

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISPERSIÓN DE
CONTAMINANTES DE LA PARTE ALTA DEL RÍO SUQUIAPA,
SANTA ANA.**

PRESENTADO POR:

ROBERTO LEANDRO ESPINOZA RIVAS

ALLAN VINICIO MERINO

REBECA MARÍA ZAVALETA LEMUS

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTOR :

ING. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título

:

**CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISPERSIÓN DE
CONTAMINANTES DE LA PARTE ALTA DEL RÍO SUQUIAPA,
SANTA ANA.**

Presentado por

:

ROBERTO LEANDRO ESPINOZA RIVAS

ALLAN VINICIO MERINO

REBECA MARÍA ZAVALETA LEMUS

Trabajo de Graduación Aprobado por

:

Docente Director

:

ING. ÁLVARO JOSUÉ AMAYA ARÉVALO

San Salvador, Octubre 2013

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. ÁLVARO JOSUÉ AMAYA ARÉVALO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido culminar mis estudios, por haberme dado las oportunidades y rodearme de personas que me han ayudado a lograrlo. A la Virgen María por haber sido mi auxilio en los momentos de angustia.

A mis padres, Marta Edith y Manuel de Jesús, por haberme enseñado el valor de la perseverancia, el sacrificio y el trabajo, y por haberme apoyado económica y emocionalmente durante todos estos años.

A mis hermanos: Laura, Eugenia, Isaac y José, por haberme acompañado y ayudado en lo que han podido a lo largo de mi carrera y a mi tío Marco Antonio, por su apoyo incondicional.

Al Ingeniero Álvaro Josué Amaya Arévalo, por habernos proporcionado sus conocimientos para la realización de esta investigación; por su actitud de entrega y paciencia durante el desarrollo del Trabajo de Graduación, y por habernos propuesto la idea del tema de este.

A la Ingeniera Ana Cecilia de Flamenco, por habernos acompañado y trabajado con nosotros durante las visitas de campo, facilitarnos el vehículo para la realización éstas y apoyarnos con palabras de aliento durante este trayecto.

Al Ingeniero Fernando Teodoro Ramírez, por dedicarnos sus fines de semana para acompañarnos y trabajar con nosotros durante las visitas de campo.

A la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por habernos facilitado el equipo necesario para realizar la investigación, y a sus profesores por haberme enseñado las disciplinas de la Ingeniería Química con dedicación y esmero.

A mis compañeros Allan y Leandro, por su apoyo y paciencia a lo largo de la realización del Trabajo de Graduación y a lo largo de la carrera, me siento orgullosa de ambos y les deseo éxitos en su vida profesional.

A mis compañeros: Marta, Johan, Marvin, Jamileth, Ingrid y Carlos, por haber sido un apoyo emocional y académico a lo largo de estos años.

Con cariño,

Rebeca

Le doy gracias a Dios todopoderoso porque me ha permitido completar esta etapa de mi vida, porque me dio la salud, la sabiduría, la paciencia, la inteligencia y la fortaleza para llegar hasta la meta. De igual forma a nuestra madre la Virgen Santísima por interceder por mí a cada momento.

Le quiero agradecer especialmente a mi mamá, Victoria Merino, por el apoyo que siempre me brindó, por el amor incondicional y porque me ha dado todo lo necesario para poder cumplir mis sueños, empezando por mi formación académica, te quiero mucho mamá. A Mamá Chita, mi segunda madre, por todos sus consejos y cuidados ya que me ayudaron a ser la persona que soy ahora.

A mis tíos, Cecy Merino, Virginia de Soler y Ricardo Soler por su apoyo, cariño y consejos, gracias por considerarme como su hijo.

Le dedico este logro a mi tío Ricardo Merino y Papá Meme porque aunque físicamente no estén, los dos han intercedido por mí.

Agradezco a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Universidad de El Salvador y a todos sus maestros por los conocimientos transmitidos, por formarme como Ingeniero Químico y por brindarnos el equipo necesario para la realización de este trabajo de graduación.

A nuestro asesor y amigo Ingeniero Álvaro Amaya por su ayuda, paciencia, apoyo incondicional y por los conocimientos brindados para que este trabajo de graduación fuera realizado con éxito.

A los Ingenieros Teodoro Ramírez y Cecilia de Flamenco por su ayuda desinteresada, sacrificio y disposición; sin ustedes no lo hubiéramos podido lograr.

A mis compañeros de tesis, Leandro y Rebe por su amistad, por su paciencia y por haber compartido toda la carrera conmigo, es un honor haber realizado este trabajo con ustedes.

A todas las personas que me han acompañado y me han brindado su amistad, en especial a Vero por su apoyo, mis amigos de la Universidad, de la Parroquia Divina Providencia, de mi comunidad y de mi ministerio de alabanza Cor Unum.

Con cariño.

Allan Merino

Agradezco en primer lugar a Dios, por ser mi guía y mi refugio, que en su infinito amor ha permitido que se cumpla este sueño con las bendiciones diarias que colman mi vida. Gracias por el discernimiento, salud, perseverancia, paciencia, fortaleza y por permitirme alcanzar esta meta, pero más importante, gracias porque siempre has estado ahí, porque a ti debo este logro.

A mi familia, capaz de amarme, ayudarme, alentarme y brindar para conmigo todo el apoyo que ha sido necesario para llegar a este día, sin ustedes todo esto no sería posible, que en su extensión he encontrado más de lo que pudiera pedir: comprensión, estabilidad y ese respaldo que hace palpable el éxito de esta etapa.

A los ingenieros(as) que de una u otra forma procuraron posible transmitirme un poco de su gran conocimiento, de forma especial a nuestro asesor y amigo Ingeniero Álvaro que nos ha guiado, ayudado, comprendido y alentado en cada etapa de este trabajo que nos hace sentir tanta satisfacción, a la Ingeniera Ana Cecilia de Flamenco y el Ingeniero Teodoro Ramírez por su disposición, apoyo y sacrificio, gracias por todo su esfuerzo, exigencia y consejos. Gracias por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo profesional integral.

A la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por poner a nuestra disposición el equipo necesario para esta investigación, la propuesta del tema y la disposición que siempre encontramos a la resolución de los problemas cuando fuere necesario así como por haberme enseñado las disciplinas de la Ingeniería Química.

A todas las personas que estuvieron cerca a lo largo de esta travesía, los compañeros, amigos de universidad y esas personas que ocupan un lugar especial en mi vida ayudándome a completar cada etapa presente y pasada, porque siempre creyeron en mí confiándome su respaldo y ayuda para ahora poder completar este capítulo.

A mis compañeros de tesis, Allan y Rebeca, con quienes se compartió todo el esfuerzo, desvelo, dedicación, perseverancia y confianza plena de grupo que nos permite con enorme alegría culminar este trabajo de Graduación; éxitos en su vida profesional y gracias por todo.

Con cariño,

Leandro

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es la evaluación de los principales parámetros hidrodinámicos y la evaluación del coeficiente de dispersión de un tramo de aproximadamente 10 km de la parte alta del Río Suquiapa.

El río Suquiapa es un cuerpo de agua que aporta significativamente al río Lempa. Además, este río ha sido evaluado como el tercer río más contaminado del territorio salvadoreño y posee varios usos para los habitantes de zonas aledañas, entre estos usos están de bebedero para ganado, recreación, generación de energía eléctrica y punto de descarga de aguas residuales de tenerías y beneficios de café.

La obtención de los parámetros hidrodinámicos se realizó mediante la técnica de aforo por vadeo, utilizando un molinete hidrométrico tipo Gurley y mediante un experimento de pulso de trazadores utilizando Cloruro de Sodio y tomando como parámetro de campo la conductividad eléctrica con un medidor multiparamétrico de calidad de agua.

Los resultados obtenidos mediante la técnica de aforo por vadeo fueron valores de caudal, velocidad media, perímetro mojado, radio hidráulico, profundidad, área de sección transversal y coeficientes de dispersión obtenidos con la ecuación empírica de Fischer para 18 sitios aforados, que se resumen en 18 fichas.

Utilizando la técnica de Fogler y la ecuación de Singh y Beck para la evaluación del coeficiente de dispersión, se obtuvo un valor de aproximadamente $120.602 \text{ m}^2/\text{s}$ y un promedio de número de Peclet de 7.86, que indica que la dispersión mecánica prevalece en el sentido del flujo, sin embargo, los efectos transversales son significativos. Además, se concluyó que el método de Fischer o ecuación empírica para la evaluación de coeficiente de dispersión no aplica para el sistema en estudio, ya que esta ecuación proporcionó datos bastante dispersos respecto a los obtenidos mediante las otras dos técnicas.

A pesar de las dificultades que implican la utilización del Cloruro de Sodio como trazador, se obtuvieron curvas típicas de un estudio de dispersión con inyección puntual. Además, se lograron identificar ríos tributarios que aportaban un caudal significativo al río y que no estaban identificados en el mapa.

Con los resultados obtenidos con este estudio, es necesario realizar un modelado de dispersión de contaminantes y la evaluación de los parámetros hidrodinámicos en la parte media y baja del río, así como el cálculo del índice de calidad de agua; para lograr una caracterización completa y proponer estrategias de reducción de la contaminación.

CONTENIDO

ÍNDICE DE MAPAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
NOMENCLATURA	xvi
GLOSARIO	xviii
I. GENERALIDADES.....	1
I.1. GENERALIDADES DE CUENCAS, SUBCUENCAS Y RÍOS.....	1
I.1.1. CUENCA	1
I.1.1.1. ELEMENTOS DE UNA CUENCA.....	1
I.1.1.2. PARTES DE UNA CUENCA	2
I.1.2. SUBCUENCA.....	3
I.1.3. RÍOS Y CORRIENTES SUPERFICIALES DE AGUA.....	4
I.1.3.1. PARTES DE UN RIO	4
I.1.3.2. CLASIFICACIÓN DE RÍOS SEGÚN PERÍODO DE ACTIVIDAD	5
I.1.3.3. CLASIFICACIÓN DE RÍOS SEGÚN GEOMORFOLOGÍA	6
I.1.4. GENERALIDADES DE RÍOS EN EL SALVADOR	6
I.1.4.1. CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	8
I.1.5. SUBCUENCA DEL RIO SUQUIAPA.....	10
I.1.5.1. USOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SUQUIAPA.....	13
a) Generación de energía hidroeléctrica.....	13
b) Distrito de riego de Atiocoyo	14
c) Turismo.....	15
d) Acuicultura	16
e) Distribución de agua.....	16
I.2. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS	17
I.2.1. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL.....	17
I.2.2. SOLUCIONES PARA FLUJO PERMANENTE.....	19
I.2.2.1. FLUJO UNIFORME.....	19
I.3. FENÓMENOS DE TRANSPORTE.....	21
I.3.1. INTRODUCCIÓN	21

I.3.2.	ADVECCIÓN	21
I.3.3.	DIFUSIÓN.....	22
I.3.4.	DISPERSIÓN	23
I.3.5.	MODELOS DE DISPERSIÓN	25
I.3.6.	MODELO MATEMÁTICO DE SINGH Y BECK	26
I.4.	TÉCNICA DE TRAZADORES.....	28
I.4.1.	GENERALIDADES.....	28
I.4.2.	EL TRAZADOR IDEAL	29
I.4.3.	EL TRAZADOR REAL	29
I.4.4.	CLORURO DE SODIO COMO TRAZADOR.....	31
I.4.4.1.	PROPIEDADES QUÍMICAS DEL NaCl.....	32
I.5.	DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	34
I.5.1	INTRODUCCION	34
I.5.2	MEDICIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	36
I.5.3	CARACTERÍSTICAS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA	39
II.	METODOLOGÍA.....	43
II. 1.	PROTOCOLO DE AFORO POR VADEO	43
II.1.1.	EQUIPO DE TRABAJO	43
II.1.1.1.	MOLINETE.....	44
II.1.1.2	VARA DE VADEO	45
II.1.2.	PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN CON EL MOLINETE.....	45
II.1.3.	INTERFERENCIAS DEL MÉTODO	50
II.2.	PROTOCOLO DE TÉCNICA DE TRAZADORES	53
II.2.1.	ANÁLISIS DEL ÁREA DE ESTUDIO: ELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE INYECCIÓN Y MUESTREO.	53
II.2.1.1.	ELECCIÓN DEL TRAZADOR Y DE LA CANTIDAD A UTILIZAR	53
II.2.1.2.	ELECCIÓN DEL TIPO DE MUESTREO A REALIZAR	54
II.2.1.3.	PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.....	55
II.2.1.4.	INYECCIÓN DEL TRAZADOR	55
II.2.2.	MUESTREO Y TOMA DE DATOS: ADQUISICIÓN DE LA FUNCIÓN DE SALIDA.....	56
II.2.2.1.	RESULTADOS DEL ENSAYO: DETECCIÓN ANALÍTICA	57
II.2.4.	INTERFERENCIAS DEL MÉTODO	57

II.3. METODOLOGÍA DE CAMPO.....	59
III. CÁLCULOS ANALÍTICOS.....	66
III.1. CANTIDAD DE TRAZADOR A INYECTAR.	66
III.1.1. Curva de calibración teórica.....	66
III.1.2. Curva de calibración experimental.....	67
III.1.2.1. Calibración instrumental del equipo.....	68
III.1.3. Solubilidad práctica.	73
III.2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.....	75
III.2.1. Descripción de la pantalla y el teclado.....	75
III.2.2. Procedimiento de medición.....	76
III.2.3. Procedimiento de Calibración.....	76
IV. TABULACIÓN DE DATOS Y CÁLCULOS.....	79
IV.1. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO	78
IV.1.1. TABULACION DE DATOS.....	78
IV.1.2. Cálculos De Aforo Por vadeo.....	79
IV.2. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN.....	81
IV.2.1. Tratamiento previo de datos.....	81
IV.2.1. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE FISCHER.....	90
IV.2.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE LA ECUACIÓN DE SINGH Y BECK.....	93
IV.2.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE FOGLER.....	95
IV.2.3.1. Cálculos en Punto de detección 1.....	95
Punto de detección 1.....	95
IV.2.3.2. CÁLCULOS EN PUNTO DE DETECCIÓN 2.....	100
Cálculo del caudal mediante integración física.....	105
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	107
V.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS OBTENIDOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO.....	106
V.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE EL ESTUDIO DE TRAZADORES.....	112
V.2.1. RESULTADOS OBTENIDOS CON MÉTODO DE FOGLER.....	112
V.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS CON ECUACIÓN DE SINGH Y BECK.....	114

V.2.3. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE FOGLER Y ECUACIÓN DE SINGH Y BECK	114
V.3: PARÁMETROS DE CAMPO RECOLECTADOS	115
ANEXOS.....	125
ANEXO A: MOLINETE HIDROMÉTRICO	124
A.1. MANTENIMIENTO DEL MOLINETE	124
A.1.1. Desmontaje del molinete.....	124
A.1.2. Pruebas de Giro.....	124
A.2.3. Limpieza y Engrasado Rutinario de Molinetes.....	125
ANEXO B: CONDUCTIVIDAD Y SALINIDAD EN LOS ECOSISTEMAS.....	128
ANEXO C: FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL CLORURO DE SODIODE ACUERDO EL REGLAMENTO (CE) NO. 1907/2006	130
ANEXO D: DATOS RECOLECTADOS EN LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO.....	138
D.1. HOJAS DE CÁLCULO DE AFOROS POR VADEO.....	158
ANEXO E. FICHAS DE LOS SITIOS	178
ANEXO G: HOJA DE CÁLCULO DE ECUACIÓN DE SINGH Y BECK.....	198

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa I.1: Regiones Hidrográficas de El Salvador.....	7
Mapa I.2 Región A: Río Lempa.....	8
Mapa I.3: Mapa de Índice de Calidad de Agua de Ríos de El Salvador.....	10
Mapa I.4: Ríos de la Sub cuenca del Río Suquiapa.....	11
Mapa I.5. Resultados de la Distribución del ICA en la Subcuenca del Río Suquiapa.....	12
Mapa I.6: Mapa de Fuentes Contaminantes de las Subcuencas de los Ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa.....	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1. Esquematización de una cuenca.....	1
Figura I-2. Tipificación de una cuenca.....	3
Figura I-3. Esquema de una subcuenca.....	3
Figura I-4. Tramos característicos en el desarrollo de un río.....	5
Figura I-5: Imágenes de Parque Acuático Las Cascadas.....	15
Figura I-6: Piscina artesanal dentro de Hacienda San Francisco.....	16
Figura I-7. Volumen de control para balance de masa unidimensional.....	17
Figura I-8. Flujo uniforme.....	20
Figura I-9: Difusión de una gota de contaminante en agua.....	22
Figura I-10. Esquema del movimiento de difusión turbulenta.....	23
Figura I-11. Esquema del movimiento de dispersión.....	24
Figura I-12. Transporte de un contaminante considerado en una dimensión.	25
Figura I-13. Curvas típicas de concentración vs. tiempo a la entrada y salida de reactores arbitrarios en inyección por pulso y por escalón.....	38
Figura I-14: Curva de función acumulativa $F(t)$	39
Figura II-1: Molinete tipo Price AA.....	43
Figura II-2: Componentes del molinete tipo Price AA.....	45
Figura II-3: Técnica para la medición de la sección transversal.....	47
Figura II.4: Imagen satelital del tramo de la parte alta del río Suquiapa.....	61
Figura II.5: Esquema de sitios (No a escala).....	62

Figura II.6: Imagen satelital de recorrido del experimento de trazadores.....	63
Figura III-1: Curva de calibración teórica.....	67
Figura III-2: Recolección de agua en sitio A12SUQUI.....	68
Figura III-3: Medición de las masas de cloruro de sodio a utilizar para obtener la curva de calibración.....	71
Figura III-4: Obtención de datos del equipo multiparámetro.....	71
Figura III-5: Gráfico de dispersión y de línea de tendencia de curva de calibración.....	73
Figura III-6: Descripción de pantalla y teclado de equipo multiparámetro.....	75
Figura IV-1: Gráfico de dispersión de datos recolectados en el punto de detección 1.....	83
Figura IV-2: Gráfico de dispersión utilizando la curva de calibración experimental del punto de detección 1.....	87
Figura IV-3: Gráfica de dispersión utilizando la curva de calibración experimental para el punto detector 2.....	90
Figura IV-4: Curvas de medición y modelado para la generación de datos del punto detector 2 utilizando la ecuación de Singh y Beck (Curva de calibración experimental, ppm).....	94
Figura IV-5: Gráfico de la regresión y datos de dispersión obtenidos para la curva de detección 1.	95
Figura IV-6: Gráfico de error residual para la regresión obtenida en el punto de detección 1.....	97
Figura IV-7: Gráfico de Probabilidad normal residual para la regresión obtenida para el punto de detección 1.....	97
Figura IV-8: Gráfico de la regresión obtenida para los datos del punto detector 2.....	101
Figura IV-9: Gráfico de error residual para la regresión obtenida para el punto detector 2.....	102
Figura IV-10: Gráfico de probabilidad normal residual para la regresión obtenida para el punto detector 2.....	102

Figura V-1: Distribución de caudales a lo largo del río principal.....	106
Figura V-2: Gráfico de dispersión de valores de la velocidad media a lo largo del río principal.....	107
Figura V-3: Gráfico de dispersión de los valores del ancho de la sección a lo largo del río principal.	108
Figura V-4: Gráfico de dispersión de los valores de perímetro mojado a lo largo del río principal.....	108
Figura V-5: Gráfico de dispersión de los valores de radio hidráulico a lo largo del río principal.....	109
Figura V-6: Gráfico de dispersión de valores de profundidad a lo largo del río principal.....	110
Figura V-7: Gráfico de profundidad sitio A12SUQUI.....	110
Figura V-8: Gráfico de profundidad sitio A14SUQUI.....	111
Figura V-9: Gráfico de profundidad sitio A18SUQUI.....	111
Figura V-10: Gráfico de dispersión de valores de coeficiente de dispersión mediante el método de Fischer a lo largo del río principal.....	112
Figura V-11: Gráfico de curva de modelados obtenidos mediante Ecuación de Singh y Beck y Fogler respecto a la curva de datos experimentales.....	115
Figura V-12: Gráfica de temperatura medida a lo largo del río principal.....	116
Figura V-13: Gráfica de pH medido a lo largo del río principal.....	116
Figura V-14: Valores de porcentaje de Oxígeno Disuelto a lo largo del río principal.....	117
Figura V-15: Valores de concentración de oxígeno registrado a lo largo del río principal.....	117
Figura V-16: Valores de conductividad registrados en los sitios a lo largo del río principal.....	118
Figura V-17: Valores de Sólidos disueltos Totales registrados en los sitios a lo largo del río principal.....	118
Figura B.1: Curva Salinidad-Conductividad de la sal.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1: Regiones Hidrográficas de El Salvador.....	7
Tabla I.2: Centrales hidroeléctricas en la parte alta del río Suquiapa.....	14
Tabla I.3: Resumen de conceptos aplicados.....	20
Tabla I.4. Propiedades Físicas y Químicas Generales del Cloruro de Sodio.....	32
Tabla I.5. Solubilidad de Cloruro de sodio a diferentes temperaturas.....	33
Tabla II-1: Sitios a aforar en la técnica de aforo por vadeo.....	59
Tabla II.2: Identificación de sitios para la técnica de aforo químico.....	63
Tabla II-3: Resumen de actividades de acampo para la realización del aforo químico.....	65
Tabla III-1.: Procedimiento estándar para preparación de soluciones calibradoras de conductividad con KCl.....	69
Tabla III-2.: Soluciones estándar de calibración.....	71
Tabla III-3: Datos recolectados en el laboratorio de concentración vs.conductividad.....	72
Tabla III-4: Solubilidades prácticas del Río Suquiapa (gramos de sal agregados).....	74
Tabla III-5: Calibración de parámetros en el equipo multiparámetro.....	76
Tabla IV-1 Aforos y mediciones realizadas en el tramo de estudio.....	78
Tabla IV-2: Hoja de cálculo utilizada para realizar los cálculos del aforo por vadeo.....	79
Tabla IV-3: Resultados de cálculo de parámetros hidrodinámicos obtenidos por medio de la técnica de aforo por vadeo.....	80
Tabla IV-4: Técnicas utilizadas para la evaluación del coeficiente de dispersión.....	81
Tabla IV.5: Datos recolectados en el punto de detección 1.....	82
Tabla IV-6: Tratamiento de datos del punto de detección 1.....	84
Tabla IV-7: Datos recolectados en el punto de detección 2.....	88

Tabla IV-8: Procedimiento general del cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal según ecuación empírica de Fischer.....	91
Tabla IV-9: Valores obtenidos con ecuación de Singh y Beck para la generación de una curva modelada para el detector 2.....	95
Tabla IV-10: Valores de las variables de regresión para la curva concentración-tiempo en el punto de detección 1.....	96
Tabla IV-11: Valores de las variables de regresión para la curva de Distribución de Tiempos de Residencia para el punto detector 1.....	99
Tabla IV-12: Valores de las variables de regresión para la curva Concentración-tiempo para el punto detector 2.....	101
Tabla IV-13: Valores de las variables de regresión para la curva de distribución de tiempos de residencia del punto detector 2.....	103
Tabla V-1: Tabla resumen de parámetros hidrodinámicos obtenidos mediante el método de Fogler.....	112
Tabla V-2: Resumen de parámetros hidrodinámicos obtenidos por medio de la ecuación de Singh y Beck.....	114
TABLA B.1 Bandas de confianza (95%) estimadas para la salinidad (g/L) a partir de valores de conductividad en el intervalo de 1 a 100 mS/cm.....	129

NOMENCLATURA

MARN	Ministerio de medio ambiente y recursos naturales.
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales, hasta 2006.
DGOA	Dirección General de Observatorio Ambiental, antes SNET a partir de 2007.
ICA	Índice de calidad del agua.
DBO5	Demanda biológica de oxígeno medido cinco días después de reacción.
Kjeldahl	Proceso de análisis químico para determinar el contenido en nitrógeno de una sustancia química y se engloba en la categoría de medios por digestión húmeda.
J	Densidad de flujo [M/L^2T].
C	Concentración del químico [M/L^3].
v	Velocidad del fluido [L/T].
D	Coefficiente de transporte de masa de Fick [L^2/T].
C	Concentración del elemento o compuesto químico [M/L^3].
x	Distancia sobre la cual se consideran cambios en la concentración [L].
∇	Operador gradiente.
C_0	Concentración inicial del contaminante, que permanece constante.
$C(x,t)$	Concentración a una distancia x transcurrido un tiempo t.
D^*	Coefficiente de difusión efectiva.
erfc	Función error complementaria.
D_{se}	Coefficiente de dispersión mecánica [L^2/T].
α	Dispersividad dinámica.

D_L, D_T	Coeficiente de dispersión hidrodinámica (longitudinal, transversal) [L^2/T].
α_L, α_T	Coeficiente de dispersividad dinámica (longitudinal, transversal).
Pe	Número de Peclet.
q_i	Descarga en la subsección.
V_i	Velocidad promedio de la subsección.
d	Distancia de la subsección al punto del inicio del aforo.
p_i	Profundidad de cada subsección.

GLOSARIO

- **Coefficiente de dispersión:** El coeficiente de dispersión se puede determinar efectuando un experimento de pulso de trazador. Aquí se mide la concentración en el efluente del tramo de estudio en función del tiempo. Con base en los datos de concentración en el efluente, se calcula el tiempo de residencia medio y la varianza, y luego se usan estos valores para determinar D_a . Para lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$D_a = \frac{\partial^2 C_T}{\partial z^2} - \frac{\partial(UC_T)}{\partial z} = \frac{\partial C_T}{\partial t}$$

- **Coliformes fecales:** La denominación genérica coliformes designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos.
Coliforme significa *con forma de coli*, refiriéndose a la bacteria principal del grupo, la *Escherichiacoli*. Las bacterias coliformes fecales forman parte del total del grupo coliforme. Son definidas como bacilos gram-negativos, no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas. La mayor especie en el grupo de coliforme fecal es el *Escherichiacoli*. La presencia de coliformes en el suministro de agua es un indicio de que el suministro de agua puede estar contaminado con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo.
- **Conductimetría:** Es un método analítico basado en la conducción eléctrica de los iones en solución, que se utiliza para medir la molaridad de una disolución, determinada por su carga iónica, o salina, de gran movilidad entre dos puntos de diferente potencial. La conductividad eléctrica es un fenómeno de transporte en el cual la carga eléctrica (en forma de electrones o iones) se mueve a través de un sistema. Se fundamenta en la Ley de Ohm.

