámetros claves como pH, ORP, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura. La sonda transmite lecturas digitalmente al medidor, donde se pueden exhibir y registrar puntos de datos. El uso de la comunicación digital permite una transferencia de datos libre de ruidos de hasta 100 metros de longitud. El sistema completo es simple de configurar y fácil de usar.

El medidor HI98194 presenta una pantalla de matriz de punto, retroiluminada con gráficos en pantalla con la capacidad y la habilidad de ajustar automáticamente los tamaños de los dígitos que aparecen basadas en el número de parámetros seleccionados. Cada parámetro medido es totalmente configurable.

HI98194 está diseñado para soportar ambientes exigentes y es la solución ideal para las mediciones de campo de lagos, ríos y océanos. El medidor cumple con IP67 y la sonda multisensor cumple con las normas IP68.

### Especificaciones

#### ESPECIFICACIONES DEL MEDIDOR:

<b>pH / mV</b>	Rango	0.00 a 14.00 pH / a 600.0 mV
	Resolución	0.01 pH / 0.1 mV
	Precisión	±0.02 pH / ±0.3 mV
	Calibración	Automático uno, dos, o tres puntos con automática reconocimiento de cinco estándar (pH 4.01, 6.86, 7.00, 9.18, 10.01) o un valor personalizado
<b>ORP</b>	Rango	±2000.0 mV
	Resolución	0.1 mV
	Precisión	±1.0 mV
	Calibración	Automático en un punto personalizado (mV relativo)
<b>CE</b>	Rango	0 a 9999 µS/cm; 0.000 a 200.0 mS/cm (CE absoluta hasta 400.0 mS/cm)
	Resolución	Manual: 1 µS/cm; 0.001 mS/cm; 0.01 mS/cm; 0.1 mS/cm; 1 mS/cm; Auto-rango: 1 µS/cm de 0 a 9999 µS/cm; 0.01 mS/cm de 10.00 a 99.99 mS/cm; 0.1 mS/cm de 100.0 a 400.0 mS/cm; Auto-rango(fijo mS/cm): 0.001 mS/cm de 0.000 a 9.999 mS/cm; 0.01 mS/cm de 10.00 a 99.99 mS/cm; 0.1 mS/cm de 100.0 a 400.0 mS/cm
	Precisión	±1% de de lectura o ±1 µS/cm cual sea mayor
	Calibración	automático a un punto, con seis estándar soluciones (84 µS/cm, 143.3 µS/cm, 5.00 mS/cm, 12.88 mS/cm, 88.0 mS/cm, 111.8 mS/cm) o un punto personalizado
<b>TDS</b>	Rango	0 a 9999 ppm (mg/L); 0.000 a 400.0 ppt (g/L) (máximo valor depende del factor TDS)
	Resolución	Manual: 1 ppm (mg/L); 0.001 ppt (g/L); 0.01 ppt (g/L); 0.1 ppt (g/L); 1 ppt (g/L); auto-rango: 1 ppm (mg/L) de 0 a 9999 ppm (mg/L); 0.01 ppt (g/L) de 10.00 a 99.99 ppt (g/L); 0.1 ppt (g/L) de 100.0 a 400.0 ppt (g/L);  autorango(fijo ppt): 0.001 ppt (g/L) de 0.000 a 9.999 ppt (g/L); 0.01 ppt (g/L) de 10.00 a 99.99 ppt (g/L); 0.1 ppt (g/L) de 100.0 a 400.0 ppt (g/L)
	Precisión	±1% de de lectura o ±1 ppm (mg/L), cual sea mayor
	Calibración	Basado en la calibración de conductividad
<b>Resistencia</b>	Rango	0 a 99999 Ω-cm; 0 a 1000.0 kΩ-cm; 0 a 1.0000 MΩ-cm
	Resolución	Depende de la lectura de la resistencia
	Calibración	Basado en la calibración de conductividad
	Calibración	
<b>Salinidad</b>	Rango	0.00 a 70.00 PSU
	Resolución	0.01 PSU
	Precisión	±2% de de lectura o ±0.01 PSU Cual sea mayor
	Calibración	basado calibración de conductividad
<b>Agua de mar I</b>	Rango	0.0 a 50.0 It, I <sub>o</sub> , I <sub>∞</sub>
	Resolución	0.1 It, I <sub>o</sub> , I <sub>∞</sub>
	Precisión	±1 It, I <sub>o</sub> , I <sub>∞</sub>
	Calibración	basado en la calibración de conductividad