- **Cuenca hidrográfica:** Es el territorio drenado por un único sistema principal de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas.
- **Curva de distribución de los tiempos de residencia:** Esta distribución representa la función de densidad de probabilidad que tiene una molécula de agua trazada de residir en el sistema un tiempo comprendido entre t y $t+dt$.
- **Dispersión hidrodinámica:** Es la acción conjunta de la difusión y la dispersión mecánica; ambos fenómenos no pueden considerarse aisladamente.
- **Dispersión mecánica:** La dispersión mecánica es la provocada por el movimiento del fluido a través del medio poroso. Esta dispersión se produce en el sentido del flujo longitudinal y transversal.
- **Ley de Fick:** En situaciones en las que existen gradientes de concentración de una sustancia, o de temperatura, se produce un flujo de partículas o de calor que tiende a homogeneizar la disolución y uniformizar la concentración o la temperatura. El flujo que homogeneiza es una consecuencia estadística del movimiento azaroso de las partículas que da lugar al segundo principio de la termodinámica, conocido también como movimiento térmico casual de las partículas. Así los procesos físicos de difusión pueden ser vistos como procesos físicos o termodinámicos irreversibles.
- **Método de trazadores:** Técnica para obtener información sobre un sistema o sobre alguna parte de un sistema, mediante la observación del comportamiento de una sustancia específica, el trazador, que ha sido añadido al sistema.
- **Molinete:** Es un instrumento utilizado para medir la velocidad de un flujo de agua. El principio de operación de este instrumento está basado en la proporcionalidad entre la velocidad del agua y la velocidad angular resultante del rotor del molinete. Se puede

determinar la velocidad en un punto colocando el molinete en tal punto de la corriente y contando el número de revoluciones del rotor durante un período de tiempo.

- **Multiplicidad de un río:** factor utilizado para la clasificación de los ríos según su geomorfología, y depende del número de barras que divide la corriente en varios brazos.
- **Nitrógeno total Kjeldahl:** Se usa para determinar tanto las formas orgánicas como inorgánicas de nitrógeno. Refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminas, etc.) y el ion amonio NH_4^+ . También se utiliza para determinar proteínas en alimentos. El principio básico consiste en la mineralización de sulfato de amonio, a partir del cual se libera el amonio, que se destila y determina a continuación mediante una valoración.
- **Número de Peclet:** Es un cociente definido como:

$$Pe = \frac{\text{Velocidad de transporte por convección}}{\text{Velocidad de transporte por difusión o dispersión}} = \frac{UL}{D_a}$$

Donde L es el término de longitud característica y el término U es la velocidad superficial. Sirve para describir la significancia de la dispersión molecular sobre la dispersión mecánica y viceversa.

- **Oxígeno disuelto:** Es el más importante agente oxidante del agua natural. Cuando actúa químicamente, cada uno de sus átomos constituyentes se reducen desde un estado de oxidación 0 hasta -2 del H_2O o del OH^- , dependiendo de si la reacción tiene lugar en agua ácida o básica, respectivamente, aunque sólo este último caso debe de tenerse en cuenta para el caso de aguas naturales, cuyos valores de pH varían entre 7 y 8. Se expresa en partes por millón (ppm).
- **Sinuosidad de un río:** es el índice que representa cuanto el trazado del río se aparta de una línea recta. Se mide por la relación entre la distancia que separa dos puntos a lo largo de la parte más profunda del cauce, o thalweg y la distancia en línea recta entre ellos. Un cauce en línea recta tiene una sinuosidad de 1.0,1 mientras que se describen los ríos como meándricos cuando la sinuosidad es mayor de 1.5.

- **Subcuenca:** Es un área considerada como una subdivisión de la cuenca hidrológica que presenta características particulares de escurrimiento y extensión.

- **Técnica de aforo por vadeo:** Método que se utiliza para determinar el caudal de ríos que poseen poca profundidad y velocidad, y casi siempre en canales y acequias. El equipo utilizado normalmente es un molinete suspendido por una barra. El método es muy recomendado ya que permite que el operador o aforador, una vez que identificó el punto de medición, pueda recorrer y detectar cualquier cambio del fondo con detalle, aunque el agua sea turbia.

- **Tiempo de residencia:** Es el tiempo necesario para procesar un volumen de reactor de líquido basado en las condiciones de entrada.

- **Tortuosidad:** Es la relación entre la longitud de la trayectoria real seguida por una partícula y la línea que une los puntos de inicio y final de dicha trayectoria suponiendo un medio homogéneo.

- **Transporte advectivo:** Se refiere a la entrada o salida de la sustancia desde el volumen elemental de control con la velocidad de la corriente.

- **Transporte difusivo:** Se refiere a la entrada o salida de sustancia debido al efecto combinado de la difusión molecular y la difusión turbulenta.

- **Trazador:** Aditivo incorporado a la masa de un determinado producto para estudiar su comportamiento en un proceso físico o químico. En hidrología se utilizan trazadores para estudiar el comportamiento del agua durante alguna fase del ciclo hidrológico o en relación con problemas concretos derivados de su uso y aprovechamiento. Los problemas relacionados con contaminación de aguas superficiales y subterráneas han sido la causa principal de la intensificación de uso de trazadores durante los últimos años.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

I.1. GENERALIDADES DE CUENCAS, SUBCUENCAS Y RÍOS

I.1.1. CUENCA

Se entiende por cuenca hidrográfica o cuenca de drenaje el territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas.

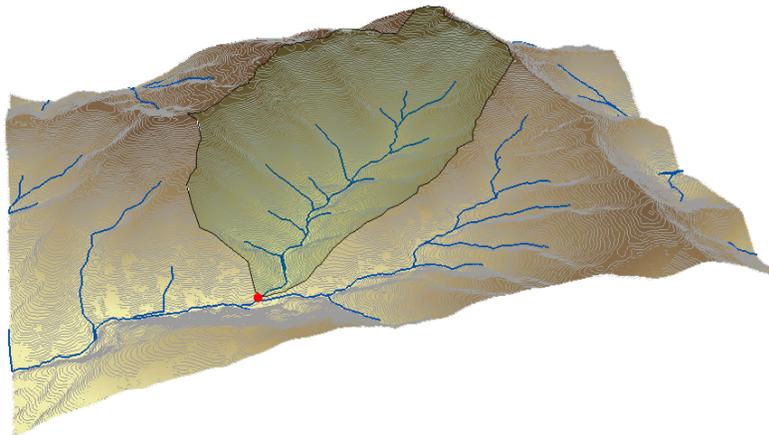


Figura I-1. Esquematización de una cuenca

Fuente: www.acolita.com

I.1.1.1. ELEMENTOS DE UNA CUENCA

En una cuenca identificamos los siguientes elementos (Figura I-1):

El río principal: El río principal suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua o bien con mayor longitud o mayor área de drenaje. Actúa como el único colector de las aguas. El curso del río principal es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura.

Los afluentes: Son los ríos secundarios que desaguan en el río principal. Cada afluente tiene su respectiva cuenca, denominada subcuenca.

Línea divisoria de aguas: es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una línea divisoria de aguas marca el límite entre una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas.

El relieve de la cuenca: consta de los valles principales y secundarios, con las formas de relieve mayores y menores y la red fluvial que conforma una cuenca. Está formado por las montañas y sus flancos; por las quebradas o torrentes, valles y mesetas.

Las obras humanas: Las obras construidas por el ser humano, también denominadas intervenciones antropogénicas, suelen ser: viviendas, ciudades, campos de cultivo, obras para riego y energía, y vías de comunicación.

I.1.1.2. PARTES DE UNA CUENCA

Una cuenca está compuesta de tres partes:

Cuenca alta: corresponde a la zona donde nace el río. Está caracterizado por erosión e incisiones verticales. El material de fondo consiste de rocas y piedras. Se trata de pequeñas corrientes de agua con altas velocidades de flujo.

Cuenca media, la parte de la cuenca en la cual hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale. Visiblemente no hay erosión. Puede presentar brazos entrelazados y tramos meandrosos. La aparición de entrelazamiento o meandros depende de la pendiente del río, el material de fondo y la descarga a curso lleno. Generalmente, los brazos entrelazados tienen fondos de grava, mientras que los canales meandrosos presentan fondos de arena.

Cuenca baja, la parte de la cuenca en la cual el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de deyección. Puede formarse un delta por sedimentación de limos. Cerca de la boca del río el flujo está alterado por las mareas provenientes del mar.



Figura I-2. Tipificación de una cuenca

Fuente: elearning.semarnat.gob.mx/cte

I.1.2. SUBCUENCA

Área considerada como una subdivisión de la cuenca hidrológica que presentacaracterísticas particulares de escurrimiento y extensión.

Generalmente su escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de unaserie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia un determinado punto deun curso de agua (generalmente un lago o una confluencia de ríos). (Ver figura I-3)



Figura I-3. Esquema de una subcuenca.

Fuente: www.cuencaamanalcovalle.org/imagenes/general

I.1.3. RÍOS Y CORRIENTES SUPERFICIALES DE AGUA

Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado, rara vez constante a lo largo del año, y desemboca en el mar, en un lago o en otro río, en cuyo caso se denomina afluente. La parte final de un río es su desembocadura.

Los ríos transportan agua y sedimento desde las áreas de captación hasta el mar. El curso y la forma del fondo del río resultan de una interacción entre el agua y el sedimento.

I.1.3.1. PARTES DE UN RÍO

Un río está compuesto por varias partes básicas. Por lo general, los más grandes, se dividen en tres partes principales, de acuerdo con su capacidad erosiva y de transporte de sedimentos (figura I-4)

Curso superior: generalmente, esta parte de los ríos coincide con las áreas montañosas de una cuenca determinada. Está caracterizado por erosión e incisiones verticales. El material de fondo consiste de rocas y piedras. Se trata de pequeñas corrientes de agua con altas velocidades de flujo.

Curso medio: generalmente, en el curso medio de un río suelen alternarse las áreas o zonas donde el río erosiona y donde deposita parte de sus sedimentos, lo cual se debe, principalmente, a las fluctuaciones de la pendiente y a la influencia que reciben con respecto al caudal y sedimentos de sus afluentes. Puede presentar brazos entrelazados y tramos meandrosos. La aparición de entrelazamiento o meandros depende de la pendiente del río, el material de fondo y la descarga a curso lleno. Generalmente, los brazos entrelazados tienen fondos de grava, mientras que los canales meandrosos presentan fondos de arena.

Curso inferior: en las partes en donde el río fluye en áreas relativamente planas, se suelen formar meandros o lagos en herradura. Al fluir el río, acarrea grandes cantidades de sedimentos, los que pueden dar origen a islas sedimentarias, llamadas deltas y también puede ocasionar la elevación del cauce por encima del nivel de la llanura, por lo que muchos ríos suelen discurrir paralelos al mismo.

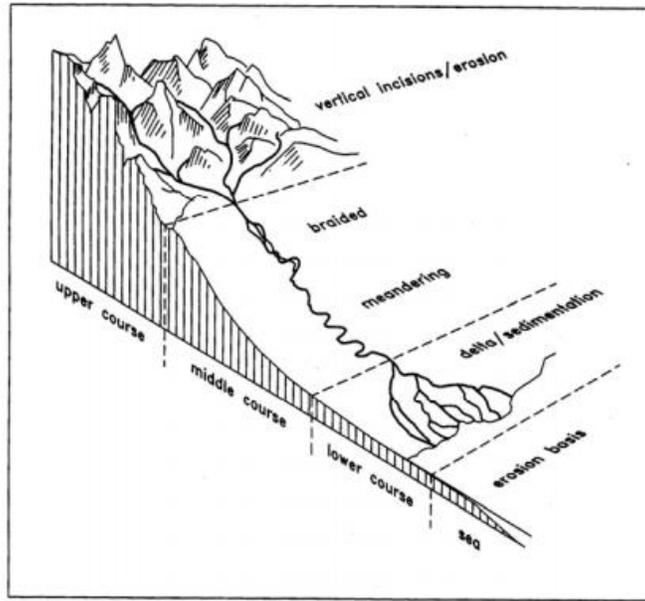


Figura I-4. Tramos característicos en el desarrollo de un río.

Fuente: http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/utn/Apunte_TyDCMA.pdf

1.1.3.2. CLASIFICACIÓN DE RÍOS SEGÚN PERÍODO DE ACTIVIDAD

Según el periodo de actividad los ríos se pueden clasificar en:

Perennes: estos ríos están formados por cursos de agua localizados en regiones de lluvias abundantes con escasas fluctuaciones a lo largo del año. Sin embargo, incluso en las áreas donde llueve muy poco pueden existir ríos con caudal permanente si existe una alimentación freática (es decir, de aguas subterráneas) suficiente.

Estacionales: estos ríos y ramblas son de zonas con clima tipo mediterráneo, en donde hay estaciones muy diferenciadas, con inviernos húmedos y veranos secos o viceversa. Suelen darse más en zonas de montaña que en las zonas de llanura.

Transitorios: son los ríos de zonas con clima desértico o seco, de caudal esporádico. Esto es debido a la poca frecuencia de las tormentas en zonas de clima de desierto. Pero cuando existen descargas de tormenta, que muchas veces son torrenciales, los ríos surgen rápidamente y a gran velocidad.

Alóctonos: son ríos, generalmente de zonas áridas, cuyas aguas proceden de otras regiones más lluviosas.

I.1.3.3. CLASIFICACIÓN DE RÍOS SEGÚN GEOMORFOLOGÍA

Según la geomorfología en planta que adopta la corriente, se pueden clasificar los ríos en tres tipos básicos: rectilíneo, meándrico, y anastomosado. Los parámetros utilizados para esta clasificación son la sinuosidad y multiplicidad. Esta última depende del número de barras que divide la corriente en varios brazos.

Rectilíneo: estas corrientes se caracterizan por una sinuosidad baja (menor a 1,5) y multiplicidad 1, es decir, un único canal. Son muy inestables, tendiendo a evolucionar a otros tipos de río. Tienen caudal de alta energía y gran capacidad erosiva.

Anastomosado: estas corrientes presentan canales múltiples. Tienen gran capacidad de transporte y sedimentación. Tienen menor energía que las corrientes rectilíneas, por lo que, al encontrarse con obstáculos, tienden a modificar su trayectoria adecuándose al relieve y a los sedimentos en el fondo del cauce, siendo la deposición en el fondo de sedimentos de granulometría heterogénea.

Meándrico: este tipo de río tiene sinuosidad alta (mayor a 1,5) y canal único. Su característica principal es la unidad geométrica llamada meandro, curva completa sobre el canal, compuesto por dos arcos sucesivos.

I.1.4. GENERALIDADES DE RÍOS EN EL SALVADOR

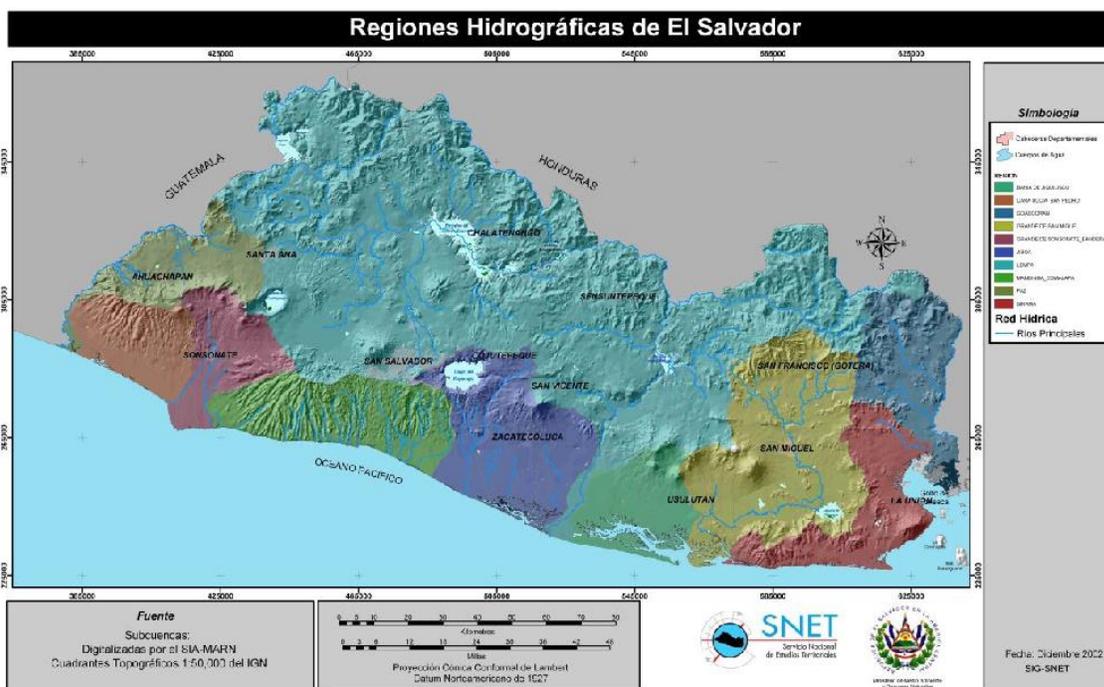
El Salvador posee 360 ríos que drenan el territorio nacional; el más importante de estos, es el Río Lempa, que produce el 72 % de la disponibilidad del recurso agua en El Salvador, siendo sus principales tributarios el Río Acelhuate, Río Sucio, Río Torola, Río Sumpul y Río Suquiapa. El segundo en importancia es el Río Grande de San Miguel, el cual se origina en el departamento de Morazán, atravesando los departamentos de San Miguel y Usulután; produciendo una escorrentía total por año de 6.54 %.

Las regiones hidrográficas de El Salvador, se determinan por medio de la delimitación de las cuencas de los principales ríos del país, según el Plan Maestro Hídrico de 1982 (PNUD, 1982), se han establecido 10 regiones hidrográficas y se identifican por el nombre de los principales ríos.

Tabla I.1: Regiones Hidrográficas de El Salvador. Fuente: Clasificación de Ríos por Cuencas Hidrográficas de El Salvador, CA. MAG, 2012.

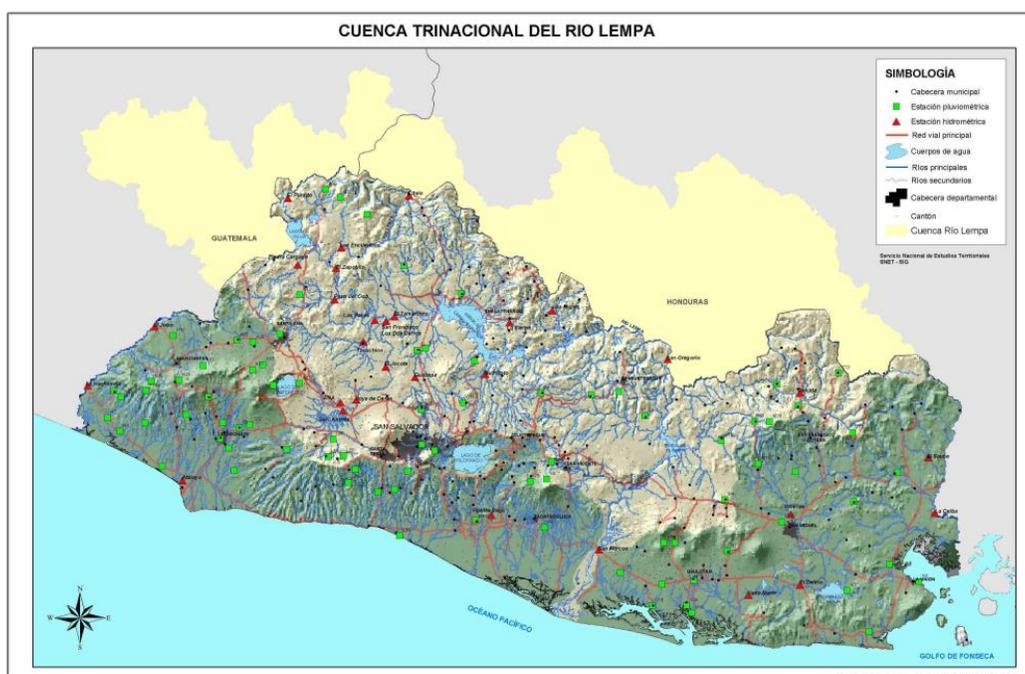
Regiones Hidrográficas de El Salvador		
1	Región A	Río Lempa
2	Región B	Río Paz
3	Región C	Río Carasucia
4	Región D	Río Grande de Sonsonate
5	Región E	Río Mandinga
6	Región F	Río Jiboa
7	Región G	Estero de Jaltepeque
8	Región H	Bahía de Jiquilisco
9	Región I	Río Grande de San Miguel
10	Región J	Río Sirama

Mapa I.1: Regiones Hidrográficas de El Salvador. Fuente: SNET/MARN, 2002.



Dentro de estas regiones, se pueden mencionar la región A como una de las más importantes ya que es la más grande, cuya parte alta de la cuenca cubre territorio de Honduras y Guatemala, en total son 18,246 Km², casi un 49 % del territorio nacional, dentro de la cuenca están núcleos poblacionales importantes como el de las áreas metropolitanas de San Salvador y Santa Ana.

Mapa I.2 Región A: Río Lempa. Fuente: SNET



I.1.4.1. CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La contaminación de los recursos hídricos superficiales en El Salvador está relacionada directamente al desarrollo poblacional, industrial y agrícola de las regiones.

A continuación se detalla los tipos de contaminación más usuales de los recursos hídricos:

A. Contaminación agrícola

La contaminación agrícola es una fuente de contaminación no localizada, o nopuntual, por lo que resulta más difícil controlarla y darle seguimiento para su tratamiento. En general los contaminantes agrícolas más significativos son tres:

- Los sedimentos producidos por la erosión, que acarrearán las diversas sustancias químicas que se han absorbido.
- La pesada carga de nutrientes, sobre todo en nitrógeno y en fósforo procedente de la fertilización de cultivos o de áreas de crianza de animales.
- Los pesticidas, aunado a estos está el alto nivel de agentes patógenos en las masas de aguas superficiales.

B. Contaminación de origen doméstico

Las aguas servidas domésticas son una mezcla de residuos que incluyen sustancias presentes en el excremento humano, es decir, una mezcla de compuestos orgánicos y minerales no disueltos en solución acuosa. Los compuestos orgánicos son las grasas, jabones, proteínas, glúcidos y los compuestos provenientes de la descomposición, detergentes, aceites minerales y otros desperdicios de origen animal y vegetal.

C. Contaminación de origen industrial

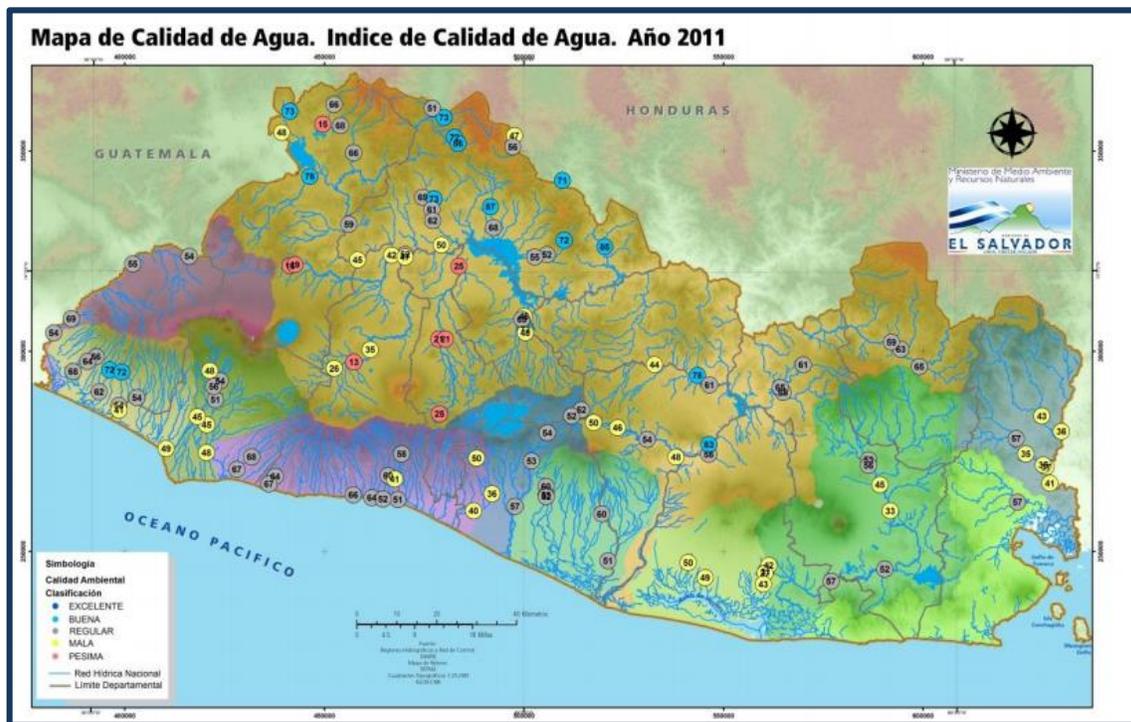
Los contaminantes contenidos en aguas de origen industrial son innumerables dependiendo del tipo de producción. En general, la contaminación puede ser debida a materia inorgánica que se encuentra en suspensión y en solución, y también, a sustancias orgánicas como los desechos químicos fenólicos, orgánicos fermentables y desechos tóxicos. Los detergentes contenidos en las aguas naturales provienen en su mayoría de descargas industriales.

En marzo del año 2011 el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales reportó que el 50% de 55 ríos evaluados en el país, presentaron calidad de agua “regular” desde el punto de vista ambiental, lo que sugiere que el 50% de los ríos del país no poseen aptitud para la fauna y flora acuática.

De este mismo informe, se destaca que solamente un 12% de los ríos evaluados presentaron calidad de agua “buena”, y 38% presentaron calidad entre “mala” y pésima”; entre éstos ríos se encuentra el río Suquiapa, como se puede observar en el Mapa I.3.

Según los resultados presentados en dicho informe, el 17% de los ríos evaluados poseen aptitud de agua cruda para potabilizar mediante métodos convencionales.

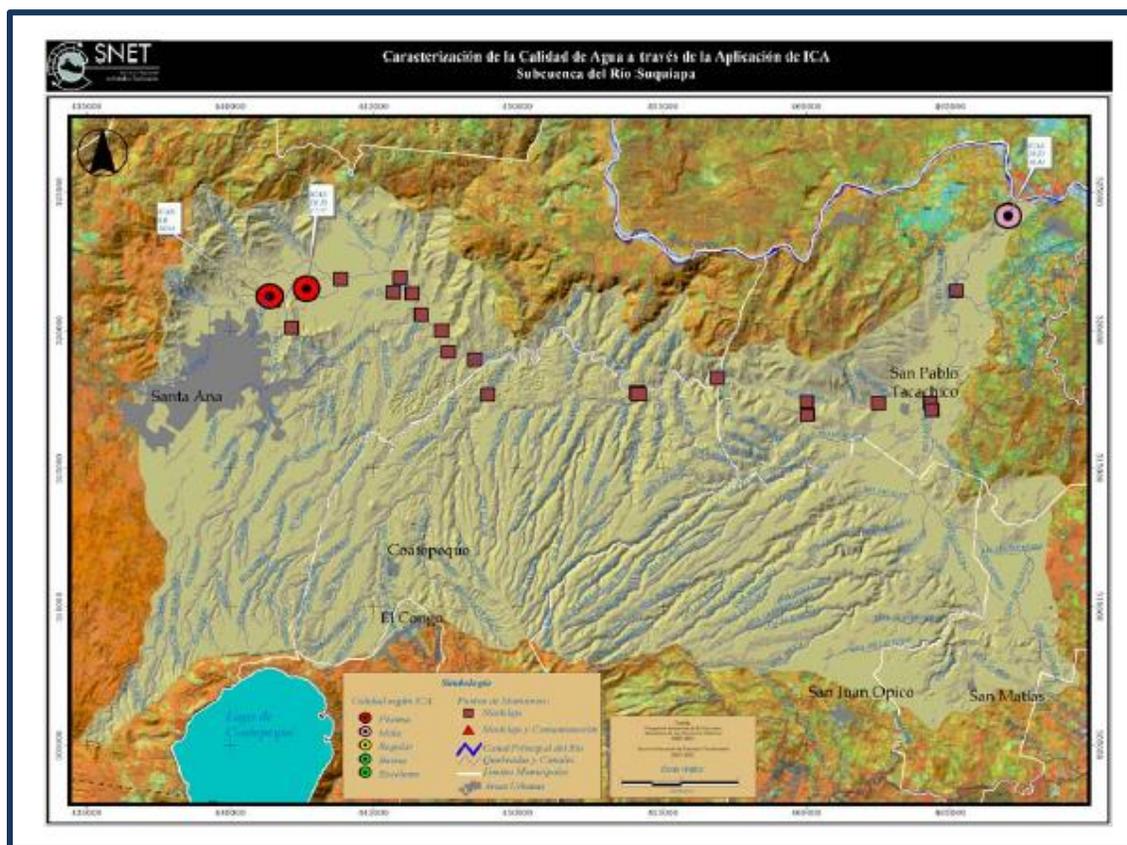
Mapa I.3: Mapa de Índice de Calidad de Agua de Ríos de El Salvador. Fuente: Informe de la Calidad de Agua de los Ríos de El Salvador. MARN. 2012.



I.1.5. SUBCUENCA DEL RIO SUQUIAPA

La subcuenca del río Suquiapa tiene un área de 425 Km², en el 21% de ésta área (88 km²) se encuentran localizadas las fuentes que contaminan el río principal y sus afluentes. La contaminación es producida principalmente por las descargas de aguas negras de las áreas urbanas, beneficios de café que aún descargan a los ríos (algunos sin darle tratamiento a sus aguas

Mapa I.5. Resultados de la Distribución del ICA en la Subcuenca del Río Suquiapa. Fuente: “Estrategias de descontaminación de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa”. SNET, 2002.



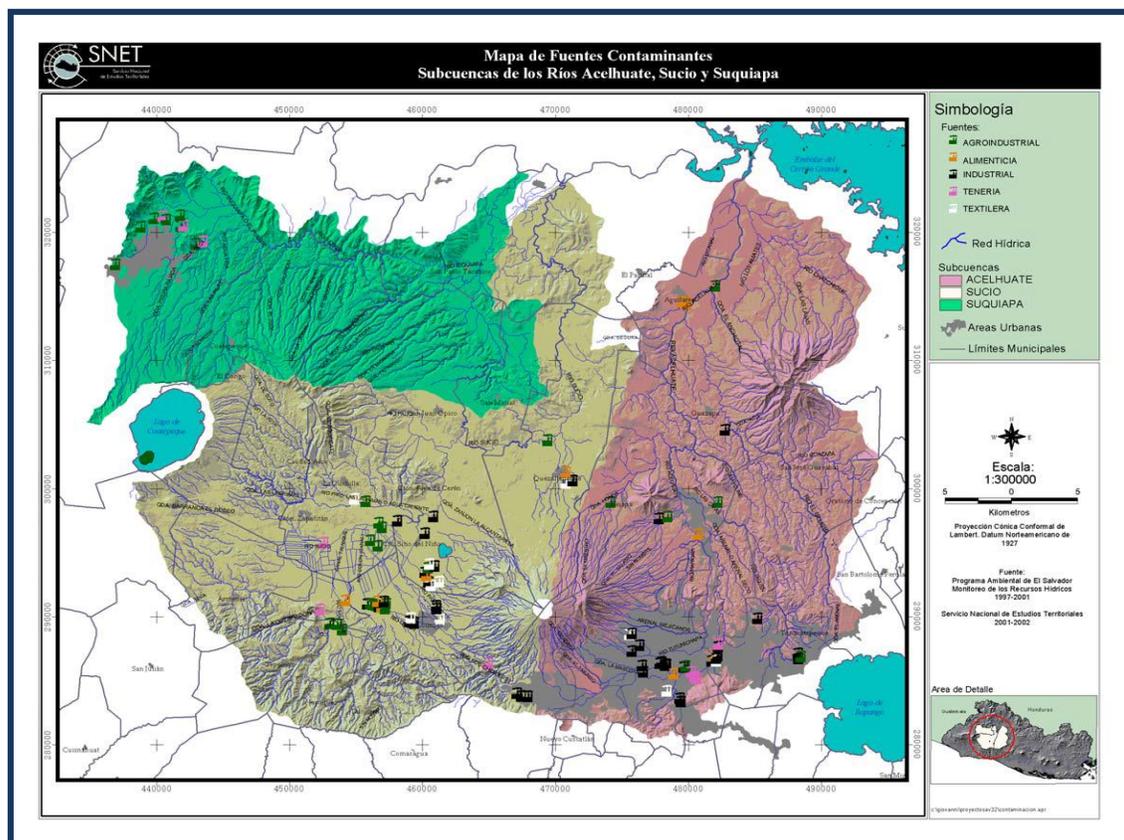
En el mapa I.5 se observa que el ICA en las puntos de control del nacimiento del Río Suquiapa, que corresponde a los ríos Sucio de Santa Ana y Aranchacal la calidad del agua es pésima debido a que los niveles de oxígeno disuelto, DBO5, coliformes fecales y nitrógeno total kjeldalh² son característicos de aguas contaminadas y en la estación que corresponde a la desembocadura del Río Suquiapa al Río Lempa, el agua presenta una mala calidad debido a los altos niveles de coliformes fecales y nitrógeno total kjeldalh producido probablemente por descargas no puntuales. Se observa que la contaminación del río Suquiapa se origina en la cabecera departamental por la descarga de aguas negras y vertidos agroindustriales sin tratamiento, este sufre un proceso de estabilización de la materia orgánica en los cuarenta kilómetros antes de la

²El Análisis de Nitrógeno Total de kjeldalh determina tanto las formas orgánicas como inorgánicas de nitrógeno. Refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminas, etc.) y el ion amonio NH₄⁺. También se utiliza para determinar proteínas en alimentos. El principio básico consiste en la mineralización de formar sulfato de amonio, a partir del cual se libera el amonio, que se destila y determina a continuación mediante una valoración.

desembocadura al Río Lempa. La contaminación por bacterias coliformes de origen fecal y nitrógeno total kjeldahl descargado por fuentes no puntuales, no permite que la ponderación del índice de calidad mejore suficientemente antes de desembocar al río Lempa (SNET, 2002)

Se puede observar en el mapa I.6, que la contaminación del Río Suquiapa se debe principalmente por tenerías y actividades agrícolas.

Mapa I.6: Mapa de Fuentes Contaminantes de las Subcuencas de los Ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa. Fuente: “Estrategias de descontaminación de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa”. SNET, 2002.



I.1.5.1. USOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SUQUIAPA

a) Generación de energía hidroeléctrica

La velocidad del cauce del río Suquiapa y de algunos de sus tributarios es utilizada para la producción de energía hidroeléctrica. A continuación se presentan las centrales instaladas y proyectos en curso utilizan el cauce del río Suquiapa.

Tabla I.2: Centrales hidroeléctricas en la parte alta del río Suquiapa. Fuente: “Proyectos de Energía Renovable, a través de la utilización del recurso hídrico”. El Salvador, Centroamérica. SIGET. <http://www.naruc.org/international/Documents/EL%20SALVADOR-%20Arias%20Illustrated%20RE%20SPANISH1.pdf>

Planta	Río utilizado	Potencia instalada (MW)
Central Hidroeléctrica Atehuesias	Río El Molino	0.60
Central Hidroeléctrica Cutumay Camones	Río El Sauce	0.40
Central Hidroeléctrica San Luis I	Río Suquiapa	0.63
Proyecto Hidroeléctrico San Luis II	Río Suquiapa	0.74

Entre las plantas hidroeléctricas instaladas se encuentra la Planta Hidroeléctrica San Luis N° 2, ubicada en la jurisdicción del cantón Nancintepeque. Esta mini central es administrada por la Compañía Eléctrica Cucumacayán, S.A. de C.V. (CECSA), permite una generación con dos unidades de 384 kW cada una. Esta mini central se encuentra cercana al sitio A18SUQUI que contempla este estudio.

b) Distrito de riego de Atiocoyo

Según la Ley de Creación del Distrito de Riego y Avenamiento N° 2 Atiocoyo, el Distrito será de una extensión superficial de cinco mil setecientos setenta hectáreas. Sus límites territoriales están comprendidos en jurisdicción de los Municipios de San Pablo Tacachico, en el Departamento de La Libertad, y Nueva Concepción y Agua Caliente, en el Departamento de Chalatenango. Comprende tres zonas de riego definidas así:

1ª) Atiocoyo; delimitada por la margen derecha del río Suquiapa, la línea ferroviaria San Salvador-Santa Ana, margen izquierda del río Sucio y la cota 285 msnm;

2ª) San Isidro; delimitada por la margen derecha del río Lempa, margen izquierdo del río Suquiapa y la cota 285 msnm;

3ª) Nueva Concepción; delimitada por la margen izquierda de los ríos Lempa y Jayuca y la cota 280 msnm.

Los principales cultivos de la zona son granos básicos, entre estos, arroz y maíz. También se cultivan cítricos, frutas y caña de azúcar.

c) Turismo

La zona cuenta con algunos balnearios cuyas aguas provienen de fuentes subterráneas y manantiales de la zona. Uno de los sitios turísticos más grandes, es el Balneario Las Cascadas: ubicado en las cercanías del Río Zarco, Hacienda San Cayetano, Lotificación Amayito.



Figura I-5: Imágenes de Parque Acuático Las Cascadas. Fuente: panoramio.com

Además, se pueden observar piscinas artesanales en haciendas privadas, tal como se muestra en la figura, que se utilizan para fines recreativos.

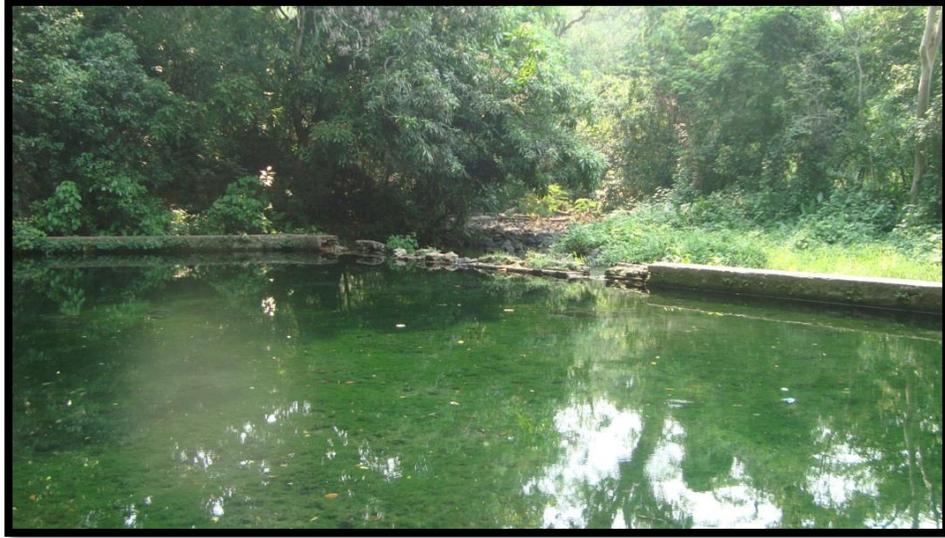


Figura I-6: Piscina artesanal dentro de Hacienda San Francisco.

d) Acuicultura

La crianza de tilapias es una actividad característica de la zona. El Comité Acuicultores de Atiocoyo utiliza recursos hídricos del Distrito de riego de Atiocoyo para fines de producción acuícola. También se encuentra el Beneficio El Sauce, donde se crían y venden tilapias.

e) Distribución de agua

Uno de los manantiales que alimentan la corriente principal del río Suquiapa, además de ser un espacio de recreación, también sirve como fuente de agua para sus hogares. Se ha formado una asociación comunal para mantener tal proyecto, distribuyendo de agua a aproximadamente 200 familias.

I.2. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS

I.2.1. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL

Cuando la escala espacial de análisis de la hidrodinámica de un río o un estuario es mucho mayor que su ancho y su profundidad, es suficiente y conveniente plantear las versiones de las ecuaciones de movimiento integradas en toda la sección transversal. Esto conduce a un modelo matemático unidimensional, en el cual los efectos de las escalas transversales de movimiento aparecen integrados y sólo se resuelven las escalas longitudinales largas.

Uno de los principios básicos de la hidrodinámica es la ley de conservación de la masa. Para deducir su versión unidimensional se utilizará la figura I-7, que muestra el esquema de un tramo de un curso superficial de agua. El tramo se caracteriza por presentar una dirección de movimiento bien definida, a lo largo de su cauce, que se identifica con la coordenada espacial x .

La entrada del tramo está caracterizada por una sección transversal de área $A(x, t)$ y un caudal $Q(x, t)$. La salida del tramo está ubicada a una distancia Δx de la entrada. Entre ambos extremos existe un aporte lateral, caracterizado por la descarga q por unidad de longitud.

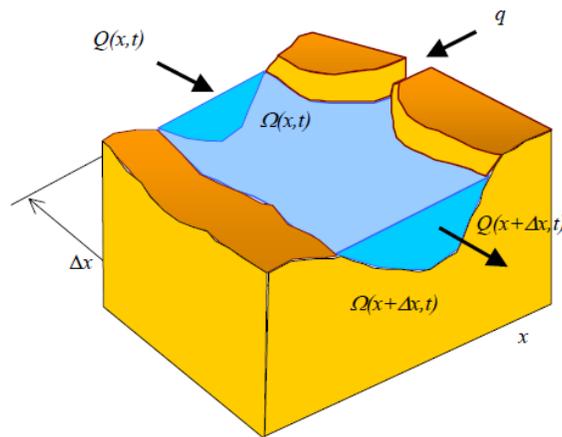


Figura I-7. Volumen de control para balance de masa unidimensional

Fuente: Transporte De Contaminantes En El Medio Acuático, Menéndez, Ángel, 2010

Estableciendo que la variación temporal del volumen de agua comprendido dentro del tramo durante un intervalo de tiempo Δt se debe al balance neto de los caudales entrantes y salientes del tramo, se obtiene:

$$[A(t + \Delta t) - A(t)]\Delta x = [Q(x) - Q(x + \Delta x)]\Delta t + q\Delta x\Delta t \quad \text{Ec. 1.1}$$

donde t es la coordenada temporal. Si en la ecuación (1.1) se toma el límite cuando Δt y Δx tienden a cero,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{Ec 1.2}$$

del mismo modo, el tramo de la figura 1.5 puede ser empleado para aplicar la ley de conservación de la cantidad de movimiento, que en su forma diferencial se expresa como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g I_f = -\frac{q}{A}(U - u_L) \quad \text{Ec 1.3}$$

donde $U = Q/A$ es la velocidad media de flujo, g la aceleración de la gravedad, $z = z_0 + h$ la cota de la superficie libre, con Z_0 la cota del fondo y h el tirante (profundidad del talweg), I_f la pendiente de fricción (representativa de la transferencia de energía mecánica desde el flujo medio hacia la turbulencia) y u_L la componente en la dirección x de la velocidad del aporte lateral.

El sistema de ecuaciones (1.2)-(1.3) se conoce como Ecuaciones de Saint-Venant y constituyen un modelo matemático unidimensional del flujo.

Sin embargo, para cerrar el sistema todavía debe proveerse una expresión para la pendiente de fricción. La forma habitual de parametrizarlo es la siguiente:

$$I_f = \frac{n^2 U^2}{R^{4/3}} \quad \text{Ec 1.4}$$

donde n es el coeficiente de fricción de Manning y $R = A/\chi$ el radio hidráulico, con χ el perímetro mojado.

I.2.2. SOLUCIONES PARA FLUJO PERMANENTE

Se considerarán a continuación algunas soluciones particulares de las ecuaciones de Saint-Venant para el caso estacionario, es decir, cuando

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 1.5}$$

En particular, se presenta la solución para el caso de un flujo uniforme en un río o canal. Además, se muestra la ecuación general resultante para el caso permanente, cuya integración conduce a la familia de curvas de remanso, soluciones aplicables en tramos de ríos o para el flujo de base de un estuario.

I.2.2.1. FLUJO UNIFORME

Suponiendo que no existen aportes laterales:

$$q = 0$$

que la pendiente del fondo es constante:

$$-\frac{\partial Z_0}{\partial x} \equiv I_0 = cte$$

y que las condiciones de flujo son uniformes:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

el sistema de ecuaciones de Saint Venant se reduce a la siguiente relación:

$$A^2 R^{4/3} = \frac{n^2 Q^2}{I_0} \quad \text{Ec. 1.6}$$

La ecuación (1.6) muestra que, para una pendiente y coeficiente de fricción dados, el caudal y la profundidad local del flujo se relacionan algebraicamente de una manera unívoca, es decir que, fijado uno, el otro queda completamente determinado.

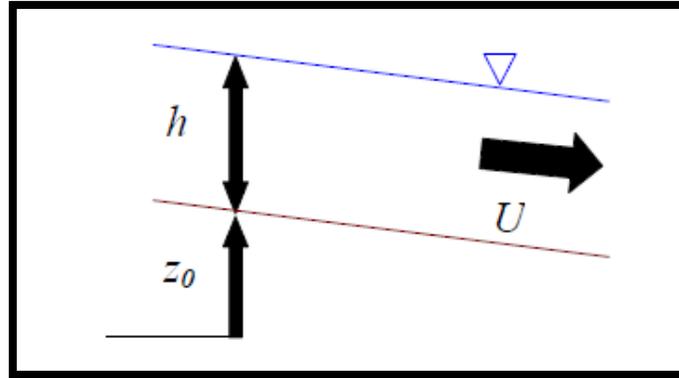


Figura I-8. Flujo uniforme.

Fuente: Transporte DeContaminantes EnEl Medio Acuático, Menéndez, Ángel, 2010

Tabla I.3: Resumen de conceptos aplicados.

Parámetro	Definición	Dimensiones
Nivel medio	Es la medida de la profundidad promedio a lo ancho del cauce. Se calcula como área/ancho de la sección.	L
Velocidad media	Describe la distancia en la que se desplaza un volumen de control de agua en unidad de tiempo. Se determina a partir de tablas de conversión adjuntas con el molinete.	L/T
Área mojada	Es la suma de las áreas parciales de las secciones a lo ancho del cauce.	L ²
Caudal	Describe la cantidad de agua en volumen que corre en unidad de tiempo. Este valor se determina con el área de la sección y la velocidad del flujo.	L ³ /T
Perímetro mojado	Representa la longitud que cubre el agua, es decir las dos profundidades de los lados más la longitud del ancho del cauce.	L
Radio Hidráulico	Es el cociente entre el área de la sección y el perímetro mojado.	L
Ancho del cauce	Es la medida de la longitud a lo ancho del cauce del río. Se mide con un lazo graduado o cinta métrica.	L
Coefficiente de dispersión	El coeficiente de dispersión se puede determinar con un experimento de pulso de trazador. Se mide la concentración en el efluente del tramo del sistema en estudio en función del tiempo. Con base en los datos de concentración, se calcula el tiempo de residencia medio y la varianza, y luego se usan estos valores para determinar D_a .	L ² /T

$$D_a = \frac{\partial^2 C_T}{\partial z^2} - \frac{\partial(UC_T)}{\partial z} = \frac{\partial C_T}{\partial t}$$

I.3. FENÓMENOS DE TRANSPORTE

I.3.1. INTRODUCCIÓN

El destino de los contaminantes en sistemas acuáticos está determinado por:

- El tipo y clase de fuentes externas.
- El transporte de las sustancias a través de los varios elementos del ciclo hidrológico.
- La transformación química, biológica o bioquímica de estas sustancias de una a otra forma.

La discusión de estos tres grupos de factores puede ser hecha de diferentes maneras, aunque siempre a través de generalizaciones más o menos esquemáticas, en parte debido a que la cantidad de sustancias contaminantes posibles en un cuerpo de agua es casi infinita. En efecto, basta con tener en cuenta que alrededor de cinco mil compuestos químicos nuevos son "inventados" anualmente, la mayoría de los cuales encuentra su camino hasta los recursos superficiales o sub-superficiales de agua (afectando, entonces, potencial o realmente formas de vida acuática y humana).

I.3.2. ADVECCIÓN

El transporte advectivo, concierne la entrada o salida de sustancia desde el volumen elemental de control con la velocidad de la corriente; 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.

De otra forma, es la transferencia de contaminantes con la misma velocidad y dirección con que se mueve el agua que los transporta. Es el principal mecanismo de tal manera que si se eliminan los otros procesos, el modelo casi no se altera.

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

$$J = C * v \text{ Ec. 1.7}$$

Donde:

- J: densidad de flujo [M/L²T].
- C: concentración del químico [M/L³].
- v: es la velocidad del fluido [L/T].

I.3.3. DIFUSIÓN

En este segundo tipo de proceso, el elemento químico se mueve desde un lugar donde su concentración es relativamente alta hacia otro donde es menor, por efecto de un movimiento aleatorio de las moléculas (*difusión molecular*), a un movimiento aleatorio del aire o agua que acarrea al elemento químico (*difusión turbulenta*) o por una combinación de ambos.

Si en un medio sin flujo depositamos una gota de contaminante en un punto y observamos un tiempo después, el punto inicial se ha ampliado y difuminado:



Figura I-9: Difusión de una gota de contaminante en agua.

La primera ley de Fick es usada para describir la densidad de flujo debido a difusión turbulenta (y también para difusión molecular), y se expresa, para una dimensión, como

$$J = -D(dC/dx) \text{ Ec. 1.8}$$

Donde:

J: densidad de flujo [M/L²T].

D: coeficiente de transporte de masa de Fick [L²/T].

C: concentración del elemento o compuesto químico [M/L³].

x: distancia sobre la cual se consideran cambios en la concentración [L].

La primera ley de Fick puede ser también expresada en 3 dimensiones usando notación vectorial en la forma $\vec{j} = D\nabla x$, donde ∇ es el operador gradiente y D es similar en todas las direcciones.

I.3.4. DISPERSIÓN

La mezcla de sustancias puede estar representada por tres procesos:

A. Difusión molecular: mezcla de químicos disueltos debido al movimiento al azar o aleatorio de las moléculas dentro del fluido. Causado por movimiento molecular vibracional, rotacional y trasversal.

En el movimiento de sustancias disueltas se mueven de regiones de altas concentraciones, a regiones de bajas concentraciones, de acuerdo a la ley de Fick de difusión.

Proceso lento: toma cerca de 10 días en disolver 1mg/L en una columna de agua de 10cm con una concentración original de 10mg/L

Observable en transporte de sustancias disueltas en la interface aire-agua a través de sedimentos porosos en agua.

B. Difusión Turbulenta

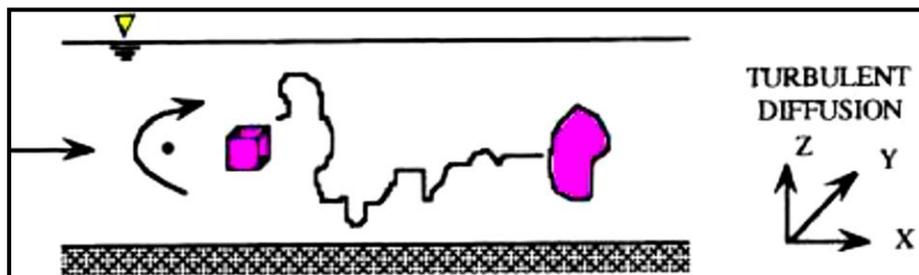


Figura I-10. Esquema del movimiento de difusión turbulenta

- Mezcla de sustancias particuladas finas debido a la turbulencia en micro escala.
- Causada por fuerza de rozamiento dentro del cuerpo de agua.