<b>Oxígeno Disuelto</b>	Rango	0.0 a 500.0%; 0.00 a 50.00 ppm (mg/L)
	Resolución	0.1%; 0.01 ppm (mg/L)
	Precisión	0.0 a 200.0%; ±1.5% de de lectura o ±1.0% cual sea mayor; 200.0 a 500.0%; ±2% de la lectura; 0.00 a 20.00 ppm (mg/L): ±1.5% de la lectura o ±0.10 ppm (mg/L), Cual sea mayor; 20.00 ppm (mg/L) a 50.00 ppm (mg/L): ±2% de la lectura
	Calibración	Automática en uno o dos puntos de 0 y 100% o un punto personalizado
<b>Presión Atmosférica</b>	Rango	450 a 850 mm Hg; 17.73 a 33.46 en Hg; 600.0 a 1130.2 mbar; 8.702 a 16.436 psi; 0.5920 a 1.1184atm; 60.00 a 113.32 kPa
	Resolución	0.1 mm Hg; 0.01 en Hg; 0.1 mbar; 0.001 psi; 0.0001 atm; 0.01 kPa
	Precisión	±3 mm Hg en a 15 °C de temperatura durante calibración
	Calibración	automática en un punto personalizado
<b>Temperatura</b>	Rango	-5.00 a 55.00 °C; 23.00 a 131.00 °F; 268.15 a K 328.15
	Resolución	0.01 °C; 0.01 °F; 0.01 K
	Precisión	±0.15 °C; ±0.27 °F; ±0.15K
	Calibración	automática en un punto personalizado
<b>Especificaciones Adicionales</b>	Compensación de Temperatura	automática de -5 a 55 °C (23 a 131 °F)
	Registro Memoria	45.000 registros (Registro continuo o a demanda de todos los parámetros)
	Registro Intervalo	una segundo a tres horas
	PC Conectividad	USB para PC con el software de Hanna HI9298194
	Medio ambiente	0 a 50 °C (32 a 122 °F); HR 100% (RH)
	Batería Tipo / vida	Pilas 1, 5V AA (4) / aproximadamente 260 horas de uso continuo sin luz (50 horas con retroiluminación)
	Dimensiones / Peso	185 x 93 x 35.2 mm (7.3 x 3.6 x 1.4") / 480 g (14.2 oz.)

#### ESPECIFICACIONES DE LA Sonda:

<b>Sonda</b>	HI7698194
<b>Sensores</b>	3 (pH, DO, EC)
<b>Muestras ambientales</b>	Fresca, salobre, agua de mar
<b>Protección</b>	IP68
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	-5 a 55 °C
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-20 a 70 °C

}

<b>Profundidad máxima</b>	20 m (66')	
<b>Dimensiones (sin cable)</b>	342 mm (13,5 pulgadas); diámetro 46 mm (1,8 pulg.)	
<b>Peso (sin pilas y sensores)</b>	570 g (20,1 oz.)	
<b>Especificación del cable</b>	Cable apantallado multiconductor con juntura interna clasificado para el uso de hasta de 68 kg (150 lb). Uso intermitente	
<b>Materiales para humedad</b>	Cuerpo	ABS
	Hilos de rosca	Nylon
	Protector	ABS / 316 SS
	Sonda de temperatura	316 SS
	Juntas tónicas	EPDM

**ESPECIFICACIONES DEL SENSOR:**

Sensor	HI7698194-0	HI7698194-1	HI7698194-3	HI7698194-2	
<b>Descripción</b>	Sensor pH	Sensor de pH/ORP	Sensor CE	Sensor de OD	
<b>Tipo de medida</b>	pH, pH- mV	pH, pH- mV , ORP	CE, TDS, salinidad	OD (% saturación y Concentración)	
<b>Rango de medición</b>	0.00 a 13.00 pH ; ±600.0pH-mV	pH de 0.00 a 13.00; ±600.0 pH mV; ±2000.0 mV (ORP)	0.0 a 200.0 mS/cm; 0.0 para 400 mS/cm (absoluta)	0.0 a 500.0 %; 0.00 a 50.00 mg/L	
<b>Rango de temperatura</b>	-5 a 55 ° C	-5 a 55 ° C	-5 a 55 ° C	-5 a 55 ° C	
<b>Código de color</b>	rojo	rojo	azul	Blanco	
<b>Materiales</b>	Punta (pH)	vidrio (pH)	vidrio (pH); Pt (ORP)	acero inoxidable acero electrodos AISI 316	
	Unión	cerámica	cerámica	No aplica	
	Cuerpo	PEI	PEI	ABS/epoxico	Punta blanca ABS
	Electrolito	gel	gel	No aplica	No aplica
	Referencia	doble	doble	No aplica	No aplica

<b>Solución de mantenimiento</b>	HI70300 (solución de almacenamiento)	HI70300 (solución de almacenamiento)	ninguna	HI70425 ( Electrolito)
<b>Dimensiones</b>	118 x 15 mm	118 x 15 mm	111 x 17 mm	99 x 17 mm
<b>Profundidad</b>	20 m (65')	20 m (65')	20 m (65')	20 m (65')

## Accesorios

- **HI 7007L** Solución pH 7.01 500 ml
- **HI 7004L** Solución pH 4.01 500 ml
- **HI 7010L** Solución pH 10.01 500 ml
- **HI 7061L** Solución Limpieza uso general 500 ml
- **HI 70300L** Solución de Almacenamiento 500 ml

## Cómo pedir

**HI98194** se suministra con sonda HI7698194, sensor de pH HI7698194-0, sensor de CE HI7698194-3 , sensor de OD HI7698194-2 , Kit de mantenimiento de sonda HI 76981942 (solución electrolítica HI 70425, tapas de membrana OD (5), empaques para sensores (5), jeringa de grasa para lubricar las juntas tóricas), Hanna PC software HI9298194, cable micro USB HI920015, baterías 1.5V AA (4), manual de instrucciones, guía de inicio rápido, certificado de calidad y resistente estuche con termoformado personalizado.

## Ventajas

- **LCD Matriz de puntos con retroiluminación**
- **Protección impermeable**
- **Conector rápido (Quick Din) de sonda digital**
- **Códigos de color, sensores reemplazables en terreno**
- **Reconocimiento automático del sensor**
- **Compensación automática de temperatura**
- **Compensación automática de la presión barométrica**
- **Registro de datos**
- **Función de calibración rápida o estándar**
- **Datos GLP**
- **Teclado intuitivo**
- **Tecla de ayuda dedicada**
- **Conectividad de PC**
- **Batería de larga duración**
- **Maleta resistente termoformada**

**Anexo N° 2: Ficha Técnica de Sal común.**

	<b>ESPECIFICACION TECNICA</b>	<b>Código</b> : PT-SAL-17 <b>Versión</b> : 00 <b>Fecha</b> : 20/07/2018 <b>Página</b> : 1 de 1
	<b>SAL MARINA EMSAL COCINA</b>	

1. **Producto:** Sal Marina Emsal Cocina - Oquendo
2. **Fórmula Química:** NaCl
3. **Otras Denominaciones:** Sal Marina Emsal Cocina
4. **Especificaciones Técnicas**

Características	Límites	Unidad	Métodos de ensayo
Humedad	máx. 0.50	% w/w	LC-SAL-02
Insolubles	máx. 0.10	% w/w	LC-SAL-03
Calcio (como Ca <sup>2+</sup> )	máx. 0.16	% w/w	LC-SAL-04
Magnesio (como Mg <sup>2+</sup> )	máx. 0.15	% w/w	LC-SAL-04
Sulfato (como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	máx. 0.28	% w/w	LC-SAL-06
Cloruro de Sodio (como NaCl)	mín. 99.0	% w/w	LC-SAL-07
Hierro (como Fe)	máx. 10.0	ppm	LC-SAL-14
Flúor (como F)	200 - 250	ppm	LC-SAL-09
Iodo (como I)	30 – 40	ppm	LC-SAL-10
Antiapelmazante	máx. 1.0	% w/w	LC-SAL-13
Granulometría			LC-SAL-12
Malla ASTM N°	Pasante		
M10 (2 mm)	mín. 80	%	
M80 (180 um)	máx. 60	%	

- Todos los valores son reportados en base seca
- Se considera ppm= mg/kg

**5. Presentaciones**

1kg x 25 unidades (004-020339)  
 ½ kg x 50 unidades

**6. Tiempo de Vida**

2 años a partir de la fecha de producción indicada en el código del lote.