- Ordenación de magnitud mucho mayor que la difusión molecular y conlleva al proceso de dispersión.

C. Dispersión

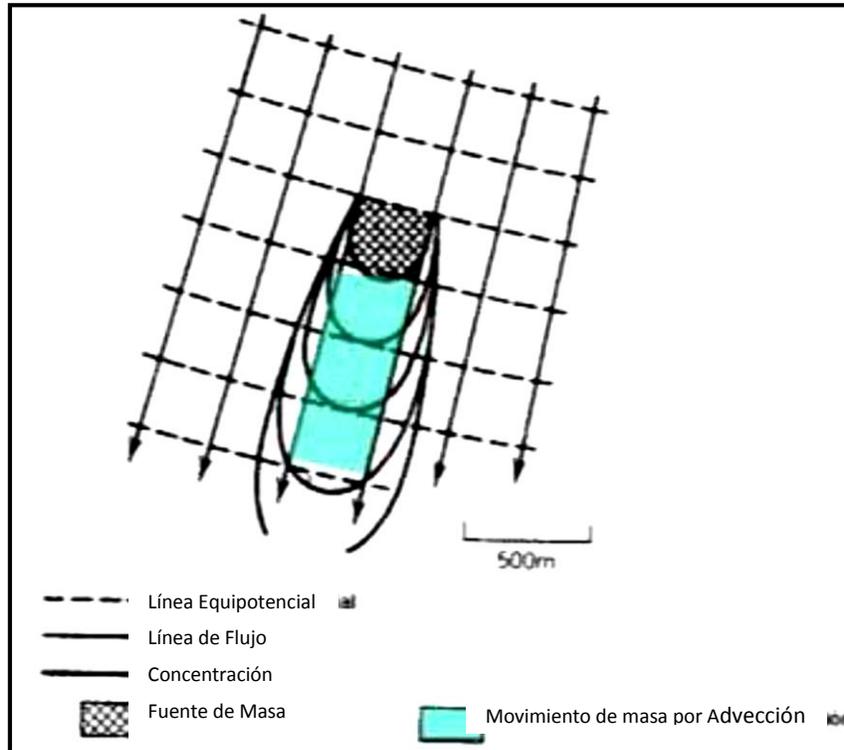


Figura I-11. Esquema del movimiento de dispersión

Es la interacción de difusión turbulenta con gradientes de velocidad ocasionados por fuerzas de fricción en el cuerpo de agua.

- Responsable de transporte de sustancias tóxicas en cuerpos de agua.
- Gradientes de velocidad causados por fuerzas de fricción en los límites del cuerpo de agua.
- Causados por rozamiento del viento en la interface aire-agua.
- Causados por rozamiento en interfaces sedimento de agua de bancos de agua.
- Causados por morfologías sinuosas de las corrientes.

En la fórmula (1.10) se veía una aproximación al cálculo del efecto de la difusión. La solución analítica considerando conjuntamente los efectos de la dispersión y la difusión en el transporte de

un contaminante es muy compleja. Una primera aproximación consiste en simplificar el problema a una dimensión

Si no existieran difusión ni dispersión, el tiempo de llegada podría calcularse conociendo la velocidad lineal media (velocidad Darcy/porosidad eficaz) y la longitud del recorrido (L); este tiempo se aprecia comparando los dos primeros gráficos de la figura I-12. En la realidad, debido al efecto de la dispersión hidrodinámica, la llegada es gradual como se muestra en el tercer gráfico.

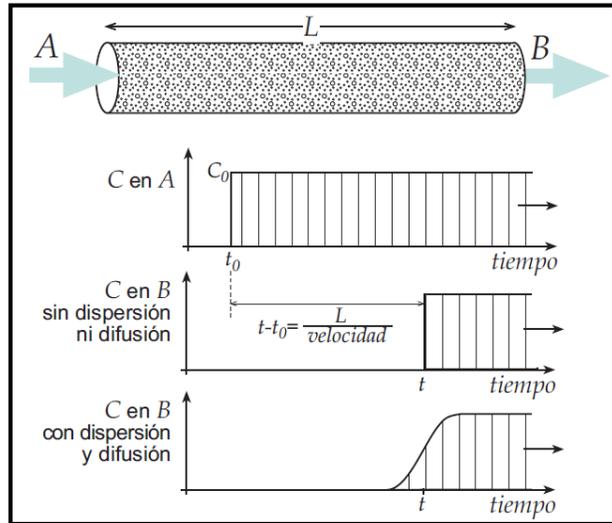


Figura I-12. Transporte de un contaminante considerado en una dimensión

I.3.5. MODELOS DE DISPERSIÓN

El coeficiente de dispersión se puede determinar efectuando un experimento de pulso de trazador. Aquí se mide la concentración en el efluente del tramo del sistema en estudio en función del tiempo. Con base en los datos de concentración en el efluente, se calcula el tiempo de residencia medio y la varianza, y luego se usan estos valores para determinar D_a . Para lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$D_a = \frac{\partial^2 C_T}{\partial z^2} - \frac{\partial(UC_T)}{\partial z} = \frac{\partial C_T}{\partial t} \quad \text{Ec. 1.11}$$

Se procede a expresar la ecuación en forma adimensional, para obtener el o los grupos adimensionales que caracterizan el proceso.

$$\Psi = \frac{C_T}{C_{T0}}, \lambda = \frac{z}{L} \text{ y } \theta = \frac{tU}{L} \quad \text{Ec. 1.12}$$

En el caso de una entrada de pulso, C_{T0} se define como la masa de trazador que se inyectó, M , dividida entre el volumen del recipiente, V entonces

$$\frac{D_a}{UL} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad \text{Ec. 1.13}$$

La cantidad UL/D_a es una forma del número de Peclet, Pe . Este número se puede ver como el cociente de:

$$Pe = \frac{\text{Velocidad de transporte por convección}}{\text{Velocidad de transporte por difusión o dispersión}} = \frac{UL}{D_a} \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde L es el término de longitud característica y el término U es la velocidad de tubo vacío o superficial.

- ❖ Para $Pe < 0.4$, la difusión molecular predomina sobre la dispersión mecánica.
- ❖ Para $0.4 < Pe < 5$, ambos efectos son del mismo orden de magnitud en la dirección del flujo.
- ❖ Para $5 < Pe < 100$, la dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo, pero la difusión molecular debe tomarse en cuenta por su efecto transversal.

I.3.6. MODELO MATEMÁTICO DE SINGH Y BECK

El coeficiente hidrodinámico de dispersión longitudinal, o mejor conocido como coeficiente de dispersión, incluye de forma indirecta efectos combinados de difusión molecular, mezclado por turbulencia y mezclado debido a fuerzas de cizalla verticales y transversales. Singh y Beck (2003) presentaron un método de optimización para la identificación del coeficiente de dispersión. La ecuación diferencial parcial que describe el transporte de solutos en una dimensión se puede expresar como:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad \text{Ec. 1.15}$$

Esta ecuación asume valores constantes para v y D , mezcla uniforme a través de la sección y densidades iguales, tanto para el agua como para el soluto.

La solución expresada en la ecuación 1.9 satisface las siguientes condiciones:

$$c(0, t) = c_0 \quad \text{Ec. 1.16a}$$

$$c(X, \infty) = 0 \text{ para } X > 0 \quad \text{Ec. 1.16b}$$

Tal solución se puede escribir de la siguiente forma obtenida por Ogata (1958):

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad \text{Ec. 1.17}$$

Donde $\operatorname{erfc}(\cdot)$ =función error complementaria, y se expresa como:

$$\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^y \exp(-z^2) dz \quad \text{Ec. 1.18}$$

Solución truncada: En el caso en el que la razón vx/D sea suficientemente grande ($vx/D > 100$); el segundo término del lado derecho de la ecuación es despreciable en comparación con el primero. Por esta razón se propone una alternativa a la ecuación anteriormente presentada:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \text{Ec. 1.19}$$

Para esta investigación se utilizará la ecuación 1.20:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad \text{Ec. 1.20}$$

I.4. TÉCNICA DE TRAZADORES

I.4.1. GENERALIDADES

El método de los trazadores es una técnica para obtener información sobre un sistema o sobre alguna parte de un sistema, mediante la observación del comportamiento de una sustancia específica, el trazador, que ha sido añadido al sistema.

A partir de esta definición es posible establecer el concepto de trazador:

El trazador es una sustancia específica que sirve para "marcar" o hacer más fácilmente identificable una fase específica o parte de un sistema denominado material marcado.

En general el principio básico del método de los trazadores es "marcar" una sustancia, un objeto o una fase, y después "seguirlo" a través del sistema, o llevar a cabo la determinación cuantitativa del mismo después que ha abandonado el sistema.

De lo descrito hasta el momento se puede concluir que un trazador debe cumplir como mínimo dos requisitos fundamentales:

- Comportarse similar o igual al material marcado.
- Tener por lo menos una propiedad que lo "distinga" del material marcado, de forma tal, que sea fácilmente detectable en presencia de otros materiales.

El trazador y el material marcado deben ser idénticos, pero al mismo tiempo el trazador debe diferenciarse por lo menos en alguna propiedad.

I.4.2. EL TRAZADOR IDEAL

Un trazador ideal será aquél que se mueva a la misma velocidad que el agua, de tal forma que permita determinar el mayor número de factores del flujo. Será por tanto necesario que cumpla las siguientes condiciones:

- Estabilidad química y biológica en el agua ensayada.
- Interacción nula así como no retención con el terreno; débil absorción y adsorción.
- Inalterabilidad del flujo superficial.
- Fácil detección cualitativa y cuantitativamente, incluso a baja concentración.
- Ausente en las aguas naturales o que se presente en bajas concentraciones.
- No toxicidad hacia los seres vivos.
- Facilidad en el transporte y manejo.
- Disponibilidad económica así como en el mercado.

I.4.3. EL TRAZADOR REAL

No existe ningún trazador que reúna todas estas condiciones de trazador ideal. Sin embargo, el conocimiento del comportamiento de los diferentes trazadores existentes puede permitir correcciones que hagan aprovechable la información que proporcionan. Cada trazador puede estar especialmente indicado para casos concretos, por lo que en la selección de un trazador determinado habrá que tener en cuenta una serie de principios técnicos, económicos, de disponibilidad y sanitarios que aconsejen su uso.

A continuación se dan algunas de las características más importantes de los trazadores reales más comúnmente utilizados, exceptuando isótopos naturales y radioisótopos artificiales:

A. Marcadores químicos solubles

Tipos:

- *Cloruro Sódico (NaCl)*. No es útil en aguas con elevado contenido natural. Se necesitan soluciones concentradas de mayor densidad que el agua natural, lo cual puede originar

molestias en el consumo, además de variaciones en las características de flujo. El análisis químico se puede realizar por conductimetría. En particular, este trazador posee las ventajas de no ser tóxico y ser muy asequible, sin embargo puede ser poco conveniente operacionalmente, ya que el transporte puede ser complicado (cientos de litros con algunos metros cúbicos de sal).

- *Cloruro Cálcico (CaCl₂)*. No utilizable en aguas naturales con importantes contenidos en cloro y calcio, lo cual es frecuente. Confieren mayor densidad y viscosidad al agua, variando por tanto las características del flujo. Interacciona con el terreno. Puede causar molestias en el consumo, si bien no es tóxico. Presenta una problemática similar al Cloruro Sódico.
- *Cloruro de Litio (CLi)*. El litio es fácil de determinar con precisión hasta 1 ppb con fotómetro de llama. El agua superficial presenta normalmente bajos contenidos en litio, lo cual presenta una ventaja con respecto a los trazadores antes mencionados. Interacciona con el terreno menos que la mayoría de los otros cationes utilizados. No tóxico a la concentración utilizada y fácil de adquirir.
- *Hidróxido de Litio monohidrato (LiOH.H₂O)*. No es tóxico. Se recomienda proteger los ojos en la preparación. Determinable por espectrometría de llama hasta 1 ppb. Útil principalmente en distancias cortas.
- *Ioduro Potásico (KI)*. La determinación de Iodo es dificultosa. Se recomienda proteger los ojos en la preparación. No es tóxico a las concentraciones utilizadas y su determinación mediante electrodo específico y comparación con estándares llega hasta 10 ppb. Relativamente inestable en el tiempo y a la luz. Produce un gusto desagradable.
- *Borax o Tetraborato de Sodio (B₄O₇Na₂ · 10H₂O)*. Es importante considerar que este compuesto se fija en la pared de las botellas de vidrio. El análisis por fotometría detecta valores hasta 0.1 ppm; si se efectúa el análisis por fluorescencia se puede detectar hasta niveles de 0.1 ppb. Es tóxico para vegetales. La relación sensibilidad-precio es elevada. El análisis es molesto y gravoso.

B. Trazadores químicos colorantes

Características generales: los trazadores químicos colorantes son fácilmente solubles, fácilmente detectables, visualmente, con fluorímetros o fotocolorímetros. Gran estructura molecular, lo que favorece su retención.

Tipos:

- *Uranina o fluoresceína disódica o fluoresceína soluble (C₂₀H₁₀O₄Na₂)*. Es el más utilizado. Presenta gran solubilidad y un poder colorante fuerte, de rojo a verde. Es detectable a bajas concentraciones, 0.01 ppm a simple vista y 0.002 ppm con fluoroscopia. Es fijado por sustancias orgánicas, carbonosas, arcillas y reacciona con el CO₂. Es destruido por la luz, algunas bacterias y óxido férrico. Su utilización fácil y su costo relativamente bajo. Puede ser adsorbido mediante fluorocaptadores de carbón activo, y posteriormente recuperado en una solución alcohólica de potasa. Inofensivo para la salud.
- *Rhodamina B (C₂₈H₃₁N₂O₃Cl)*. Posee un poder colorante fuerte, rojo-violeta. Se utiliza para aguas algo alcalinas. Es más estable que la fluoresceína a cambios de pH, también presenta más estabilidad frente a la luz y bacterias. Similar sensibilidad de detección. Muy sensible a las arcillas. Puede ser adsorbido a partir de carbón activo. Es tóxico, da lugar a nitrosaminas cancerígenas en presencia de nitritos. Relación calidad-precio similar a la uranina. Su uso debe ser restringido dada su toxicidad.
- *Rhodamina WT*. Similar al anterior, pero más estable debido a su menor sensibilidad frente a las arcillas y no toxicidad.
- *Eosina (2', 4', 5', 7-tetrabromofluoresceína, disódica, sal)*. Poder colorante fuerte, rojo. Utilizable en medios intersticiales y de fisuras. Presenta poca retención. Inestable a la luz. Tóxico en altas concentraciones. Caro. Se puede adsorber con carbón activo y posteriormente liberarlo con dimetilformamida (DMF). Detectable por espectrofluorimetría hasta 0.1 ppb y por cromatografía hasta 0,25 ppb.

Existen otros productos fluorescentes, con nombres comerciales propios de cada fabricante y de difícil identificación.

I.4.4. CLORURO DE SODIO COMO TRAZADOR

Entre las distintas sales utilizables la más común es el Cloruro de Sodio, debido a que es fácil de conseguir y es económicamente accesible. En general son más utilizadas para el método de inyección instantánea. El método de inyección constante con sal resulta muchas veces

impracticable debido a las grandes cantidades de sal que se deben manejar para poder hacer las experiencias.

La forma más común de medir la curva de respuesta de la sal en el cauce es a través del cambio en la conductividad eléctrica del agua a medida que la nube de trazador avanza con el flujo. Este aumento de la conductividad se mide con un conductímetro y, por medio de una curva de calibración, se pasa de conductividad en concentración.

I.4.4.1. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL NaCl

El cloruro de sodio, más conocido como sal de mesa, o en su forma mineral halita, es un compuesto químico con la fórmula NaCl. El cloruro de sodio es una de las sales responsable de la salinidad del océano y del fluido extracelular de muchos organismos. También es el mayor componente de la sal comestible, es comúnmente usada como condimento y conservante de comida.

Propiedades Químicas

El cloruro de sodio es un compuesto iónico formado por un catión sodio (Na^+) y un anión cloruro (Cl^-), y como tal, puede reaccionar para obtener cualquiera de estos dos iones.

Tabla I.4. Propiedades Físicas y Químicas Generales del Cloruro de Sodio.

General		General	
Nombre	Cloruro sódico	Termoquímica	
Fórmula química	NaCl	$\Delta fH_{0\text{gas}}$	-181,42 kJ/mol
Apariencia	sólido blanco o claro	$\Delta fH_{0\text{líquido}}$	-385,92 kJ/mol
Físicas		$\Delta fH_{0\text{sólido}}$	-411,12 kJ/mol
Peso molecular	58,4 uma	$S_{0\text{gas}, 1 \text{ bar}}$	229,79 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
Punto de fusión	1074 K (801 °C)	$S_{0\text{líquido}, 1 \text{ bar}}$	95,06 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
Punto de ebullición	1738 K (1465 °C)	$S_{0\text{sólido}}$	72,11 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
Densidad	2,2 ×10 ³ kg/m ³		
Estructura cristalina	f.c.c.		

Para mejor información sobre uso, precauciones, daños al medio ambiente, inflamabilidad, etc. Consultar la ficha de datos de seguridad en Anexo C

Tabla I.5. Solubilidad de Cloruro de sodio a diferentes temperaturas

Sustancia	0 C	10 C	20 C	30 C	40 C	50 C	60 C	70 C	80 C	90 C	100 C
Cloruro de Sodio	...	35.7	35.8	36	36.3	36.6	37	37.3	37.8	38.4	39.8

Fuente: Perry, Manual del Ingeniero Químico, Sexta edición (Tercera en español)

Esta tabla indica la cantidad de sustancia anhidra que es soluble en 100 g de agua a la temperatura indicada en grados centígrados.

I.5. DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA

I.5.1 INTRODUCCION

Para poder tener una idea más clara de lo que es el tiempo de residencia, se tiene que indagar primeramente en lo que es un reactor, un reactor ideal, así como los tipos que existen.

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleva cabo una o varias reacciones químicas.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

Existen varias formas de clasificar los reactores, ya sea por su modo de operación (continua o discontinua), según las fases que albergan (homogéneo o heterogéneo), así como por el tipo de flujo interno (ideales o no ideales).

Un reactor se considera un REACTOR IDEAL si:

1. Los reactantes están mezclados a la entrada del reactor, es decir, el tiempo de mezcla es cero y todo el volumen es útil para la reacción.
2. No se forman agregados moleculares
3. Se sigue un modelo de flujo ideal. El modelo de flujo tiene dos extremos de mezcla que representan la máxima mezcla posible y la inexistencia de la misma y que constituyen los dos modelos de flujo ideales posibles; los cuales se representan en el esquema siguiente:

- MEZCLA PERFECTA
 - En un sistema discontinuo: La mezcla del sistema es perfecta, muy buena, por lo que en un instante dado la composición y temperatura en el sistema son uniformes, pero variables con el tiempo.
 - En un sistema continuo: La mezcla del sistema es perfecta con lo que las propiedades (concentración y temperatura) de cualquier punto del sistema son las mismas, y por tanto iguales a las de la corriente de salida.

- FLUJO EN PISTÓN (TAMPÓN)
 - En un sistema continuo: En el sistema no hay ningún tipo de mezcla en la dirección del flujo, por lo que el fluido pasa sin mezclarse como si se moviera a lo largo del reactor impulsado por un pistón. Es decir, el perfil de velocidades es plano, lo cual sucede a números de Reynolds (Re) de tubo vacío relativamente altos. Puesto que hay mezcla completa en la dirección radial las propiedades del fluido en la sección son uniformes.

En un reactor ideal de flujo-tapón, todos los átomos de material que salen del reactor han estado dentro de él exactamente el mismo tiempo. De manera similar, en un reactor intermitente ideal, todos los átomos de material dentro del reactor han estado ahí un tiempo igual. El tiempo que los átomos pasan en el reactor se conoce como *tiempo de residencia* de los átomos en el reactor.

En todos los demás tipos de reactores (reactores no ideales), los diversos átomos de la alimentación pasan distinto tiempo dentro del reactor, es decir, hay una distribución de tiempos de residencia para el material en el interior del reactor.

La distribución de tiempos de residencia (DTR) de un reactor es una característica del mezclado que ocurre en dicho reactor químico. No hay mezclado axial en un reactor de flujo tapón, cuya omisión se refleja en la DTR. En el tanque de mezcla completa; la mezcla es completa; por lo tanto, presenta una DTR distinta respecto del reactor de flujo de tapón.

La distribución de tiempos de residencia en un reactor no ideal se podría explicar cómo una transformación de los datos recolectados en un experimento de trazadores; como se puede observar en la definición:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt}$$

La distribución de tiempos de residencia se puede interpretar como una normalización de los datos de concentración versus tiempo recolectados, ya que es un cociente entre la ecuación de datos de $C(t)$ sobre la sumatoria (integral) de estos. Por esta razón, la distribución cumple con la siguiente propiedad:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1$$

I.5.2 MEDICIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA

La DTR se determina experimentalmente inyectando una especie inerte, llamado trazador, tal como se explicó en el capítulo anterior (Véase I.4), al reactor en un tiempo $t = 0$ y después medir la concentración del trazador, en la corriente del efluente en función del tiempo

Los dos métodos de inyección más empleados son el de alimentación por pulso y el de alimentación por escalón.

Inyección por pulso

En una alimentación por pulso, se inyecta una cantidad de trazador N_0 de manera repentina como carga a la corriente de alimentación que entra al reactor en un tiempo breve, de forma que el tiempo de inyección no sea significativo respecto al tiempo de paso de la pluma.

Para la inyección de un pulso de trazador para un sistema de entrada y salida únicas, en el que sólo el flujo (es decir, no hay dispersión) lleva el material trazador a través de los límites del sistema, se elige un incremento de tiempo Δt suficientemente pequeño para que la concentración del trazador, $C(t)$, que sale entre el tiempo t y $t + \Delta t$, sea en esencia la misma.

La cantidad de material de marcador ΔN , que sale del reactor entre el tiempo t y $t + \Delta t$, por lo tanto,

$$\Delta N = C(t) \cdot v \cdot \Delta t \quad \text{Ec. 1.21}$$

Donde v es el flujo volumétrico del efluente. En otras palabras, ΔN es la masa de material que sale del reactor y ha pasado una cantidad de tiempo entre t y $t + \Delta t$ dentro del reactor. Si se divide entre la cantidad total de material inyectado al reactor, N_o , obtenemos

$$\frac{\Delta N}{N_o} = v \frac{C(t)}{N_o} \Delta t \quad \text{Ec. 1.22}$$

que representa la fracción del material que tiene un tiempo de residencia en el reactor entre t y $t + \Delta t$.

Para la inyección por pulso, definimos

$$E(t) = \frac{vC(t)}{N_o} \quad \text{Ec. 1.23}$$

De modo que

$$\frac{\Delta N}{N_o} = E(t) \Delta t \quad \text{Ec. 1.24}$$

La cantidad $E(t)$ se conoce como **función de la distribución de tiempos de residencia**. Es la función que describe de manera cuantitativa cuánto tiempo han pasado diferentes elementos del fluido dentro del reactor. La cantidad $E(t)dt$ es la fracción del fluido que sale del reactor, tras haber pasado un tiempo intermedio entre t y $t + dt$ dentro de él.

Si N_o se desconoce directamente, puede obtenerse de mediciones en la concentración a la salida sumando todas las cantidades del material, ΔN , entre el tiempo cero y el tiempo infinito. Al escribir la ecuación (1.21), de forma diferencial, se tiene

$$dN = vC(t)dt \quad \text{Ec. 1.25}$$

Al integrar, se obtiene:

$$N_o = \int_0^{\infty} vC(t)dt \quad \text{Ec. 1.26}$$

El flujo volumétrico, v , suele ser constante, de modo que podemos definir $E(t)$ como sigue:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad \text{Ec. 1.27}$$

La integral en el denominador es el área bajo la curva, C .

Otra forma de interpretar la función del tiempo de residencia es en su forma integral:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Fracción del material} \\ \text{que sale del reactor y} \\ \text{ha residido dentro de} \\ \text{el entre los tiempos } t_1 \text{ y } t_2 \end{array} \right] = \int_{t_1}^{t_2} E(t)dt \quad \text{Ec. 1.28}$$

Sabemos que la fracción de todo el material que ha residido un tiempo t en el reactor entre $t = 0$ Y $t = \infty$ es 1; por lo tanto,

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad \text{Ec. 1.29}$$

En la **figura I.13** se presenta se muestran las curvas típicas de concentración contra tiempo a la entrada y salida de reactores arbitrarios.

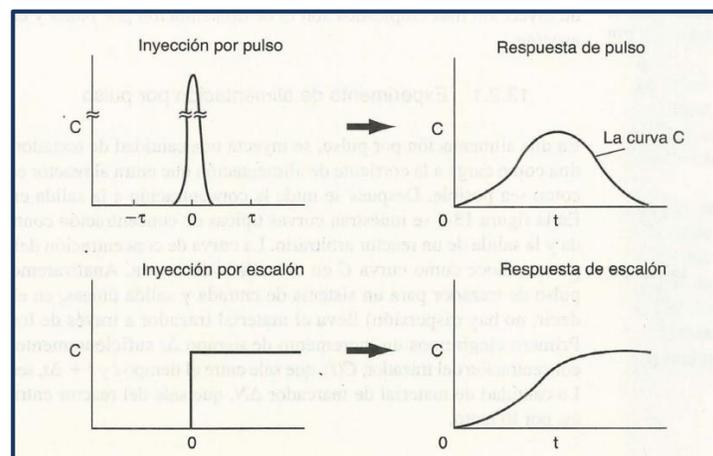


Figura I-13. Curvas típicas de concentración vs.tiempo a la entrada y salida de reactores arbitrarios en inyección por pulso y por escalón.

Inyección por escalón

La concentración de entrada a menudo adopta la forma de una alimentación por pulso perfecta (función delta de Dirac), una inyección por pulso imperfecta o una alimentación por escalón.

I.5.3 CARACTERÍSTICAS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA

En ocasiones $E(t)$ se denomina función de distribución de edades a la salida. Si consideramos la "edad" de un átomo como el tiempo que ha residido en el entorno de reacción, entonces $E(t)$ se refiere a la distribución de edades en la corriente del efluente.

I.5.3.1 RELACIONES INTEGRALES

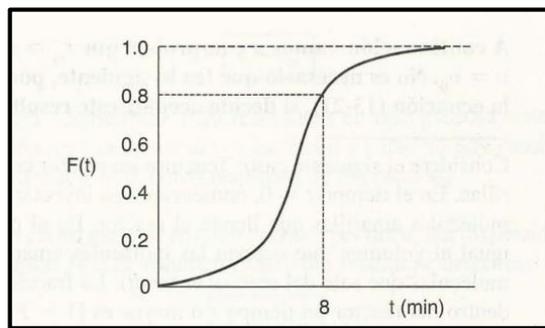


Figura I-14: Curva de función acumulativa $F(t)$

La fracción de la corriente de salida, que ha residido en el reactor un periodo más breve que un valor dado t , es igual a la suma de todos los tiempos inferiores a t de $E(t) dt$, o expresado de manera continua

$$\int_0^t E(t)dt = \left[\begin{array}{l} \text{Fracción de efluente} \\ \text{que ha estado en el} \\ \text{reactor un tiempo} \\ \text{menor a } t \end{array} \right] = F(t) \quad \text{Ec. 1.30}$$

De manera análoga,

$$\int_t^{\infty} E(t)dt = \left[\begin{array}{l} \text{Fracción de efluente} \\ \text{que ha estado en el} \\ \text{reactor un tiempo} \\ \text{mayor que } t \end{array} \right] = 1 - F(t) \quad \text{Ec. 1.31}$$

Danckwerts⁵ definió la ecuación 1.31 como una función de distribución acumulativa y la llamó $F(t)$. Podemos calcular $F(t)$ en diversos tiempos t mediante el área bajo la curva de una gráfica de $E(t)$ contra t .

1.5.3.2 TIEMPO MEDIO DE RESIDENCIA

En ausencia de dispersión, y para flujo volumétrico constante ($v = v_a$) sin importar qué tipo de DTR tenga un reactor en especial, ideal o no ideal, este tiempo espacial nominal, τ , es igual al tiempo medio de residencia, t_m .

Como en el caso de otras variables, descritas por funciones de distribución, el valor medio de la variable es igual al primer momento de la función de DTR, $E(t)$. Por lo tanto, el tiempo medio de residencia es

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad \text{Ec. 1.32}$$

Considere el siguiente caso: se tiene un tramo del sistema en estudio completamente lleno de moléculas amarillas.

En el tiempo $t = 0$, comenzamos a inyectar moléculas azules para reemplazar las moléculas amarillas que llenan el tramo. En el principio, el volumen del tramo V es igual al volumen que ocupan las moléculas amarillas. En el tiempo dt , el volumen de moléculas que sale del tramo es ($v dt$). La fracción de estas moléculas, que han estado dentro del tramo en estudio un tiempo t o mayor es $[1 - F(t)]$. Como sólo han estado moléculas amarillas en dicho tramo un tiempo t o mayor, el volumen de moléculas amarillas, dV , que sale del efluente en el tiempo dt , es

$$dV = vdt[1 - F(t)] \quad \text{Ec. 1.33}$$

Si a continuación sumamos todas las moléculas amarillas que han salido del tramo en el tiempo $0 < t < \infty$, tenemos

$$V = \int_0^{\infty} v[1 - F(t)]dt \quad \text{Ec. 1.34}$$

Como el flujo volumétrico es constante

$$V = v \int_0^{\infty} [1 - F(t)]dt \quad \text{Ec. 1.35}$$

Utilizando la integración por partes, se tiene

$$\int x dy = xy - \int y dx \quad \text{Ec. 1.36}$$

Y dividiendo entre el flujo volumétrico

$$\frac{V}{v} = t[1 - F(t)]|_0^{\infty} + \int_0^1 t dF \quad (1.37)$$

En $t=0$, $F(t)=0$; cuando $t \approx \infty$, entonces $[1 - F(t)] = 0$. El primer término del lado derecho es igual a cero y el segundo se transforma en

$$\frac{V}{v} = \tau = \int_0^1 t dF \quad (1.38)$$

Sin embargo, $dF = E(t) dt$; por lo tanto,

$$\tau = \int_0^{\infty} t E(t) dt \quad (1.39)$$

Por lo tanto

$$\tau = t_m \quad (1.40)$$

1.5.3.3 OTROS MOMENTOS DE LA DTR

Es muy común para comparar DTR emplear momentos, en lugar de intentar emplear toda la distribución. Para tal finalidad, se emplean normalmente tres momentos. El primero es el tiempo medio de residencia. El segundo momento, que se emplea de manera común, se toma en torno a la media y se llama varianza o cuadrado de la desviación estándar. Se define como sigue

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t) dt \quad (1.41)$$

La magnitud de este momento es una indicación de la "dispersión" de la distribución...

El tercer momento también se toma en torno a la media y se relaciona con la asimetría de la distribución, la cual se define como:

$$s^3 = \frac{1}{\sigma^{3/2}} \int_0^{\infty} (t - t_m)^3 E(t) dt \quad (1.42)$$

La magnitud de este momento mide el grado de asimetría de una distribución, en una dirección o en la otra, en referencia a la media.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

II. 1. PROTOCOLO DE AFORO POR VADEO

II.1.1. EQUIPO DE TRABAJO

A continuación se presenta una lista del equipo de trabajo necesario para la ejecución de la técnica de aforo por vadeo con molinete.

- Molinete o micromolinete.
- Barra o varilla sujetora de molinete graduada.
- Tornillo conector de la barra o varilla.
- Cables conectores.
- Caja contadora o emisor de impulsos.
- Lazo o cinta métrica.
- Trajes de Vadeo y/o Botas de hule.
- Tabla de velocidades del molinete a utilizar y su fórmula de transformación.
- Calculadora.
- Papel y lápiz.

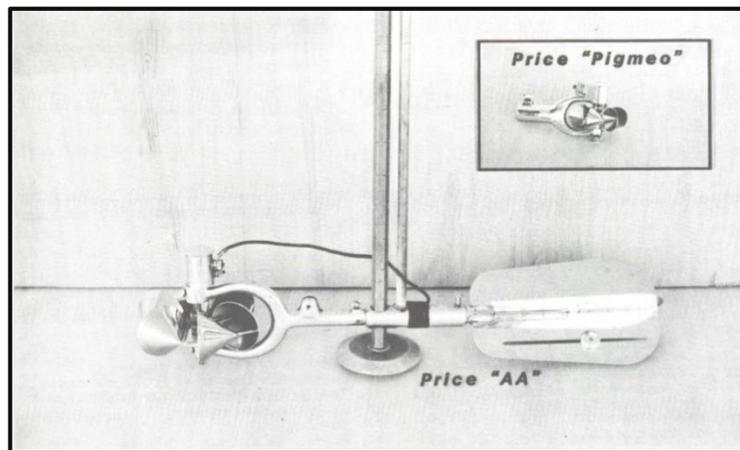


Figura II-1: Molinete tipo Price AA. Fuente: UnitedStates Geological Survey (1986) “Determinación de caudal y Técnicas de Muestreo en Agua Superficial” San Juan, Puerto Rico.

II.1.1.1. MOLINETE

El molinete utilizado es un molinete Gurley de la marca Ricky Hydrological Co.

Un molinete es un instrumento utilizado para medir la velocidad de un flujo de agua. El principio de operación de este instrumento está basado en la proporcionalidad entre la velocidad del agua y la velocidad angular resultante del rotor del molinete. Se puede determinar la velocidad en un punto colocando el molinete en tal punto de la corriente y contando el número de revoluciones del rotor durante un período de tiempo.

El molinete Price tipo AA es ligero, fuerte, preciso y durable. Mide con un alto grado de exactitud velocidades en el rango de 0.1 a 20 pies/segundo. Se repara fácilmente, y puede ser separado en sus partes rápidamente para su limpieza y engrasado; y puede ser armado rápidamente sin que existan cambios en las lecturas.

Se debe considerar que en el trabajo de campo, se debe tener gran cuidado mientras el instrumento se manipula, ya que un golpe podría deformar la estructura e incidir en las medidas de las revoluciones.

El número de revoluciones del rotor es obtenido mediante un circuito eléctrico en la cámara de contacto. Los puntos de contacto en la cámara están diseñados para completar un circuito eléctrico determinadas frecuencias de revolución. Las cámaras de contacto pueden ser seleccionadas teniendo puntos de contacto que pueden completar el circuito dos veces cada revolución, una vez por revolución, o una vez cada cinco revoluciones. El impulso eléctrico produce un clic audible en un audífono o registra una unidad en un dispositivo de conteo. Los intervalos de conteo son medidos con un cronómetro.

Para este caso de estudio se utilizará un molinete de eje horizontal.

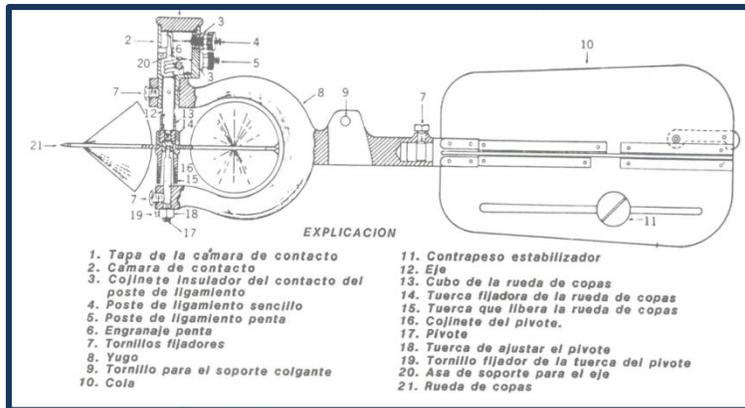


Figura II-2: Componentes del molinete tipo Price AA. Fuente:UnitedStates Geological Survey (1986) “Determinación de caudal y Técnicas de Muestreo en Agua Superficial” San Juan, Puerto Rico.

II.2.1.2 VARA DE VADEO

La vara posee una vara principal para medir la profundidad de ½ pulgada hexagonal y una vara deslizante de 3/8 de pulgada de diámetro para configurar la posición del molinete.

La vara es colocada en la corriente, de modo que a placa base descansa en el lecho de la corriente, y se pueda leer la profundidad del agua en la vara principal graduada. Cuando la vara de configuración está ajustada para leer la profundidad del agua, el molinete se posiciona automáticamente en el 60% de profundidad.

II.2.2. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN CON EL MOLINETE

El primer paso para realizar una medición con molinete es seleccionar una extensión de la corriente que contenga las siguientes características:

1. Un tramo recto con las curvas de velocidad paralelas entre ellas.
2. Un lecho de corriente estable libre de rocas, plantas y otras obstrucciones que puedan crear turbulencia.

3. Un perfil plano del lecho de la corriente para eliminar los componentes verticales de velocidad.

Generalmente, no es posible satisfacer todas estas condiciones. Seleccionar el mejor tramo posible utilizando estos criterios, y luego seleccionar una sección perpendicular.

1. Se selecciona el sitio de aforo. Los sitios seleccionados para las mediciones de caudal, a través de ésta técnica, deben tener las siguientes características:
 - Velocidades paralelas en todos los puntos y que formen ángulo recto con la sección transversal de la corriente;
 - Curvas regulares de distribución de velocidad en la sección, en los planos vertical y horizontal;
 - Velocidades suficientes para la utilización del molinete;
 - Lecho de la sección uniforme y estable;
 - Ausencia de plantas acuáticas u otros obstáculos
2. La primera actividad en campo a realizar es la limpieza de la sección de aforo, quitando cualquier obstáculo que dificulte la medida o que incidan en la velocidad o corriente normal del vertido, tales como: ramas, piedras, lama, maleza, etc.
3. Para medir el ancho de la sección de aforo determinada, se utilizará un lazo marcado o cinta métrica, sujetando dicho lazo en ambos márgenes de la corriente del vertido y se tensa lo más posible en forma transversal a la corriente.
4. Al realizar el proceso de medición del caudal se divide el ancho del río en un número determinado de tramos o verticales (10 mínimo según la tabla de verticales mínimas recomendadas por el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano).
5. Teniendo ya las verticales definidas donde se harán las mediciones, se procede a tomar las profundidades en cada una de ellas, comenzando la medición por el margen izquierdo,

viendo la corriente del vertido aguas abajo, puede suceder que en los márgenes la profundidad sea cero o diferente de cero.

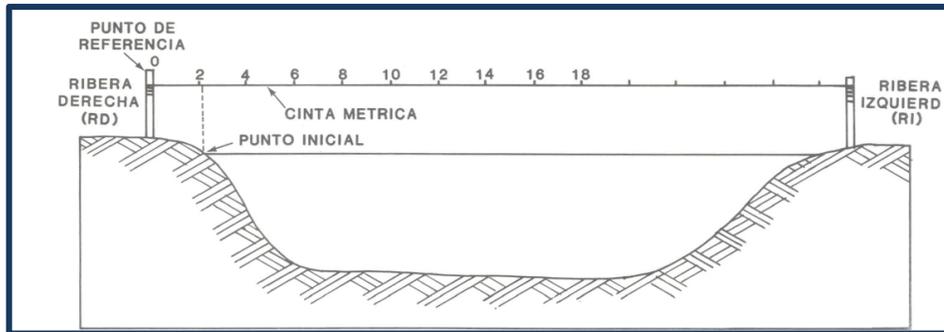


Figura II-3: Técnica para la medición de la sección transversal. Fuente:UnitedStates Geological Survey (1986) “Determinación de caudal y Técnicas de Muestreo en Agua Superficial” San Juan, Puerto Rico.

6. Debido a que la velocidad en la vertical cambia según su profundidad, se tomarán mediciones en distintos puntos de la vertical, usualmente estas profundidades son: al 20%, 60% y 80% de la superficie, cuando la profundidad lo requiera de acuerdo a los siguientes intervalos:

- Para profundidades menores de 24 cm, se usa el método superficial, es decir el molinete es colocado superficialmente.
- Cuando hay profundidades de 25 cm hasta 74 cm en la vertical, la velocidad del agua en la sección se mide colocando el molinete al 60% de profundidad desde la superficie.

El método de las 6 décimas se debe utilizar bajo las siguientes condiciones:

- a) Cuando la profundidad excede los 74 cm y el río transporta cerca de la superficie abrojos, troncos u otro material que impida observaciones a las 2 décimas debajo de la superficie.
- b) Cuando el nivel del río está cambiando rápidamente, y es necesario obtener la velocidad con rapidez.

7. Cuando existen profundidades mayores de 74 cm, se hacen mediciones de velocidad al 20% y 80% de la superficie en la vertical. Existe una regla general que puede utilizarse en el campo para determinar si la distribución de velocidad en la vertical es confiable. La velocidad a 2 décimas debe ser mayor que a 8 décimas, pero menos que dos veces a 8 décimas.
8. El eje horizontal del molinete no debe estar situado a menos de una vez o una vez y media de la altura del rotor con respecto a la superficie del agua, ni a menos de tres veces la altura del rotor desde el fondo del vertido.
9. Una vez que el molinete se haya colocado en el punto seleccionado de la vertical, se alineará en dirección de la corriente antes de comenzar las mediciones. La hélice comenzará a girar y se inicia el conteo de las vueltas (revoluciones) a través de una caja de contacto adaptada al cuerpo del molinete. Dicha caja proporciona automáticamente el número de revoluciones en un tiempo determinado, usualmente este tiempo es de 40 segundos.
10. Se repite el proceso de medición de la velocidad para las profundidades definidas y en todas las verticales a medir.
11. Cuando se está realizando la medición del caudal (aforo) se anotan los datos en un formato especial para el cálculo.
12. El resultado del aforo es la suma de las descargas individuales de cada subsección.

Para calcular descargas individuales en cada subsección se utiliza la fórmula general siguiente:

$$q_i = V_i \left[\frac{d_{(i+1)} - d_{(i-1)}}{2} \right] * P_i$$

q_i = descarga en la subsección.

V_i = Velocidad promedio de la subsección.

d = distancia de la subsección al punto del inicio del aforo.

pi= profundidad de cada subsección.

La velocidad promedio de la subsección, vendrá dada por la fórmula propia de cada molinete, la cual convierte los datos de giros/s de la hélice a m/s de la corriente, generalmente viene en forma de tablas de conversión. En las subsecciones en donde en una misma vertical se ha realizado más de una medición de giros/s se deberá de realizar un promedio aritmético para la subsección.

Para el molinete que se utilizará en este estudio, el medidor registra tanto el dato del número de revoluciones como el dato de la velocidad en diferentes dimensiones; o también se puede utilizar la ecuación:

$$V = R * 2.2048 + 0.0178$$

Siendo R el número de revoluciones por lapso de tiempo (40s)

El caudal de toda la sección se puede obtener como sigue:

$$Q = \sum q_i$$

NOTA: Para vertidos con columnas de agua entre (4 y 25 cms) se pueden realizar aforos a través de micromolinetes³ siguiendo los pasos del 1 al 11 del procedimiento normal con molinetes, a excepción del punto 6 del procedimiento anterior.

Desmontaje del molinete

En general, el desmontaje del molinete Price tipo AA no presenta dificultades, por lo que no se describirá en detalle. Sin embargo, se deben observar las siguientes precauciones:

³ Para micromolinetes de la serie AOTT C2 la profundidad mínima de agua para realizar mediciones es de 4 cm.; la velocidad mínima para realizar mediciones es de 0.025 m/s es decir aproximadamente 5 giros en 40 s. y un máximo de velocidad de 0.6290 m/s aproximadamente equivalente a 240 giros en 40 s.

1. La remoción de la cámara de contacto del yugo debe realizarse con cuidado y sin ejercer fuerza apreciable, de modo que el engrane y el eje no se dañen.
2. La tapa de la cámara de contacto no se debe destornillar nunca cuando el extremo superior del eje soporta forzosamente contra el lado posterior, una condición que existe si la tuerca que se está levantando en la rueda de canguilones ha sido previamente apretada, y si el ajuste del pivote se ha apretado tanto que no hay relación entre el extremo del eje y el lado posterior de la tapa.

Cuando la tuerca del canguilón que se levanta ha sido apretada, el extremo superior del eje soporta el lado posterior de la tapa, a tal punto que está aproximadamente a 3/16 de una pulgada fuera del centro, respecto al centro de la tapa. Si esas dos partes están en contacto cuando la capa se esté ya sea apretando o aflojando, ocurre una severa fuerza de doblez en el punto donde el extremo superior del eje emerge desde el cojinete superior. La falta de atención a esto es una causa común de “ejes curvos” en los molinetes tipo Price.

II.1.3. INTERFERENCIAS DEL MÉTODO

Cuando se miden velocidades se cometen errores de origen aleatorio o sistemático. Por consiguiente es conveniente determinar un orden de magnitud de este error de tal manera que se pueda estimar la incertidumbre total de la medición.

Los errores pueden ser debidos a alguno(s) de los siguientes aspectos:

- El flujo es inestable, es decir el nivel de agua cambia apreciablemente durante la medición
- El material en suspensión interfiere el molinete, distorsionando el valor de velocidad
- La dirección del flujo no es paralela a la hélice del molinete
- Se usa un molinete para medir velocidades que se encuentran fuera de su rango de calibración (en algunos casos se mide con molinetes que poseen dos curvas de calibración, y esta condición no se tiene en cuenta al momento de medir)
- Los equipos para la medición (tales como barras de vadeo o cables de suspensión) son diferentes a los usados durante la calibración del molinete, en cuyo caso se introducen errores sistemáticos

- Es significativa la perturbación de la superficie libre del agua por acción del viento, o cualquier otra causa, cuando se va a medir la velocidad superficial
- El molinete no es sostenido de manera estable en el lugar correcto durante la medición.

Se debe tener en cuenta diferentes aspectos y recomendaciones generales para llevar a cabo un aforo seguro y confiable, tales como las siguientes:

- Después de cada aforo, el molinete se debe limpiar, secar y lubricar conforme las instrucciones del fabricante. Siempre se debe tener presente que el molinete hidrométrico es un instrumento de precisión que exige buen trato y uso cuidadoso.
- Los aforos por vadeo son adecuados para profundidades que permitan físicamente al operador mantenerse en pie y cuando la anchura del curso de agua es superior a 5 veces su profundidad media. Para definir las verticales de medición se recomienda utilizar cables marcados sujetos en cada orilla a puntos fijos. Al realizar la técnica debe mantenerse alejado lateralmente del instrumento, orientando sus piernas en la dirección del escurrimiento para reducir a un mínimo la perturbación del flujo cerca del molinete.
- Las mediciones desde un puente se deben efectuar preferiblemente por el costado de aguas arriba si el río arrastra materiales flotantes, con el fin de retirar oportunamente el molinete.
- No son recomendables puentes cuyos pilares producen remanso o represamiento del agua ni los que están situados en dirección oblicua al flujo.
- Cuando por la fuerza de la corriente o la insuficiencia del lastre se produzcan ángulos de arrastre considerables (mayores a 4°), se debe tomar nota del ángulo que se forma entre el cable y la vertical y de la altura del eje del malacate sobre la superficie del agua (altura de suspensión). Si no se dispone de un transportador adecuado para medir el ángulo, se mide (con ayuda de una cinta métrica o una cuerda) la longitud del cable de aforo comprendida entre el eje del malacate y la superficie del agua, estando el molinete en la posición en la cual se determinan las velocidades de flujo. Estas mediciones permiten efectuar posteriormente las correcciones adecuadas.

- Al aforar en época de crecidas es necesario prestar atención a la superficie libre del agua en el río aguas arriba del molinete con el fin de sacar rápidamente el equipo en caso de observarse objetos flotantes que puedan enredarse en el cable o golpear el conjunto hidrométrico. Si los materiales arrastrados por el agua ponen en peligro la seguridad, el aforo se desarrolla en forma abreviada tomando velocidades superficiales mediante el método de flotador o con molinete si las condiciones de la corriente lo permiten.
- Si durante una medición se verifica que una planta acuática u otro objeto se ha enredado en el molinete, ésta se debe repetir después de retirar el obstáculo.
- Se debe tener siempre el cuidado de no amarrar o enrollar en torno al cuerpo ninguna espira del cable conectado al molinete. En caso de un accidente esta práctica puede ser fatal
- La división de la sección transversal de aforo en verticales de medición comienza en un punto fijo de origen establecido de manera definitiva. En lo posible se utilizan siempre las mismas verticales para hacer comparables unos aforos con otros.
- Antes de utilizar el molinete se debe verificar el número de vueltas del rotor por señal.
- Antes de iniciar a tomar o registrar el tiempo de medición se debe esperar 3 señales por lo menos, es decir, que la hélice del molinete dé 3 revoluciones, para así permitir al rotor del molinete ajustarse al régimen de velocidad de la corriente.
- Observando la tasa en la secuencia de las señales se puede determinar si la hélice gira uniformemente. Si la secuencia es irregular, se debe establecer el origen de la anomalía, que puede deberse a obstáculos, al flujo o a falla del instrumento. Al existir obstáculos al flujo, la medición se debe prolongar y eventualmente repetir en un punto próximo. Si se detectan velocidades negativas se deja constancia de este hecho, delimitando la zona donde esto ocurre.

II.2. PROTOCOLO DE TÉCNICA DE TRAZADORES

II.2.1. ANÁLISIS DEL ÁREA DE ESTUDIO: ELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE INYECCIÓN Y MUESTREO.

Los puntos de inyección y de muestreo deben ser establecidos en las operaciones previas del ensayo, lo que hace necesario un análisis del área de estudio. Así, la selección de estos puntos será determinada en base a las características hidrogeológicas de la región que se está investigando, se estudiará la bibliografía y cartografía geológica existente, y las eventuales experiencias previas al ensayo. Además, se debe analizar con interés la información que las personas que viven en el área puedan proporcionar.

De esta forma en la zona de alimentación del sistema acuífero se delimitarán las zonas endorreicas con posibles sumideros que pueden servir como punto de inyección del trazador. Por su parte, se establecerán los puntos de muestreo en los cuales el trazador puede aparecer al ser coincidentes con el sentido de la circulación subterránea; si éste es desconocido, es necesario estimar una red de circulación hipotética y elegir las surgencias con probable conexión con el sumidero de inyección; si esta elección fuera dudosa habrá que muestrear todos los exutorios o zonas de descarga del acuífero.

También es aconsejable realizar un análisis previo de la accesibilidad del área de estudio mediante la consulta de los correspondientes planos topográficos y fotografías aéreas. Así, se planteará la posibilidad de acceder mediante vehículos a los puntos de inyección y de muestreo.

II.2.1.1. ELECCIÓN DEL TRAZADOR Y DE LA CANTIDAD A UTILIZAR

La elección del trazador se debe realizar utilizando como criterios de selección las características del trazador ideal, adecuando tales características a los intereses del estudio. En el caso de que existan aprovechamientos de abastecimiento en el sistema acuífero, se considera conveniente no

perturbarlo con el empleo de trazadores colorantes en cantidades que permitan su visualización a simple vista, dada la lógica alarma que se crearía entre los usuarios ante la coloración del agua.

Se hace necesaria la determinación de la cantidad óptima de trazador a utilizar en un ensayo, a fin de garantizar que el trazador pueda ser suficientemente detectado y medido; pero, siempre hay que tener cuidado de que un cálculo por exceso, para intentar asegurar el umbral de detección, nos lleve a concentraciones y cantidades de difícil manejo, demasiado densas o viscosas, demasiado caras o peligrosas y tóxicas.

Los principales parámetros que influyen en la elección de la cantidad de trazador a utilizar son:

- La sensibilidad del sistema de medición, se aconseja no preparar concentraciones más altas de lo necesario.
- La posible toxicidad del trazador utilizado a unas concentraciones dadas.
- Las consideraciones económicas.
- Las características hidrogeológicas del cuerpo de agua, tales como son: el volumen de agua que va a ser trazado.
- La capacidad de absorción del medio.

Por lo general, la mayoría de estos factores no están bien conocidos y son parcialmente desconocidos por el investigador.

Varios autores proponen fórmulas, con parámetros variables, para realizar un cálculo estimativo de la cantidad de trazador a utilizar en un ensayo.