**7. Inocuidad**

Este producto ha sido elaborado siguiendo los lineamientos de nuestro sistema HACCP.

**8. Usos**

De preferencia para uso en consumo humano.

**9. Precauciones y restricciones**

La aceptación de la presente especificación y el uso final del producto es de absoluta responsabilidad del cliente.

**Fuente:** Información recopilada de QUIMPAC S.A.

**Anexo N° 3: Ficha de recolección de datos de campo- Formato.**

<b>LECTURA DE CONDUCTIVIDAD</b>					
<b>N° de Campaña</b>				<b>Fecha</b>	
<b>PUNTO PM1-C1</b>			<b>PUNTO PM2-C1</b>		
<b>N°</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Conductividad (us/cm)</b>	<b>N°</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Conductividad (us/cm)</b>
1	00:00:00		1	00:00:00	
2	00:00:10		2	00:00:10	
3	00:00:20		3	00:00:20	
4	00:00:30		4	00:00:30	
5	00:00:40		5	00:00:40	
6	00:00:50		6	00:00:50	
7	00:01:00		7	00:01:00	
8	00:01:10		8	00:01:10	
9	00:01:20		9	00:01:20	
10	00:01:30		10	00:01:30	
11	00:01:40		11	00:01:40	
12	00:01:50		12	00:01:50	
13	00:02:00		13	00:02:00	
14	00:02:10		14	00:02:10	
15	00:02:20		15	00:02:20	
16	00:02:30		16	00:02:30	
17	00:02:40		17	00:02:40	
18	00:02:50		18	00:02:50	
19	00:03:00		19	00:03:00	
20	00:03:10		20	00:03:10	
33	00:05:20		33	00:05:20	
34	00:05:30		34	00:05:30	
47	00:07:40		47	00:07:40	
52	00:08:30		52	00:08:30	
53	00:08:40		53	00:08:40	
54	00:08:50		54	00:08:50	
55	00:09:00		55	00:09:00	
56	00:09:10		56	00:09:10	
57	00:09:20		57	00:09:20	
58	00:09:30		58	00:09:30	
59	00:09:40		59	00:09:40	
60	00:09:50		60	00:09:50	
61	00:10:00		61	00:10:00	

Anexo N° 4: Cálculo del Tiempo medio de Viaje  $t_s$ , en PM1 y PM2.

<b>Ts 1</b>	<b>77.94</b>	<b>seg</b>
-------------	--------------	------------

Tiempo (Seg)	Concentracion (mg/L)	$\Delta t$	$C_i * \Delta t_i$	$C_i * \Delta t_i * t_i$
0	0	0	0	0
5	0	5	0	0
10	0	5	0	0
15	0	5	0	0
20	0	5	0	0
25	0	5	0	0
30	0	5	0	0
35	0	5	0	0
40	0	5	0	0
45	6.325	5	31.625	1423.125
50	15.525	5	77.625	3881.25
55	64.975	5	324.875	17868.125
60	274.275	5	1371.375	82282.5
65	585.925	5	2929.625	190425.625
70	735.425	5	3677.125	257398.75
75	606.625	5	3033.125	227484.375
80	384.675	5	1923.375	153870
85	326.6	5	1633	138805
90	236.325	5	1181.625	106346.25
95	176.525	5	882.625	83849.375
100	94.875	5	474.375	47437.5
105	90.275	5	451.375	47394.375
110	79.35	5	396.75	43642.5
115	36.8	5	184	21160
120	22.425	5	112.125	13455
125	21.275	5	106.375	13296.875
130	19.55	5	97.75	12707.5
135	13.225	5	66.125	8926.875
140	10.925	5	54.625	7647.5
145	4.025	5	20.125	2918.125
150	2.875	5	14.375	2156.25
155	0	5	0	0
160	0	5	0	0
165	0	5	0	0
170	0	5	0	0
175	0	5	0	0
180	0	5	0	0
185	0	5	0	0
190	0	5	0	0