II.2.1.2. ELECCIÓN DEL TIPO DE MUESTREO A REALIZAR

La frecuencia del muestreo no puede ser fijada por ninguna regla absoluta, la elección del intervalo de tiempo de muestreo es fundamentalmente seleccionado en base a la experiencia previa del hidrogeólogo y a un conocimiento preciso de la hidrogeología regional, y siempre es aconsejable adoptar un margen de seguridad a fin de garantizar que la nube de paso será muestreada o utilizar algún trazador colorante de forma que se visualice el paso de los trazadores.

En todo caso, se pueden tomar algunos valores orientativos, por ejemplo en distancias comprendidas entre 1 y 10 Km el intervalo de tiempo puede ser de 4-6 horas, y para grandes distancias, donde se prevea que la nube tardará varios días en salir, se puede muestrear diariamente. Asimismo, los intervalos de muestreo deben ser adecuados al tiempo transcurrido desde el instante de la inyección, y tanto más dilatados cuanto mayor es el tiempo; por ejemplo, en observaciones realizadas en períodos en los que se estima la salida de las máximas concentraciones conviene muestrear a intervalos cortos (1 o 2 horas); sin embargo, después de un amplio período de tiempo, puede bastar con 1 o 2 muestras diarias.

II.2.1.3. PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

Se deben realizar las soluciones del trazador necesarias para el proceso de inyección. Se deben tomar en cuenta algunos aspectos como:

- a) Disolventes a utilizar dependiendo del trazador.
- b) Duración de las soluciones.

II.2.1.4. INYECCIÓN DEL TRAZADOR

Existen dos tipos de técnicas de inyección: la continua a caudal constante, y la instantánea o masiva de corta duración.

La inyección continua no es aplicable en la realización de ensayos de trazado, ya que el consumo de trazador sería prohibitivo; además, para poder obtener la respuesta impulsional del sistema y estudiar la transferencia de la masa de trazador inyectada, es indispensable que la inyección sea instantánea. Este método consiste en inyectar, de forma instantánea o en un período de corta duración, un volumen de una disolución con una concentración de trazador conocida. De esta disolución «madre» conviene tomar una muestra, previamente a la inyección, para verificar su concentración.

Una inyección instantánea es fácilmente realizable, siempre que el caudal del sumidero sea elevado; sin embargo, no es aconsejable su realización si es menor de 1 l/s, ya que el caudal de vertido de la disolución debe ser inferior al caudal del sumidero, con objeto de que el trazador sea constantemente evacuado por el agua. Es necesario aforar el caudal de entrada al sistema en el sumidero de inyección para poder construir la función de entrada del flujo del trazador.

II.2.2. MUESTREO Y TOMA DE DATOS: ADQUISICIÓN DE LA FUNCIÓN DE SALIDA

En primer lugar, previamente a la inyección, se cogerán las muestras de referencia en cada punto de muestreo seleccionado, a fin de determinar el «blanco» o un posible «ruido de fondo».

Con objeto de obtener las funciones de salida del trazador se procederá a realizar un muestreo sistemático de todos los exutorios que, supuestamente, están en relación con el punto de inyección, para determinar la cantidad de trazador en el agua, expresada en unidades de concentración.

La posibilidad de muestrear automáticamente, mediante un aparato toma muestras, permite aligerar considerablemente los trabajos de muestreo y realizar un muestreo ajustable en el tiempo. De todos modos, siempre conviene tomar alguna muestra de forma manual, simultáneamente con el aparato, para corroborar los resultados y poder detectar posibles contaminaciones en su mecanismo de toma.

A ser posible, se mantendrá contacto con el laboratorio de analítica durante el período de muestreo, de forma que se ayude a centrar la intensidad del muestreo y se confirme positivamente que la ola de trazador ha pasado por los puntos de observación, con lo que se daría por concluido el ensayo.

II.2.2.1. RESULTADOS DEL ENSAYO: DETECCIÓN ANALÍTICA

Existen diversos métodos de detección, que varían según el tipo de trazador; entre ellos citaremos los siguientes:

- Observación óptica: simple vista, por observación directa (colorantes, sustancias sólidas).
 - al fluoroscopio (colorantes).
 - al microscopio (bacterias, levaduras, etc.).
- Análisis químico (sustancias químicas, solubles):
 - colorimetría (bicromato sódico).
 - espectrofotometría (cloruro de litio, fluoresceína, etc.)
 - espectrografía de masas (isótopos y radioisótopos naturales, O18, deuterio)
 - medición de la radiactividad (radioisótopos artificiales).
 - medición de la conductividad o resistividad eléctrica (sales)

II.2.4. INTERFERENCIAS DEL MÉTODO

Las interferencias en la técnica de aforo químico, dependen del tipo de trazador que se utilice. Para este caso se enfatizará el caso del Cloruro de Sodio y Rodamina WT, ya que son las dos opciones de trazador a utilizar.

En el caso del ion cloruro, su comportamiento como trazador es casi ideal porque no interacciona apenas con el terreno ni se separa químicamente del agua (la mayor parte de los cloruros son altamente solubles). Si su concentración es suficiente, puede medirse " in situ" a través de la conductividad del agua, si bien es necesario conocer la temperatura, porque dicha conductividad aumenta, aproximadamente, en un 2% por °C. Mediante análisis químico pueden determinarse concentraciones mínimas de 0,05 ppm. Sin embargo, su principal inconveniente estriba en que el ión Cl⁻ se encuentra siempre presente en el agua y, a veces, con concentraciones elevadas. En general, este trazador solo es utilizable cuando su concentración en el agua es inferior a unas 50 o 100 ppm y cuando el volumen de agua que se precisa marcar es pequeño. En la mayoría de los casos, no pueden marcarse volúmenes superiores a unos 1000 m³ debido a la elevada cantidad de

trazador que sería necesaria para alcanzar concentraciones bien diferenciables de los valores naturales.

Para el caso de los trazadores fluorescentes que se utilizan para trazado, la mayoría se deriva del xanteno. Su principal inconveniente deriva de su propia estructura molecular. Todos estos colorantes tienen grupos funcionales en sus moléculas que les proporcionan un carácter polar. Esto hace que estos productos presenten una importante tendencia a fijarse en el terreno debido a la existencia de fuerzas de atracción con los materiales contenidos en estos.

Debido al carácter iónico de las moléculas de estos colorantes, su fijación en el terreno varía fuertemente con el pH del agua.

Por otra parte, estos trazadores presentan una estabilidad limitada en los sistemas hidrológicos. Con valores muy bajos del pH del agua, pueden descomponerse de una forma, parcialmente, irreversible. Asimismo, la luz solar produce, en mayor o menor medida, su descomposición (foto descomposición). Este es un factor que hay que tener en cuenta, sobre todo, cuando estos trazadores se emplean para estudios en aguas superficiales. Por estas razones, estos productos son más apropiados para ser utilizados como trazadores semicuantitativos en estudios relacionados con las aguas superficiales.

II.3. METODOLOGÍA DE CAMPO

Como se mencionó en el capítulo anterior, el objetivo de esta investigación es evaluar los parámetros hidrodinámicos a lo largo de un tramo de 5 km del río. Para obtener datos representativos, se identificaron las corrientes de agua que aportaban significativamente a la corriente principal, y un punto antes y después de cada uno en la corriente principal.

En la siguiente tabla se presenta el nombre de los sitios identificados, utilizando la nomenclatura del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

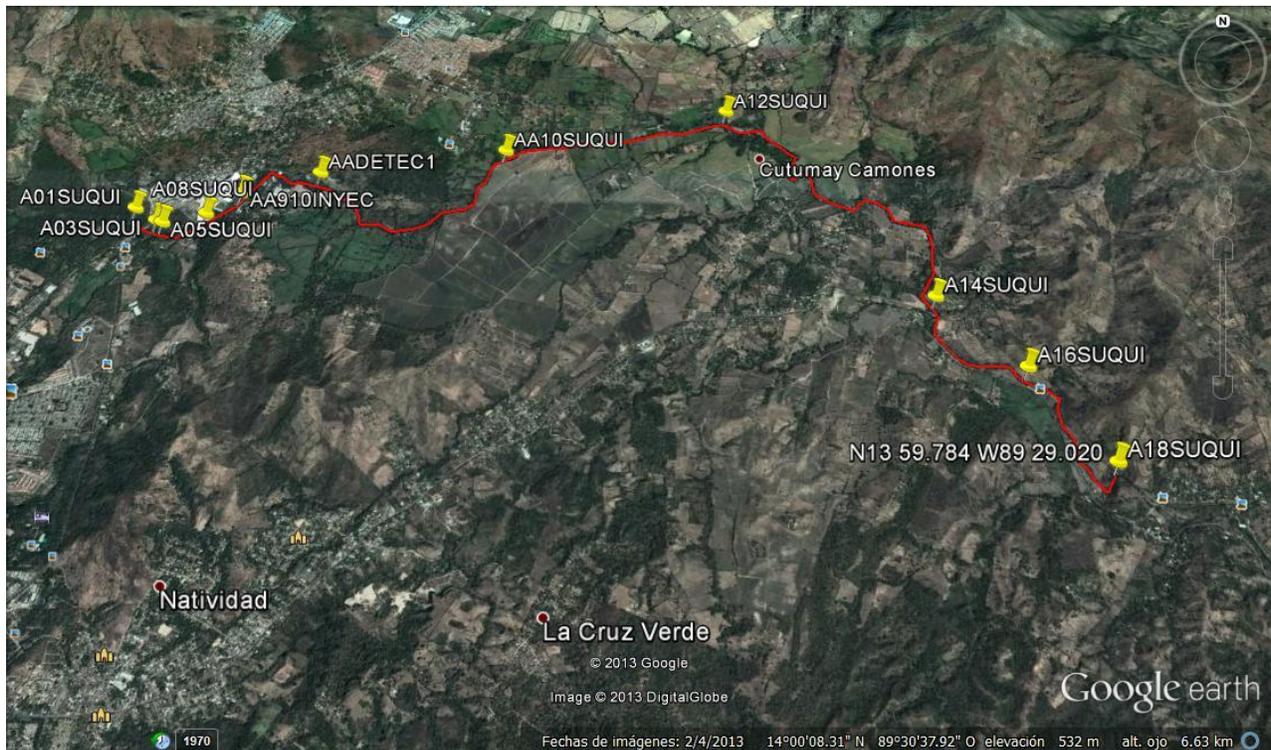
Tabla II-1: Sitios a aforar en la técnica de aforo por vadeo.

Sitio	Descripción	Coordenadas	Distancia desde A01SUQUI (metros)	Altura (m)
A01SUQUI	Punto de partida, cercano al Beneficio El Sauce.	N14 00.801 W89 32.575	0	591
A02VERTI	Aproximadamente a 30 metros de A01SUQUI. Tributario conocido por los lugareños como Vertiente.	N14 00.791 W89 32.585	17.77	620
A03SUQUI	Punto antes de la unión del río Suquiapa con el río Apanteos. A 25 metros aguas arriba de la unión de los ríos.	N14 00.744 W89 32.484	208.95	577
A04APANT	Río Apanteos, dentro del Beneficio El Sauce.	N14 00.734 W89 32.480	228.91	567
A05SUQUI	Aproximadamente a 30m aguas debajo de la unión con el río Apanteos.	N14 00.736 W89 32.460	254.96	564
A06SAUCE	A 75 metros del punto anterior.	N14 00.745 W89 32.410	334.26	578
A07CARCA	Tributario cercano a A06 SAUCE.	N14 00.711 W89 32.387	387.27	576

A08SUQUI	A aproximadamente 210 metros de A07CARCAG.	N14 00.778 W89 32.302	587.62	579
A09MOLIN	A 50m del enganche con la corriente principal. El enganche se encuentra aproximadamente a 135m de A08SUQUI.	N14 00.814 W89 32.223	721.25	510
A10SUQUI	A 2710 m de la unión con el río molino.	N14 01.108 W89 31.181	3,502.85	536
A11ZARCO	Conocido por los lugareños como Poza “El Cajón”. A unos 30m del enganche con el río principal.	N14 01.133 W89 31.178	3,5028.57	517
A12SUQUI	A 1650 de la unión con el río Zarco.	N14 01.305 W89 30.294	5,234.63	519
A13VERTI	Corriente utilizada para recreación y para bombear agua a comunidades aledañas (aproximadamente 200 familias). Aproximadamente a 330 m de enganche con corriente principal.	N14 01.447 W89 30.251	5,263.54	545
A14SUQUI	A 175 m de unión con A13VERTI.	N14 00.434 W89 29.553	8,095.20	480
A15PUENTE	A 2500 m de A14SUQUI.	N14 00.429 W89 29.582	8,159.21	473
A16SUQUI	A 800 m de enganche con río Puente.	N14 00.142 W89 29.264	8,984.12	506
A17GUILGU	A 810 m de sitio A16SUQUI.	N13 59.731 W89 29.118	9,890.50	506
A18SUQUI	A 300 m de unión con río Guilguayo.	N13 59.784 W89 29.020	10,036.98	499

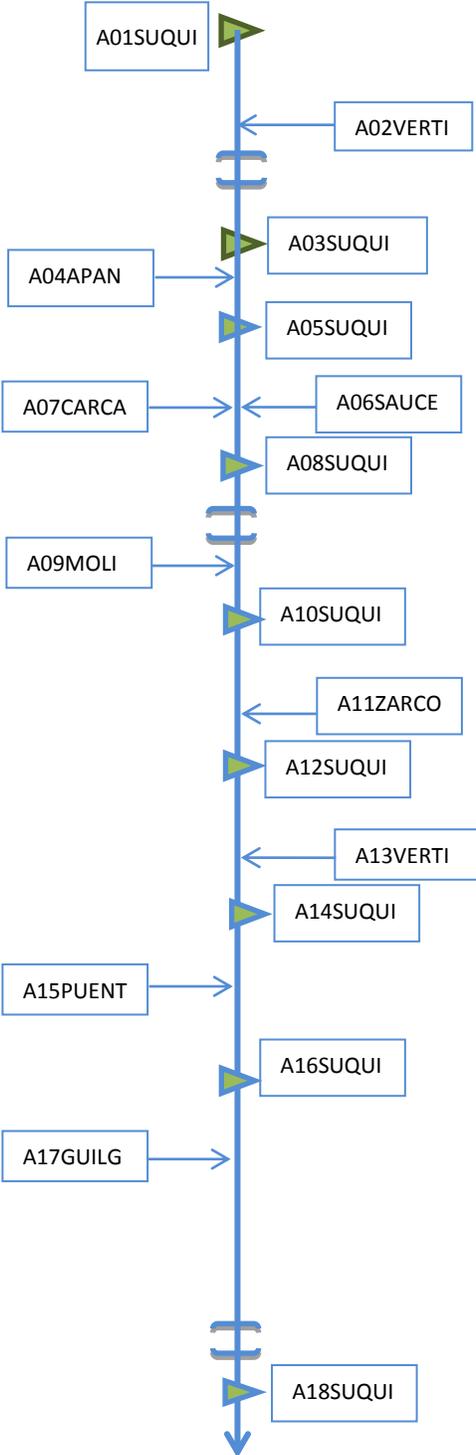
En la figura, se presenta el recorrido de los 18 sitios a estudiar. Se determinó que el tramo mide aproximadamente 10 km (10,036.98 m).

Figura II.4: Imagen satelital del tramo de la parte alta del río Suquiapa.



A continuación, se presenta un esquema de los 18 sitios.

Figura II.5: Esquema de sitios (No a escala)



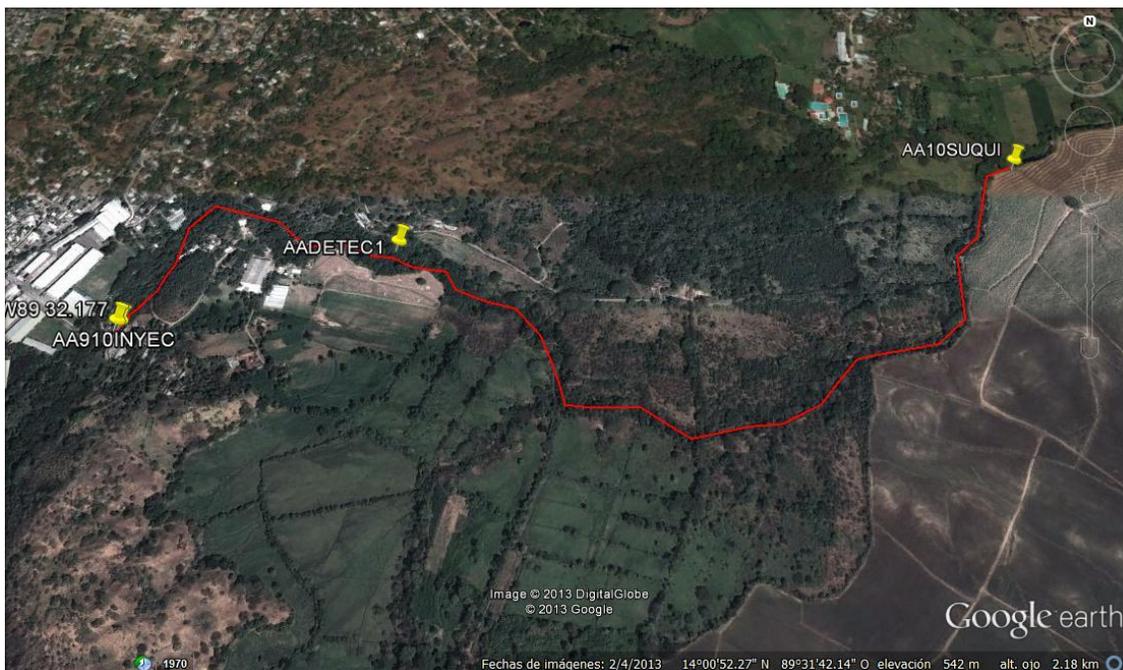
Para la ejecución de la técnica de trazado, se deben identificar un punto de inyección y dos puntos de detección. En la tabla que se presenta a continuación se describen los sitios escogidos.

Tabla II.2: Identificación de sitios para la técnica de aforo químico.

Sitio	Descripción	Coordenadas
A910INyec	Localizado en la Colonia Santa Margarita. Para facilitar las operaciones de inyección, se escogió este punto situado cerca de un puente. Se encuentra aguas abajo del punto A08SUQUI.	N14 00.875 W89 32.177
ADETEC1	Se encuentra a 745 m del punto de Inyección.	N14°00' 58.7" W89°31'530.8"
A10SUQUI	Punto antes de unión con río Zarco. Está a 1880 metros del primero punto de detección.	N14 01.108 W89 31.181

A continuación se presenta una imagen satelital del recorrido del experimento de trazadores.

Figura II.6: Imagen satelital de recorrido del experimento de trazadores.



El procedimiento para realizar la inyección del trazador Cloruro de Sodio, fue el siguiente:

Se escogió el sitio de detección 1 a aproximadamente 600 metros aguas abajo del sitio de inyección. Se debe procurar colocar el equipo multiparámetro fijo en un lugar que capture representativamente el flujo del cauce. Se asignaron dos personas del equipo para monitorear este punto de detección.

El resto del equipo se ocupó de preparar la solución a inyectar, se necesitaron 300 litros de agua del río Suquiapa para disolver 150 libras de cloruro de sodio. Debido a que la inyección se realizaría desde un puente para poder extraer el agua de una manera sencilla se utilizó una cubeta de 5 galones y una cuerda. El agua extraída fue depositada en dos barriles de aproximadamente 200 litros de agua cada uno y se llenaron con 150 litros de agua cada uno, se extrajeron 25 cubetas llenas de agua del río para poder alcanzar esta cantidad.

Al tener los 300 litros de agua en los dos barriles se procedió a disolver la sal, 75 libras en cada barril, se agitó vigorosamente por un aproximado de 15 minutos para asegurar que la sal estuviera bien disuelta.

Para la ejecución de la inyección de la solución preparada, se utilizó una tubería era de PVC de una longitud de 6 metros y un diámetro de 6 pulgadas, de manera de verter la solución al nivel de la superficie del agua del río, evitando una caída brusca de agua que provocara pérdidas de solución o sedimentos de cloruro de sodio.

Se registraron los valores de conductividad cada 30 segundos utilizando la función de registro continuo del multiparámetro. Además, cada 30 segundos tomaron muestras en un beaker de 50 ml de agua y se iban depositando en un recipiente, esto se realizó durante el tiempo del paso de la pluma. Luego se tomó la conductividad del agua que se encontraba en el recipiente, esto para poder tener un valor integrado de la conductividad.

Al terminar, el grupo de trabajo se desplazó hacia el punto de detección 2 que se encontraba aproximadamente 2 kilómetros río abajo del sitio de inyección y se realizó el mismo procedimiento que en el sitio de detección 1, el multiparámetro comenzó a registrar el aumento en la conductividad 1 hora 38 minutos después de haber iniciado la inyección. De igual forma se tomaron las muestras a cada 30 segundos y estas eran depositadas en un recipiente para luego poder tomar el dato integrado de la conductividad.

Se recogió el equipo utilizado y se dio por concluido el ensayo.

Tabla II-3: Resumen de actividades de acampo para la realización del aforo químico.

Actividad	Hora	Conductividad
Inicio de inyección	1:36:46 p.m.	
Finalización de la inyección	1:50:41 p.m.	
Inicio de toma de datos en ADETECT1	03:06:23 p.m.	458 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Finalización de toma de datos en ADETECT1	03:48:23 p.m.	447 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Inicio de toma de datos en A10SUQUI	04:18:17 p.m.	446 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Finalización de toma de datos en A10SUQUI	05:26:47 p.m.	449 $\mu\text{S}/\text{cm}$

CAPÍTULO III: CÁLCULOS ANALÍTICOS

III.1. CANTIDAD DE TRAZADOR A INYECTAR.

Para el cálculo de la masa de trazador a utilizar en la experiencia de aforo químico se hace uso de las propiedades físico-químicas presentadas en la sección I.4.4.1 en especial de la solubilidad registrada a diferentes temperaturas (tabla I.5) y estudios previos sobre conductividad y su relación con la concentración (Anexo B).

III.1.1. Curva de calibración teórica

Uno de las propiedades fisicoquímicas que se consideraron para la determinación de la masa de trazador a inyectar fue la relación teórica entre conductividad eléctrica y concentración de NaCl.

Teóricamente, esta relación se describe con la siguiente curva:

$$\text{Concentración } \left(\frac{mg}{L}\right) = 0.5794 * \text{Conductividad eléctrica } \left(\frac{\mu S}{cm}\right)$$

En la siguiente figura se presenta gráficamente la tendencia de tal curva.

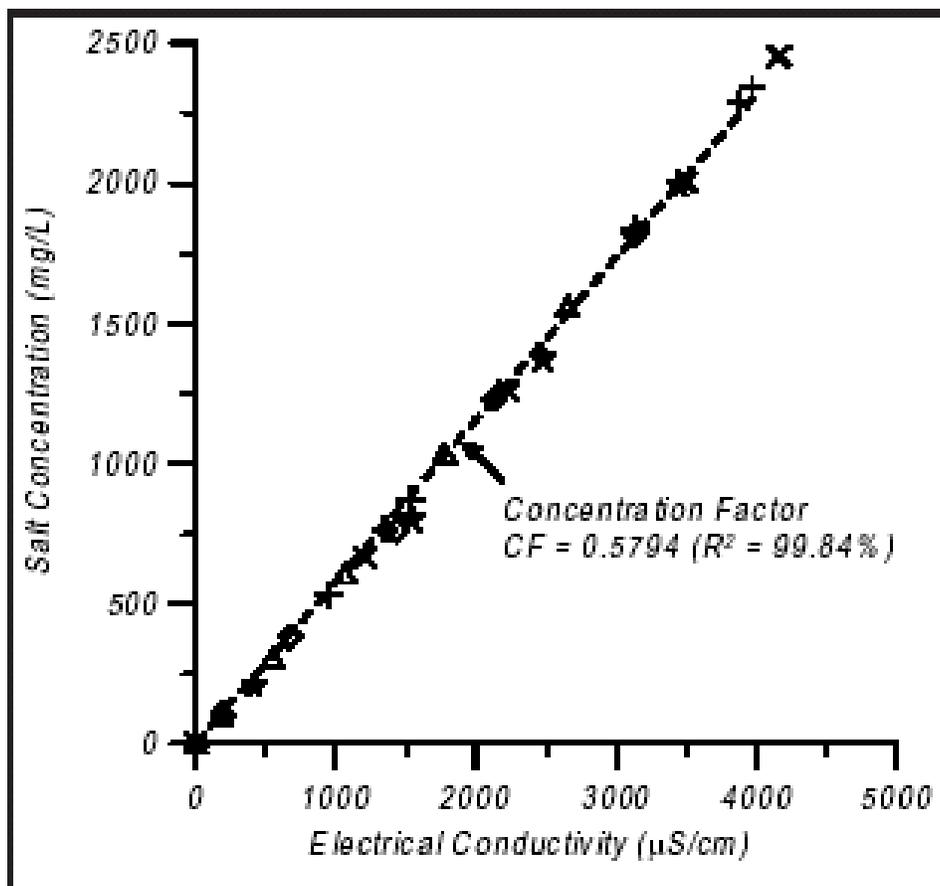


Figura III-1: Curva de calibración teórica. Fuente: Robert Hudson and John Fraser - Extension Note 014 Hydrology - Vancouver Forest Region

III.1.2. Curva de calibración experimental

La curva de calibración necesaria para este estudio es la relación matemática entre la conductividad leída por el equipo multiparámetro y la concentración de cloruro de sodio. Para obtener esta curva se realizó un experimento controlando la variable de la concentración mediante la adición de una masa determinada de NaCl a un volumen constante de una muestra de agua del río Suquiapa, agitando constantemente y registrando las lecturas de conductividad obtenidas con el multiparámetro con un intervalo de tiempo definido.

Es necesario, por lo tanto, que tal correlación sea aplicable al sistema específico de estudio; por lo tanto se realizó la curva de calibración con una muestra de agua recolectada del río Suquiapa en el sitio A12SUQUI el día 5 de mayo de 2013.



Figura III-2: Recolección de agua en sitio A12SUQUI. Fecha: 05/05/2013

III.1.2.1. Calibración instrumental del equipo.

Para la calibración del electrodo que mide la conductividad, se utilizaron soluciones de calibración preparadas en laboratorio, basadas en los métodos estándar para la evaluación de aguas y aguas residuales (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater), para la estandarización de soluciones.

Previo a la recolección de los datos, es necesario cerciorarse de que el electrodo de que mide la conductividad eléctrica esté adecuadamente calibrado, para tal fin se prepararon soluciones de calibración basadas en procedimientos estándar.

Tabla III-1.: Procedimiento estándar para preparación de soluciones calibradoras de conductividad con KCl.

Fase de la técnica	Detalle	Descripción gráfica
<p>Preparación instrumental</p>	<p>Material y equipo necesario para las soluciones, limpieza y disposición.</p>	 <p>A photograph of a laboratory bench. On the left, a balance scale is used to weigh a white powder into a small metal dish. In the center, there is a blue plastic bottle and a white spray bottle. To the right, three beakers contain a yellowish liquid. The bench number '27' is visible on the front edge.</p>
<p>Calibración de equipo</p>	<p>Balanza analítica con 3 decimales de precisión además del conductímetro de planta.</p>	 <p>A photograph showing a digital analytical balance on a green tiled floor. To its right is a conductivity meter with a probe. A white bottle and a glass beaker are also visible on the floor.</p>
<p>Medición de material</p>	<p>Peso de KCl para las 3 soluciones a preparar</p>	 <p>A photograph of a laboratory bench. A digital analytical balance is used to weigh a substance into a glass flask. A brown bottle and other lab equipment are visible on the bench.</p>

Preparación de soluciones

Aforo y dilución del KCl en balones para solución



Calibración instrumental

Con las soluciones preparadas se procede a la calibración del electrodo de conductividad en el multiparámetro de campo.



Almacenamiento de soluciones

Disposición de las soluciones tanto para almacenaje en planta como para traslado en campo.



Una vez preparadas las soluciones y calibrado el conductímetro, se procede a realizar la prueba de medición de conductividad para luego poder calibrar el equipo multiparámetro.

Tabla III-2.: Soluciones estándar de calibración.

Solución M	Masa (g)	Conductividad estándar	Conductividad leída
0.001	0.0746	14.9	21.9
0.0005	0.0037	73.9	79.7
0.0001	0.0074	146.9	152.4



Figura III-3: Medición de las masas de cloruro de sodio a utilizar para obtener la curva de calibración. Fecha: 22/05/2013.



Figura III-4: Obtención de datos del equipo multiparámetro. Fecha: 22/05/2013.

A continuación se presentan los datos recolectados el día 22 de mayo en la Planta Piloto. La curva se obtuvo adicionando continuamente masas de 5 mg cada 30 segundos a la muestra de agua del río en estudio (800 ml), seguido de una serie más pequeña de masas de 10 mg.

Tabla III-3: Datos recolectados en el laboratorio de concentración vs. conductividad.

Tiempo (s)	μS/cm	(delta)μS/cm	miligramos agregados	Concentración
0				0
10	438	0	5	0.00625
20	438	0	5	0.00625
30	446	8	10	0.0125
40	454	16	15	0.01875
50	472	34	20	0.025
60	494	56	25	0.03125
70	518	80	30	0.0375
80	549	111	35	0.04375
90	561	123	40	0.05
100	570	132	45	0.05625
110	586	148	50	0.0625
120	593	155	55	0.06875
130	615	177	60	0.075
140	625	187	65	0.08125
150	626	188	65	0.08125
160	638	200	70	0.0875
170	657	219	75	0.09375
180	664	226	80	0.1
190	706	268	90	0.1125
200	731	293	100	0.125
210	761	323	110	0.1375

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de la concentración:

$$\text{Concentración de NaCl} \left(\frac{g}{l} \right) = \frac{mg \text{ añadidos}}{800 \text{ ml}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ litro}} * \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mg}} = \frac{mg \text{ añadidos}}{800}$$

$$\text{Concentración de NaCl} \left(\frac{g}{l} \right) = \frac{5 \text{ mg añadidos}}{800} = 0.00625 \text{ g/l}$$

Para los valores de concentración obtenidos, se obtuvo una regresión lineal de la forma:

$$Y = A + Bx$$

Donde:

Variable	Value
a	3.95116957424132E-04
b	9.01283867167781E-04

El valor de **b** es considerado como el error de atribuido al equipo, por lo tanto solo se tomará el valor de **a** en los cálculos a realizar.

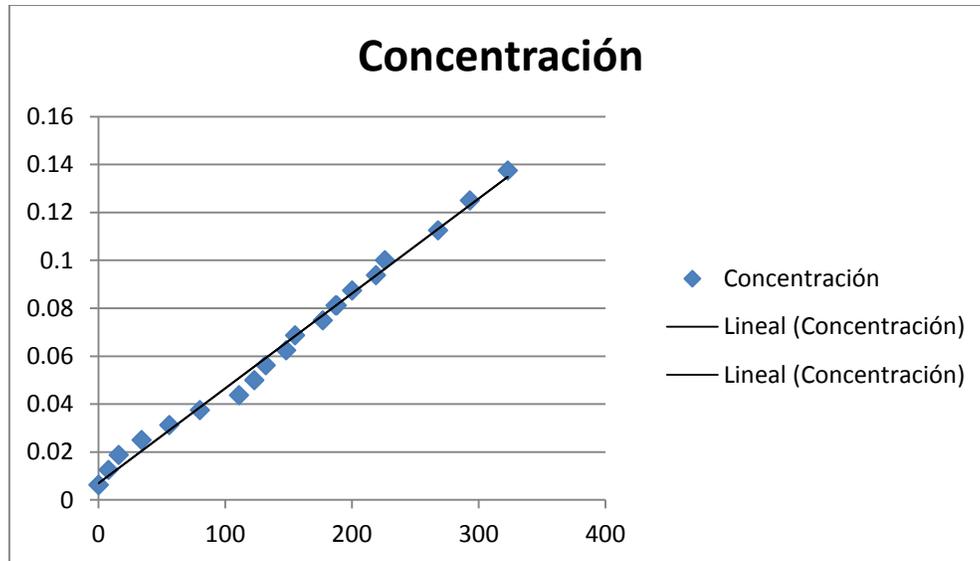


Figura III-5: Gráfico de dispersión y de línea de tendencia de curva de calibración.

III.1.3. Solubilidad práctica.

En el caso particular de la solubilidad se tiene un dato teórico para temperaturas de trabajo normales en laboratorio (extraído de tabla I.5)

Sustancia	20 °C	30 °C
Cloruro de Sodio	35.8	36

Pero para fines prácticos se necesita una solubilidad que permita la manipulación de volúmenes considerables de agua para la inyección de la solución trazadora en el río al momento de realizar el aforo químico.

Con ello se realizan 5 pruebas de solubilidad, conteniendo una cantidad fija de 900 mL de agua extraída del punto A10SUQUI a las cuales se les adiciona una cantidad previamente pesada de NaCl común (sal yodada) como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III-4: Solubilidades prácticas del Río Suquiapa (gramos de sal agregados).

Frasco 1	Frasco 2	Frasco 3	Frasco 4	Frasco 5	Observaciones
349	348	349	421	420	Conductividad base
50	50	50	30	30	Disolución completa
100	100	100	60	60	Disolución completa
150	150	150	90	90	Disolución completa
200	200	200	120	120	Disolución completa
210	210	210	150	150	Disolución completa
220	220	220	180	180	Disolución completa
230	230	230	210	210	Disolución completa
240	240	240	240	240	Saturación práctica
250	250	250			Disolución completa
260	260	260			Disolución completa
270	270	270			Saturación práctica
275					Saturación práctica

Otro dato que se utilizó para determinar la masa de inyección de trazador, fue un estudio de trazado que se realizó en Brasil en el año 2010 (ARCAL, 2010). En este estudio se realizó una solución de 8 kilogramos de sal en 40 litro de agua del río en estudio, es decir una concentración de 200 g/l.⁴

⁴ ARCAL, “Taller Regional Experimentos con Trazadores para Calibrar y Validar Modelos de Calidad de Agua”. Brasil, 2010.

III.2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

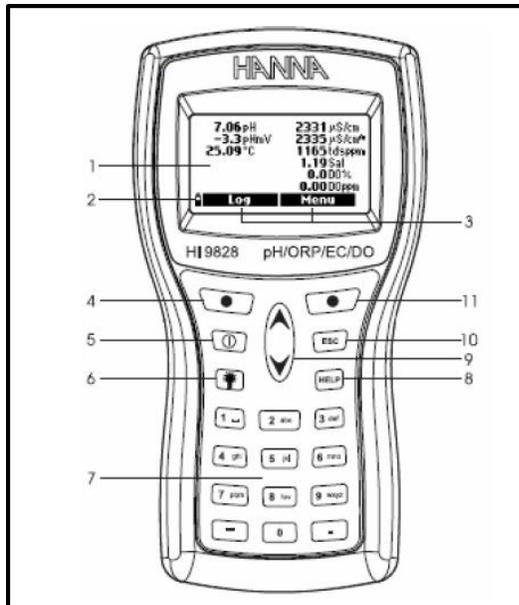


Figura III-6: Descripción de pantalla y teclado de equipo multiparámetro.

Para la medición de los valores de conductividad se utilizó un Medidor Multiparamétrico para Calidad de Agua HI 9828 HANNA. El HI 9828 es un sistema multiparamétrico resistente al agua, robusto y fácil de usar. Posee una sonda multisensorial basada en un microprocesador, de esta forma es posible medir una serie de parámetros necesarios para evaluar la calidad del agua, como porcentaje de Oxígeno Disuelto, Conductividad, Gravedad Específica, pH y

temperatura. También es posible utilizar la misma sonda con diferentes medidores sin la necesidad de recalibrar el sistema. El medidor multiparamétrico también posee una función de medidas continuas, permitiendo registrar en la memoria del aparato todos los parámetros cada determinado tiempo (30 segundos, por ejemplo).

III.2.1. Descripción de la pantalla y el teclado

1. Pantalla
2. Indicación del nivel de la batería
3. Funciones de las teclas de función
4. Tecla de función izquierda: su función depende de lo que muestra la pantalla.
5. Tecla On/Off para encender y apagar el medidor.
6. Retroiluminación: para activar la retroiluminación
7. Teclado alfanumérico: para ingresar códigos alfanuméricos.
8. Tecla de ayuda (HELP): para obtener información sobre lo que muestra la pantalla.
9. Teclas de flechas: para desplazarse entre las opciones.

10. Tecla ESC: para regresar a la pantalla anterior.
11. Tecla de función derecha: su función depende de lo que muestra la pantalla.

III.2.2. Procedimiento de medición

- Conecte la sonda en el medidor, recuerde ajustar con cuidado la funda de protección a la sonda.
- Sumerja la sonda en la muestra prestando atención para evitar piedras.
- Encienda el medidor presionando el botón On/Off. El medidor visualiza “Hanna HI 9828”, la versión de software y luego ingresa el modo de medición.
- El medidor visualiza las lecturas relativas a todos los parámetros habilitados.
- Presione LOG para almacenar las lecturas o MENU para ingresar al menú principal del medidor.

NOTA: si el medidor no encuentra la sonda, aparece el mensaje: “Probedisconnected!” (“¡Sonda desconectada!”) en este caso, la única tecla de función disponible es Menu y puede operar solo con las funciones que no requieren lectura.

III.2.3. Procedimiento de Calibración

Tabla III-5: Calibración de parámetros en el equipo multiparámetro.

Parámetro (electrodo)	Procedimiento
pH	<ul style="list-style-type: none"> • Sumerja la sonda en el buffer escogido y revuelva suavemente. En la pantalla aparecerán los valores actuales de pH y del buffer, y el mensaje “Norready”. • Cuando la pantalla se estabiliza y se acerca al buffer seleccionado, la pantalla muestra “Ready”. • Presione CONFIRM para aceptar el valor; o BUFFER para cambiar el valor del buffer.

	<ul style="list-style-type: none"> • Después de confirmar el primer punto de calibración, enjuague introduciendo la sonda en el vaso de calibración lleno con agua destilada, agitar. Lavar el vaso de calibración con agua destilada, llenarlo y volver a introducir la sonda, agitar. • Sumerja la sonda en la segunda solución y revuelva suavemente. • Realizar el mismo procedimiento del primer buffer. • Al terminar la calibración, aparecerán los siguientes mensajes: “Almacenando datos en la sonda, espere por favor”, “Actualizando datos GLP, espere por favor”, “Calibración completa”.
Oxígeno disuelto	<ul style="list-style-type: none"> • Llene el vaso de la sonda con aproximadamente 4mm de agua destilada y atornille la sonda. • Aparecerá el mensaje NOT READY hasta que el valor se estabiliza. • Para cambiar el punto de calibración estándar, presione CAL.POINT. • Para ingresar un valor de calibración diferente, presione CUSTOM e ingrese con el teclado el valor que desee, en este caso se utiliza un valor de 0% de Oxígeno Disuelto. • Cuando el valor se estabilice, aparecerá READY y CONFIRM. Presione CONFIRM para aceptar el punto de calibración.
Conductividad	<ul style="list-style-type: none"> • Llene el vaso con una solución estándar de conductividad. • Sumerja la sonda con la funda en la solución y espere que se estabilice la medición. • El medidor mostrará la lectura real en la pantalla primaria y el valor estándar en la secundaria. • Para cambiar el valor estándar, presione el valor CAL.POINT. En la pantalla aparecerán los posibles valores de las soluciones estándar. • Al presionar CUSTOM también se puede ingresar un valor y resolución de conductividad deseados. • Cuando la lectura se estabilice, presionar CONFIRM para aceptar el valor. • Después de confirmar, en la pantalla aparecerán los siguientes mensajes: “Almacenando datos en la sonda, espere por favor”, “Actualizando datos GLP, espere por favor”, “Calibración completa”.

CAPÍTULO IV

TABULACIÓN DE DATOS Y CÁLCULOS

IV.1. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO

IV.1.1. TABULACION DE DATOS

Tomado en cuenta las consideraciones mencionadas en la sección II.2.2, en cuanto a la ubicación de los puntos de medición, se realizaron mediciones según el protocolo de aforo por vadeo (sección II.2) para 20 sitios, enlistados en la Tabla II.1, para mayor detalle ver Anexo D. Fichas de puntos de aforo en una distancia aproximada de 10.03698 Km.

Tabla IV-1 Aforos y mediciones realizadas en el tramo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

SITIO DE AFORO	FECHA DE AFORO POR VADEO	FECHA DE TOMA DE PARAMETROS DE CAMPO	ÉPOCA
A01SUQUI	11-03-13	17-05-13	SECA
A02VERTI	11-03-13	17-05-13	SECA
A03SUQUI	30-04-13	16-05-13	SECA
A04APANT	30-04-13	16-05-13	SECA
A05SUQUI	07-05-13	16-05-13	SECA
A06SAUCE	02-05-13	16-05-13	SECA
	02-05-13	16-05-13	SECA
A07CARCA	02-05-13	16-05-13	SECA
A08SUQUI	30-04-13	16-05-13	SECA
A09MOLIN	30-04-13	16-05-13	SECA
	07-05-13	17-05-13	SECA
A10SUQUI	09-05-13	17-05-13	SECA
A11ZARCO	09-05-13	17-05-13	SECA
A12SUQUI	04-05-13	17-05-13	SECA
A13VERTI	05-05-13	17-05-13	SECA
A14SUQUI	11-05-13	17-05-13	SECA
A15PUENTE	11-05-13	17-05-13	SECA
A16SUQUI	11-05-13	17-05-13	SECA
A17GUILGU	11-05-13	17-05-13	SECA
A18SUQUI	11-05-13	17-05-13	SECA

IV.1.2. Cálculos De Aforo Por vadeo

Para el cálculo de los parámetros hidrodinámicos por medio de la técnica de aforo por vadeo, se utilizó un formato de hoja de cálculo como el que se presenta a continuación (Ver Anexo D):

Tabla IV-2: Hoja de cálculo utilizada para realizar los cálculos del aforo por vadeo.

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	No. REV 0.8	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC LEIDA (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL LEIDO
							0.2		0.6		0.8						
							m	V	M	V	m	V					
1																	
2	1.00	0.22	17	40.9			sup	0.934	---	---	---	---	0.934	0.285	1.00	0.110	0.0156576
3	2.00	0.28	21	40.5			---	---	0.17	1.161	---	---	1.161	0.354	1.00	0.250	0.0798195
4	3.00	0.31	23	40.4			---	---	0.19	1.273	---	---	1.273	0.388	1.00	0.295	0.1094278
5	4.00	0.40	23	40			---	---	0.24	1.286	---	---	1.286	0.392	1.00	0.355	0.1384470
6	5.00	0.43	12	41			---	---	0.26	0.663	---	---	0.663	0.202	1.00	0.415	0.1232665
7	6.00	0.60	10	40.8			---	---	0.36	0.558	---	---	0.558	0.170	1.00	0.515	0.0958314
8	7.00	0.47	23	40.2			---	---	0.28	1.270	---	---	1.270	0.387	1.00	0.535	0.1490442
9	8.00	0.37	25	40			---	---	0.22	1.396	---	---	1.396	0.426	1.00	0.420	0.1706453
10	9.00	0.39	33	40			---	---	0.23	1.837	---	---	1.837	0.560	1.00	0.380	0.1872295
11	10.00	0.45	27	40			---	---	0.27	1.506	---	---	1.506	0.459	1.00	0.420	0.2139787
12	11.00	0.45	27	40.5			---	---	0.27	1.488	---	---	1.488	0.454	1.00	0.450	0.2053285
13	12.00	0.60	19	40.2			---	---	0.36	1.060	---	---	1.060	0.323	1.00	0.525	0.2038655
14	13.00	0.29	12	40.1			---	---	0.17	0.677	---	---	0.677	0.206	1.00	0.445	0.1177999
																5.115	1.8103413

Los datos leídos en campo son distancia, profundidad, revoluciones por 40s, velocidad en ft/s.

Utilizando el factor de conversión adecuado se obtienen los valores de velocidad en metros/segundos. La velocidad promedio es la media aritmética de las velocidades medidas para cada sección.

El área parcial se calcula de la siguiente manera:

$$\text{area parcial} = \frac{\text{Profundidad}_i + \text{Profundidad}_{i-1}}{2} * \text{Ancho de la sección}$$

El caudal parcial se calcula de la siguiente forma:

$$Caudal = \frac{Velocidad_i + Velocidad_{i-1}}{2} * \text{Área parcial}$$

Luego se obtiene una suma de las áreas y caudales parciales, el resto de propiedades se obtienen utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Perímetro mojado = \left(\frac{\text{Área total}}{\text{Ancho}} \right) * 2 + \text{Ancho}$$

$$Radio hidráulico = \frac{\text{Área total}}{\text{Perímetro mojado}}$$

$$Velocidad media = \frac{\text{Caudal}}{\text{Área total}}$$

Valor de profundidad para cada sitio es el promedio de las profundidades medidas en cada sección. El coeficiente de dispersión es obtenido con el método de Fischer (Ver IV.2.1.).

Tabla IV-3: Resultados de cálculo de parámetros hidrodinámicos obtenidos por medio de la técnica de aforo por vadeo.

Sitio	Caudal	Área de sección transversal	Ancho de la sección	Perímetro mojado	Veloc. media	Prof.	Coeficiente de dispersión
A01SUQUI	0.609	2.450	10.00	10.49	0.248	0.249	10.635
A02VERTI	0.061	0.284	1.5	1.878	0.214	0.182	0.303
A03SUQUI	0.677	3.183	9.0	9.707	0.213	0.325	5.413
A04APANT	0.346	1.163	4.1	4.667	0.298	0.238	1.926
A05SUQUI	1.091	4.125	10.5	11.286	0.264	0.347	7.684
A06SAUCE	0.16	0.645	1.0	2.289	0.249	0.588	0.092
A06SAUCE-2	0.02	0.214	0.8	1.335	0.092	0.227	0.041
A07CARCAGUA	0.095	0.416	1.5	2.054	0.228	0.231	0.236
A08SUQUI	1.203	5.18	13.0	13.797	0.232	0.345	10.747
A09MOLIN	0.151	0.698	3.0	3.4657	0.241	0.22	0.976
A10SUQUI	1.812	5.115	13.0	13.787	0.354	0.351	17.738
A11ZARCO	0.422	2.340	6.5	7.22	0.18	0.333	2.577
A12SUQUI	2.299	10.7	17.0	18.259	0.298	0.571	16.166
A13VERTI	0.053	0.764	2.0	2.764	0.069	0.335	0.105
A14SUQUI	2.660	11.430	16.00	17.429	0.233	0.658	8.031
A15PUENTE	0.719	1.730	6.000	6.577	0.416	0.251	5.186
A16SUQUI	2.900	5.035	12.00	12.839	0.576	0.365	18.573
A17GUILGUAYO	0.127	0.578	2.500	2.962	0.220	0.193	0.629
A18SUQUI	3.027	1.530	7.00	7.437	0.893	0.284	16.611

IV.2. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN

Para la evaluación del coeficiente de dispersión, se utilizaron tres métodos, que se describen a continuación:

Tabla IV-4: Técnicas utilizadas para la evaluación del coeficiente de dispersión.

Técnica	Características	Ecuación
Fischer	Es el método empírico.	$E_x = \frac{0.011xu^2xB^2}{dxu^*} \pm 50\%$ <p>Donde:</p> $u^* = \frac{u}{10} \text{ (velocidad de corte)}$ <p>D: radio hidráulico B: ancho del río U: velocidad media de los aforos.</p>
Fogler	El método propuesto por Scott Fogler, considera el sistema como un reactor no ideal y se caracteriza mediante la distribución de tiempos de residencia (E(t)). Para la utilización de esta técnica es necesario un estudio de trazado, y está involucrado el número de Peclet para caracterizar el flujo.	$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{2590.9} C(t)dt}$ $tm = \int_0^{\infty} tE(t)dt$ $pe = \frac{Ul}{D_a}$
Ecuación de Singh y Beck	Al igual que el caso anterior, se necesita un estudio de trazado para realizarlo. Se basa en una resolución de la ecuación general de dispersión.	$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$

Para el estudio de trazado se utilizó Cloruro de Sodio como trazador, debido a su accesibilidad y debido a que se puede monitorear por medio de la conductividad eléctrica del sistema.

IV.2.1. Tratamiento previo de datos

A continuación se presentan los datos del aforo químico en el primer punto de detección:

Tabla IV.5: Datos recolectados en el punto de detección 1

Hora	$\mu\text{S/cm}$
15:06:23	458
15:06:53	461
15:07:23	318
15:07:53	464
15:08:23	469
15:08:53	469
15:09:23	472
15:09:53	475
15:10:23	480
15:10:53	482
15:11:23	484
15:11:53	487
15:12:23	488
15:12:53	494
15:13:23	495
15:13:53	496
15:14:23	496
15:14:53	498
15:15:23	498
15:15:53	498
15:16:23	498
15:16:53	496
15:17:23	495
15:17:53	494
15:18:23	492
15:18:53	489
15:19:23	489
15:19:53	486
15:20:23	483
15:20:53	480
15:21:23	478
15:21:53	477
15:22:23	475
15:22:53	474
15:23:23	470
15:23:53	471
15:24:23	468
15:24:53	466
15:25:23	466
15:25:53	464
15:26:23	462
15:26:53	462

Hora	$\mu\text{S/cm}$
15:27:23	460
15:27:53	459
15:28:23	458
15:28:53	457
15:29:23	457
15:29:53	455
15:30:23	455
15:30:53	453
15:31:23	453
15:31:53	452
15:32:23	452
15:32:53	452
15:33:23	451
15:33:53	451
15:34:23	450
15:34:53	450
15:35:23	450
15:35:53	449
15:36:23	449
15:36:53	449
15:37:23	449
15:37:53	449
15:38:23	448
15:38:53	448
15:39:23	448
15:39:53	448
15:40:23	448
15:40:53	448
15:41:23	448
15:41:53	448
15:42:23	447
15:42:53	447
15:43:23	447
15:43:53	447
15:44:23	447
15:44:53	447
15:45:23	447
15:45:53	447
15:46:23	447
15:46:53	447
15:47:23	447
15:47:53	447

A continuación se presenta el gráfico de dispersión de los datos recolectados:

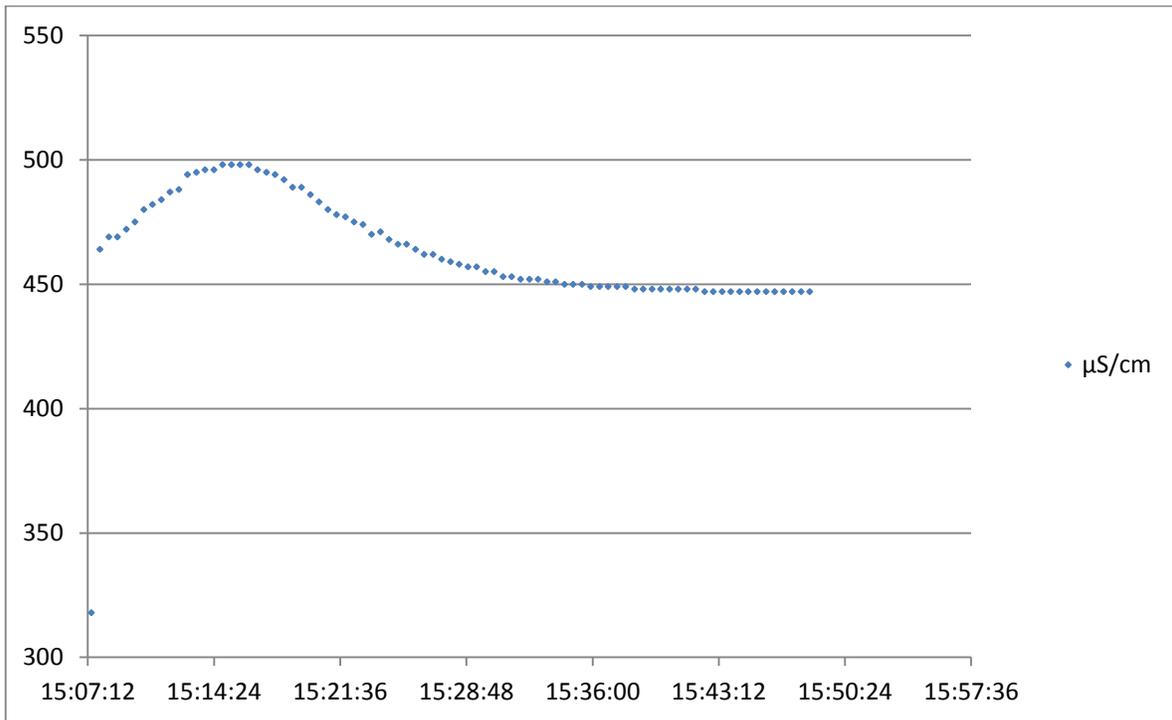


Figura IV-1: Gráfico de dispersión de datos recolectados en el punto de detección 1.