195	0	5	0	0
200	0	5	0	0
205	0	5	0	0
210	0	5	0	0
215	0	5	0	0
220	0	5	0	0
225	0	5	0	0
230	0	5	0	0
235	0	5	0	0
240	0	5	0	0
245	0	5	0	0
250	0	5	0	0
255	0	5	0	0
260	0	5	0	0
265	0	5	0	0
270	0	5	0	0
275	0	5	0	0
280	0	5	0	0
285	0	5	0	0
290	0	5	0	0
295	0	5	0	0
300	0	5	0	0
305	0	5	0	0
310	0	5	0	0
315	0	5	0	0
320	0	5	0	0
325	0	5	0	0
330	0	5	0	0
335	0	5	0	0
340	0	5	0	0
345	0	5	0	0
350	0	5	0	0

<b>Ts 2</b>	<b>143.08</b>	<b>seg</b>
-------------	---------------	------------

<b>Tiempo (Seg)</b>	<b>Concentracion (mg/L)</b>	<b><math>\Delta t</math></b>	<b><math>C_i \cdot \Delta t_i</math></b>	<b><math>C_i \cdot \Delta t_i \cdot t_i</math></b>
0	0	0	0	0
5	0	5	0	0
10	0	5	0	0
15	0	5	0	0
20	0.5681	5	2.8405	56.81
25	0.5681	5	2.8405	71.0125
30	0.5681	5	2.8405	85.215

35	1.1362	5	5.681	198.835
40	1.1362	5	5.681	227.24
45	1.7043	5	8.5215	383.4675
50	2.2724	5	11.362	568.1
55	2.2724	5	11.362	624.91
60	2.8405	5	14.2025	852.15
65	3.4086	5	17.043	1107.795
70	3.4086	5	17.043	1193.01
75	3.9767	5	19.8835	1491.2625
80	5.1129	5	25.5645	2045.16
85	4.5448	5	22.724	1931.54
90	5.681	5	28.405	2556.45
95	6.2491	5	31.2455	2968.3225
100	9.6577	5	48.2885	4828.85
105	24.9964	5	124.982	13123.11
110	74.4211	5	372.1055	40931.605
115	149.9784	5	749.892	86237.58
120	195.4264	5	977.132	117255.84
125	256.7812	5	1283.906	160488.25
130	267.007	5	1335.035	173554.55
135	218.1504	5	1090.752	147251.52
140	205.0841	5	1025.4205	143558.87
145	174.9748	5	874.874	126856.73
150	149.9784	5	749.892	112483.8
155	113.0519	5	565.2595	87615.2225
160	74.4211	5	372.1055	59536.88
165	74.4211	5	372.1055	61397.4075
170	61.9229	5	309.6145	52634.465
175	55.1057	5	275.5285	48217.4875
180	46.0161	5	230.0805	41414.49
185	38.6308	5	193.154	35733.49
190	32.3817	5	161.9085	30762.615
195	32.3817	5	161.9085	31572.1575
200	32.3817	5	161.9085	32381.7
205	30.1093	5	150.5465	30862.0325
210	28.405	5	142.025	29825.25
215	24.9964	5	124.982	26871.13
220	17.043	5	85.215	18747.3
225	17.043	5	85.215	19173.375
230	7.3853	5	36.9265	8493.095
235	0	5	0	0
240	0	5	0	0
245	0	5	0	0
250	0	5	0	0
255	0	5	0	0

260	0	5	0	0
265	0	5	0	0
270	0	5	0	0
275	0	5	0	0
280	0	5	0	0
285	0	5	0	0
290	0	5	0	0
295	0	5	0	0
300	0	5	0	0
305	0	5	0	0
310	0	5	0	0
315	0	5	0	0
320	0	5	0	0
325	0	5	0	0
330	0	5	0	0
335	0	5	0	0
340	0	5	0	0
345	0	5	0	0
350	0	5	0	0
355	0	5	0	0

**Anexo N° 5: Parámetros Modelo ADZ**

<b>ts1</b>	<b>77.46613582</b>	<b>ts2</b>	<b>143.5203143</b>
<b>ts</b>	<b>66.05417849</b>		
<b>r1</b>	<b>21.37905383</b>	<b>r2</b>	<b>47.96364423</b>
<b>r</b>	<b>26.5845904</b>		
<b>tr</b>	<b>20.48</b>		
<b>At</b>	<b>5</b>		
<b>a</b>	<b>-0.783377464</b>		
<b>bo</b>	<b>0.216622536</b>		
<b>1/Tr</b>	<b>0.048828125</b>		
<b>s</b>	<b>5</b>		
<b>DF</b>	<b>0.310048516</b>		
<b>Masa de NaCl (Kg)</b>	<b>4</b>		
<b>Distancia Total (m)</b>	<b>100</b>		
<b>Distancia de PM1 a PM2 (m)</b>	<b>50</b>		

**Anexo N° 6. Distribución de Concentraciones del Modelo ADZ.**

<b>t</b>	<b>PM1</b>	<b>SIMULACION</b>	<b>PM2</b>
0	0	0	0
5	0	0	0
10	0	0	0
15	0	0	0
20	0	0	0.5681
25	0	0	0.5681
30	0	0	0.5681
35	0	0	1.1362
40	0	0	1.1362
45	6.325	0	1.7043
50	15.525	0	2.2724
55	64.975	0.296802668	2.2724
60	274.275	1.193532684	2.8405
65	585.925	4.736804146	3.4086
70	735.425	19.55940679	3.4086
75	606.625	55.23263374	3.9767
80	384.675	109.0428352	5.1129
85	326.6	165.4142969	4.5448
90	236.325	210.2972291	5.681
95	176.525	243.2985432	6.2491
100	94.875	263.2235623	9.6577
105	90.275	271.3827949	24.9964
110	79.35	268.1072695	74.4211
115	36.8	257.7523076	149.9784
120	22.425	243.026086	195.4264
125	21.275	224.3116689	256.7812
130	19.55	203.3534036	267.007
135	13.225	181.9476422	218.1504
140	10.925	161.1907873	205.0841
145	4.025	141.509373	174.9748
150	2.875	123.3035638	149.9784
155	0	106.5338332	113.0519
160	0	91.37835638	74.4211
165	0	77.78978069	74.4211
170	0	65.80042956	61.9229
175	0	55.35509513	55.1057
180	0	46.34744395	46.0161
185	0	38.64475753	38.6308
190	0	32.10435326	32.3817
195	0	26.58412917	32.3817
200	0	21.94900782	32.3817

205	0	18.0745611	30.1093
210	0	14.84873505	28.405
215	0	12.17232761	24.9964
220	0	9.958678822	17.043
225	0	8.132892055	17.043
230	0	6.630804185	7.3853
235	0	5.397849895	0
240	0	4.387914347	0
245	0	3.562232547	0
250	0	2.88836902	0
255	0	2.339294632	0
260	0	1.892566367	0
265	0	1.529608765	0
270	0	1.198261036	0
275	0	0.938690691	0
280	0	0.735349133	0
285	0	0.576055939	0
290	0	0.451269241	0
295	0	0.353514153	0
300	0	0.276935021	0
305	0	0.216944655	0
310	0	0.169949553	0
315	0	0.13313465	0
320	0	0.104294685	0
325	0	0.081702106	0
330	0	0.064003588	0
335	0	0.050138969	0
340	0	0.039277738	0
345	0	0.030769295	0
350	0	0.024103972	0
355	0	0.018882509	0

**Anexo N° 7. Panel Fotográfico.**



**Imagen N° 8. Multiparámetros usados para las mediciones en campo.**



**Imagen N° 9. Herramientas y materiales usados.**



**Imagen N° 10.** Medición de tramos y ubicación de punto de inyección de trazador salino.



**Imagen N° 11.** Calibración de Multiparámetros.



**Imagen N° 12.** *Medición de área transversal del río.*



**Imagen N° 13.** *Preparación de Solución con Sal y agua del río Ragra.*



**Imagen N° 14.** Calibración de Conductividad – Concentración en el laboratorio.



**Imagen N° 15.** Equipos usados en el laboratorio.