Se puede observar que el tercer dato parece tener un valor atípico respecto a la serie de datos; por lo tanto es necesario identificar este valor como dato atípico, para eliminarlo. Para tal propósito se realiza la prueba de Grubbs, obteniendo un valor para un estadístico de prueba T.

$$T = \frac{X_o - X}{s} = \frac{|318 - 463|}{15.8208} = 9.165151$$

Para un N=84, el valor crítico del estadístico a $\alpha=0.05$ T es 3.156; siendo 9.1651 un valor mayor, se descarta este valor de la serie de datos.

Como se puede observar, hay un dato cerca del origen que no sigue la tendencia del resto de datos, también se puede observar que la curva esta sobre un gran espacio desde el eje x; esto indica que se debe tomar una conductividad base para partir de un punto (0,0) y terminar en un punto (tf,0); es decir, deben haber dos interceptos en el eje x. También se puede notar que después del pico, la pendiente baja de forma cada vez más lenta.

El experimento de trazadores se realiza sobre un sistema dinámico con una conductividad propia, y para la investigación se agrega una cantidad de cloruro de sodio como trazador; por lo tanto se debe partir de una línea base o Background de conductividad para poder cuantificar los efectos del experimento en el cuerpo de agua.

Para la realización de los cálculos, es necesario hacer un previo tratamiento de los datos. Se eliminaron los valores repetidos al final de la curva, con el objetivo de obtener un punto final (tf,0). También se eliminaron valores que presentaban un comportamiento muy disperso respecto a la tendencia mostrada por el resto de datos. Se debe examinar la tendencia de la curva y cerciorarse de que ésta pase por el punto de origen. Puede ser que los datos se hayan empezado a tomar muy tarde y el punto cero no se pudo detectar, si ese es el caso, se debe realizar una extrapolación de datos. El primer dato debe ser (0,0), se debe considerar que estos datos no presentarán un cero absoluto debido a la incertidumbre del equipo utilizado. Si la curva presenta un cambio muy brusco, se deben adicionar los datos que hagan falta a criterio del investigador. Se calculó una regresión de orden 10, y con esta regresión se evaluaron los valores de X para los cuales Y=0. Se obtuvieron como límites de integración 0.2 y 2340 segundos.

Tabla IV-6: Tratamiento de datos del punto de detección 1.

Tiempo (s)	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm-447}$	Conc. g/l
0	447	0	0
10	458	11	0.00632456
25	461	14	0.00804944
50	464	17	0.00977432
100	469	22	0.01264912
125	469	22	0.01264912
150	472	25	0.014374
180	475	28	0.01609888
240	480	33	0.01897368
270	482	35	0.0201236
300	484	37	0.02127352
330	487	40	0.0229984
360	488	41	0.02357336

390	494	47	0.02702312
420	495	48	0.02759808
450	496	49	0.02817304
480	496	49	0.02817304
510	498	51	0.02932296
540	498	51	0.02932296
570	498	51	0.02932296
600	498	51	0.02932296
630	496	49	0.02817304
660	495	48	0.02759808
690	494	47	0.02702312
720	492	45	0.0258732
750	489	42	0.02414832
780	489	42	0.02414832
810	486	39	0.02242344
840	483	36	0.02069856
870	480	33	0.01897368
900	478	31	0.01782376
930	477	30	0.0172488
960	475	28	0.01609888
990	474	27	0.01552392
1020	470	23	0.01322408
1050	471	24	0.01379904
1080	468	21	0.01207416
1110	466	19	0.01092424
1140	466	19	0.01092424
1170	464	17	0.00977432
1200	462	15	0.0086244
1230	462	15	0.0086244
1260	460	13	0.00747448
1290	459	12	0.00689952
1320	458	11	0.00632456
1350	457	10	0.0057496
1380	457	10	0.0057496
1410	455	8	0.00459968
1440	455	8	0.00459968
1470	453	6	0.00344976
1500	453	6	0.00344976
1530	452	5	0.0028748

1560	452	5	0.0028748
1590	452	5	0.0028748
1620	451	4	0.00229984
1650	451	4	0.00229984
1680	450	3	0.00172488
1710	450	3	0.00172488
1740	450	3	0.00172488
1770	449	2	0.00114992
1800	449	2	0.00114992
1830	449	2	0.00114992
1860	449	2	0.00114992
1890	449	2	0.00114992
1920	448	1	0.00057496
1950	448	1	0.00057496
1980	448	1	0.00057496
2010	448	1	0.00057496
2040	448	1	0.00057496
2070	448	1	0.00057496
2100	448	1	0.00057496
2130	448	1	0.00057496
2160	447	0	0

Luego del tratamiento de los datos, se obtiene una curva de la siguiente forma:

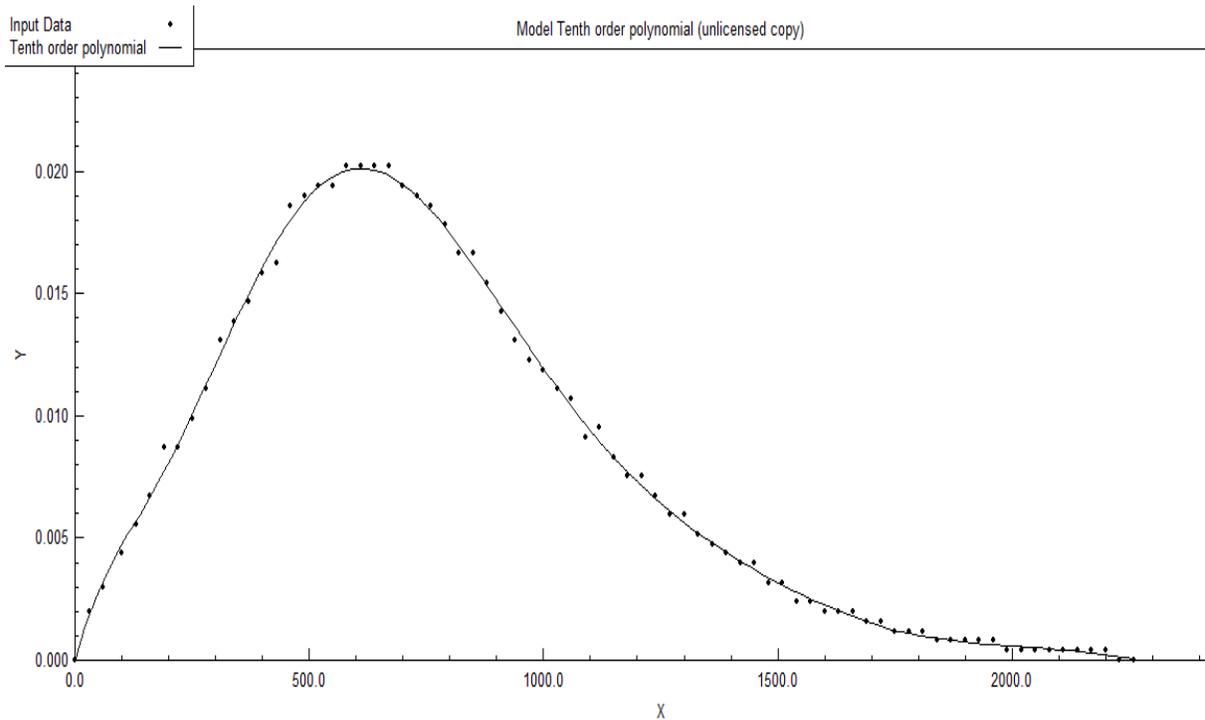


Figura IV-2: Gráfico de dispersión utilizando la curva de calibración experimental del punto de detección 1.

Luego del tratamiento de los datos, se obtuvo una curva típica de un estudio de trazadores, que se caracteriza por empezar en un punto (0,0) y termina en un punto final (tf,0).

A continuación se presentan los datos recolectados en el punto A10SUQUI, seleccionado como segundo punto de recolección de datos para la técnica de trazado, situado a aproximadamente 2625 metros del punto de inyección.

Tabla IV-7: Datos recolectados en el punto de detección 2.

Hora	$\mu\text{S/cm}$
16:18:17	446
16:18:47	446
16:19:17	447
16:19:47	447
16:20:17	447
16:20:47	448
16:21:17	448
16:21:47	448
16:22:17	449
16:22:47	449
16:23:17	450
16:23:47	451
16:24:17	451
16:24:47	452
16:25:17	452
16:25:47	453
16:26:17	454
16:26:47	454
16:27:17	456
16:27:47	456
16:28:17	457
16:28:47	458
16:29:17	459
16:29:47	460
16:30:17	461
16:30:47	462
16:31:17	463
16:31:47	464
16:32:17	465
16:32:47	466
16:33:17	467
16:33:47	467
16:34:17	468
16:34:47	469
16:35:17	469
16:35:47	470
16:36:17	470
16:36:47	471
16:37:17	472
16:37:47	472
16:38:17	472

Hora	$\mu\text{S/cm}$
16:38:47	473
16:39:17	473
16:39:47	473
16:40:17	473
16:40:47	473
16:41:17	473
16:41:47	473
16:42:17	473
16:42:47	473
16:43:17	473
16:43:47	473
16:44:17	472
16:44:47	472
16:45:17	472
16:45:47	471
16:46:17	471
16:46:47	470
16:47:17	470
16:47:47	469
16:48:17	469
16:48:47	469
16:49:17	468
16:49:47	468
16:50:17	467
16:50:47	466
16:51:17	466
16:51:47	465
16:52:17	465
16:52:47	464
16:53:17	464
16:53:47	463
16:54:17	463
16:54:47	462
16:55:17	462
16:55:47	461
16:56:17	461
16:56:47	460
16:57:17	459
16:57:47	459
16:58:17	458
16:58:47	458

Hora	$\mu\text{S/cm}$
16:59:17	458
16:59:47	457
17:00:17	457
17:00:47	456
17:01:17	456
17:01:47	456
17:02:17	455
17:02:47	455
17:03:17	455
17:03:47	454
17:04:17	454
17:04:47	454
17:05:17	454
17:05:47	453
17:06:17	453
17:06:47	453
17:07:17	452
17:07:47	453
17:08:17	452
17:08:47	452
17:09:17	452
17:09:47	452
17:10:17	451
17:10:47	451
17:11:17	451
17:11:47	451
17:12:17	451
17:12:47	450

Hora	$\mu\text{S/cm}$
17:13:17	450
17:13:47	450
17:14:17	450
17:14:47	450
17:15:17	450
17:15:47	450
17:16:17	450
17:16:47	450
17:17:17	449
17:17:47	450
17:18:17	449
17:18:47	449
17:19:17	449
17:19:47	449
17:20:17	449
17:20:47	449
17:21:17	449
17:21:47	449
17:22:17	449
17:22:47	449
17:23:17	449
17:23:47	449
17:24:17	449
17:24:47	449
17:25:17	449
17:25:47	449
17:26:17	448
17:26:47	449

Luego del tratamiento de los datos, se obtiene una curva de la siguiente forma:

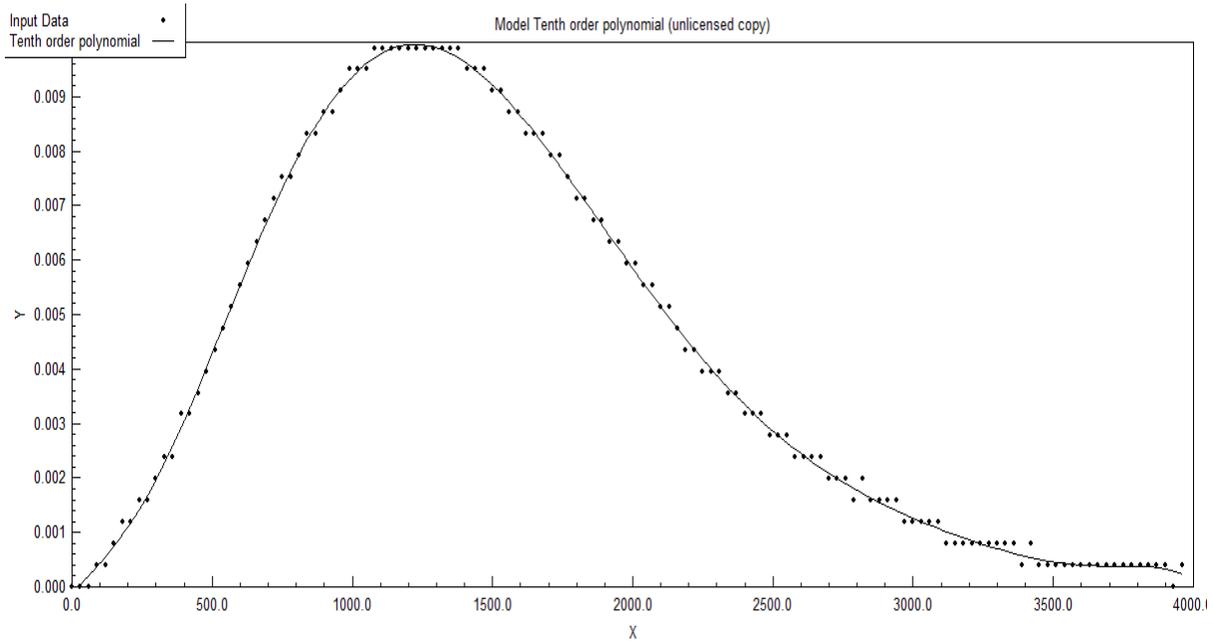


Figura IV-3: Gráfica de dispersión utilizando la curva de calibración experimental para el punto detector 2.

IV.2.1. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE FISCHER

Para el cálculo de los parámetros hidrodinámicos de la parte alta del Río Suquiapa, se utilizan los conceptos citados en la Tabla I.3, cuyo cálculo procede de la forma en que se describen, como parte de la caracterización de los sitios de aforo.

Para el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal en el Río Suquiapa, se tuvieron en consideración diferentes aspectos:

Según la teoría, el sistema se ha considerado un sistema abierto-abierto, ya que se tiene dispersión tanto aguas arriba como aguas abajo en cada punto de medición. Para el caso en estudio se consideró que no hay variación en el coeficiente de dispersión en z, y el impulso del trazador se inyecta en $z=0$ y $t=0$ (se considera el tiempo de inyección mucho menor con respecto al tiempo que tarda en detectarse la pluma así como el tiempo de detección).

También se tomaron en cuenta dos procedimientos para el cálculo de dicho coeficiente, el método empírico propuesto por Fischer; el cual no involucra los datos experimentales, del estudio de trazadores, sino únicamente los parámetros hidráulicos; el método propuesto por H.ScottFogler (ver sección I.5.3.2) el cual involucra completamente todo el estudio de dispersión (datos experimentales del estudio de trazadores y parámetros hidráulicos); una medición práctica realizada en campo a través de muestreo (paralela a la detección de conductividad); y el modelo matemático de Singh and Beck (I.3.6) a través de una resolución iterativa programada.

Los datos tabulados, en el capítulo III, para conductividades y tiempos en cada uno de los puntos detectores, fueron depurados, para el cálculo de regresiones de las curvas C vs. t, con la finalidad de obtener curvas mejor definidas.

Tabla IV-8: Procedimiento general del cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal según ecuación empírica de Fischer.

PASO	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
1	\bar{U}	Se obtiene la velocidad media a partir de los aforos realizados en cada punto identificado [m/s]
2	B	Ancho del río determinado directamente para cada punto de aforo.
3	D	Radio hidráulico, obtenido al ingresar los datos del aforo para cada punto.
4	$U^* = \bar{U}/10$	Velocidad de corte obtenida a partir de una regla general donde la misma es 1/10 veces la velocidad media.
5	$E_x = \frac{0.011(\bar{u}^2)(B^2)}{d * u^*}$	Sustituir los datos en la ecuación y obtener el coeficiente de dispersión longitudinal, [m ² /s]
6	±50%	Determinar el +50% y -50% para obtener el rango en el cual se deberá obtener el coeficiente de dispersión.

Para cada uno de los sitios de aforo se realizó este cálculo. Para fines de comparación, se presenta como ejemplo de cálculo el sitio A10SUQUI, ya que este sitio fue seleccionado también como punto de detector para la técnica de trazado.

$$\bar{U} = \frac{0.285 + 0.354 + 0.388 + 0.392 + 0.202 + 0.170 + 0.387 + 0.426 + 0.560 + 0.459 + 0.454 + 0.323 + 0.206}{13}$$

$$\bar{U} = 0.354 \frac{m}{s}$$

$$B = 13 m$$

$$D = \frac{\text{área sección}}{\text{perímetro mojado}}$$

$$\text{área sección} = \sum \text{área parcial}$$

$$\text{área sección} = 5.115 m^2$$

$$\text{perímetro mojado} = \left(\frac{\text{área sección}}{B} \right) * 2 + B$$

$$\text{perímetro mojado} = \left(\frac{5.115}{13} \right) * 2 + 13$$

$$\text{perímetro mojado} = 13.787 m$$

$$D = \frac{5.115 m^2}{13.787 m} = 0.371 m$$

$$U^* = \frac{\bar{U}}{10} = \frac{0.354}{10} = 0.0354 \frac{m}{s}$$

$$E_x = \frac{0.011(\bar{U}^2)(B^2)}{D * U^*}$$

$$E_x = \frac{0.011(0.354^2)(13^2)}{0.371 * 0.0354}$$

$$E_x = 17.738 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$+50\% = 26.607 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$-50\% = 8.869 \text{ m}^2/\text{s}$$

IV.2.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE LA ECUACIÓN DE SINGH Y BECK

El segundo método a utilizar para la evaluación del coeficiente de dispersión longitudinal D, requiere la utilización del modelo presentado por Singh y Beck, que es una solución a la ecuación general de transporte:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

La solución presentada por Singh y Beck se presenta a continuación:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

El procedimiento de cálculo consiste en calcular los valores modelados para el punto de detección 2 a partir de los datos experimentales del punto de detección 1; de la siguiente forma:

$$c_{2m} = \frac{c_1 * \text{pulso}}{Cd}$$

Siendo:

C_{2m} : valor de la concentración modelado para el punto de detección 2 a partir del punto de detección 1.

C_1 : valor de la concentración del punto detector 1.

Cd: coeficiente de dilución.

Pulso: diferencia entre el valor de la función pulso de la concentración respecto al dato anterior; de la siguiente forma:

$$\text{pulso}(i) = \text{función pulso}(i) - \text{función pulso}(i - 1)$$
$$\text{función pulso} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \text{erfc} \left(\frac{x + vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

Los cálculos se realizaron utilizando el valor de velocidad obtenida con la técnica de aforo por vadeo en el sitio A10SUQUI; es decir el punto detector 2. Además de la velocidad advectiva, se mantuvo constante el valor de la distancia entre los dos puntos detectores, y se utilizaron como variables de ajuste el coeficiente de dilución y el coeficiente de dispersión.

Luego se graficó la curva de concentración vs. Tiempo tanto para la curva experimental como la modelada, y se produjo el desfase en el eje x necesario para facilitar su comparación visual. La curva que se obtuvo se muestra a continuación.

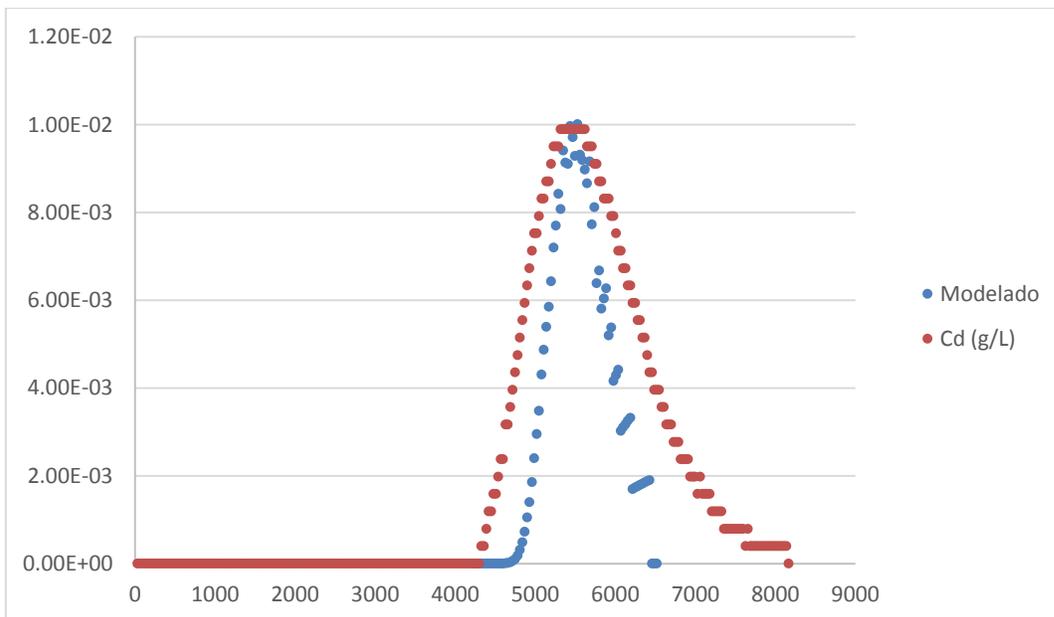


Figura IV-4: Curvas de medición y modelado para la generación de datos del punto detector 2

utilizando la ecuación de Singh y Beck (Curva de calibración experimental, ppm).

En el cuadro que se presenta a continuación se muestran los parámetros que describen el modelo presentado en la figura anterior (ver anexo E).

Tabla IV-9: Valores obtenidos con ecuación de Singh y Beck para la generación de una curva modelada para el detector 2.

Parámetro	Valor
Velocidad de la nube	0.354 m/s
Distancia	1880 m
Coefficiente de dispersión	134 m ² /s
Coefficiente de dilución	1.0

IV.2.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE FOGLER

IV.2.3.1. Cálculos en Punto de detección 1

Punto de detección 1

A continuación se presenta la curva de los datos recolectados y tratados y la respectiva regresión.

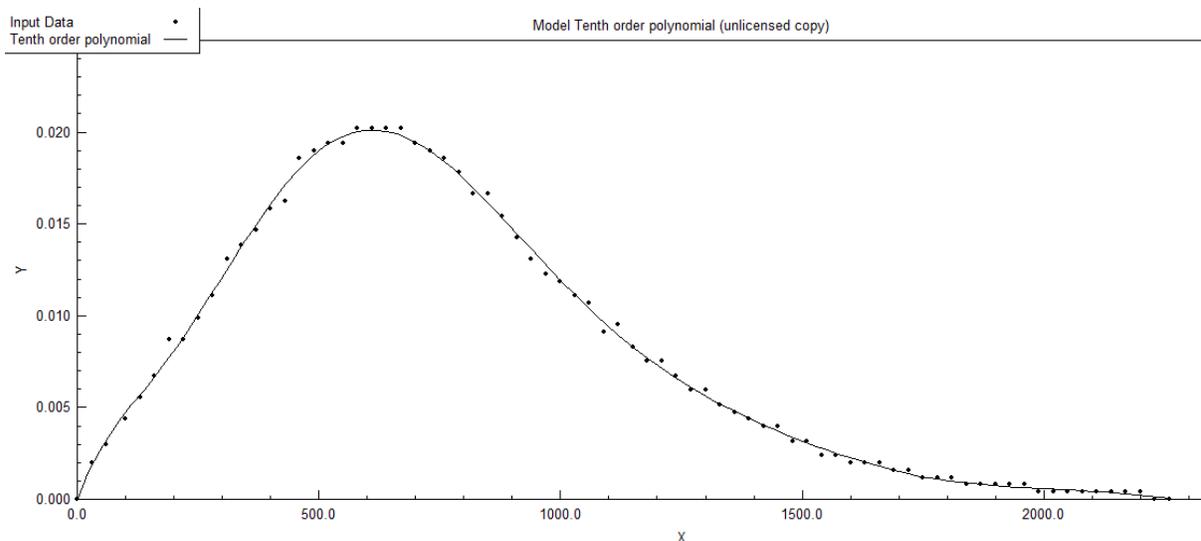


Figura IV-5: Gráfico de la regresión y datos de dispersión obtenidos para la curva de detección 1.

Se calcula una regresión de la siguiente forma:

$$C\left(\frac{g}{l}\right) = at^{10} + bt^9 + ct^8 + dt^7 + et^6 + ft^5 + gt^4 + ht^3 + it^2 + jt + k$$

Tabla IV-10: Valores de las variables de regresión para la curva concentración-tiempo en el punto de detección 1.

Variable	Value
a	-9.62376757395376E-33
b	1.39247339740452E-28
c	-8.55046339010427E-25
d	2.90582025992545E-21
e	-5.95782020942826E-18
f	7.50210416568255E-15
g	-5.61705608876116E-12
h	2.28688408281425E-09
i	-4.58192904799483E-07
j	7.56949898402752E-05
k	-7.42958673859541E-05
R²	0.9983223009

A continuación se presenta la gráfica del error residual para la regresión de orden a la 10 obtenida para el punto de detección 1 con un coeficiente de determinación múltiple de 0.9983223009 a partir de la curva de calibración obtenida experimentalmente. Se puede observar que los datos no presentan ninguna tendencia y por lo tanto se acepta el ajuste de la regresión.

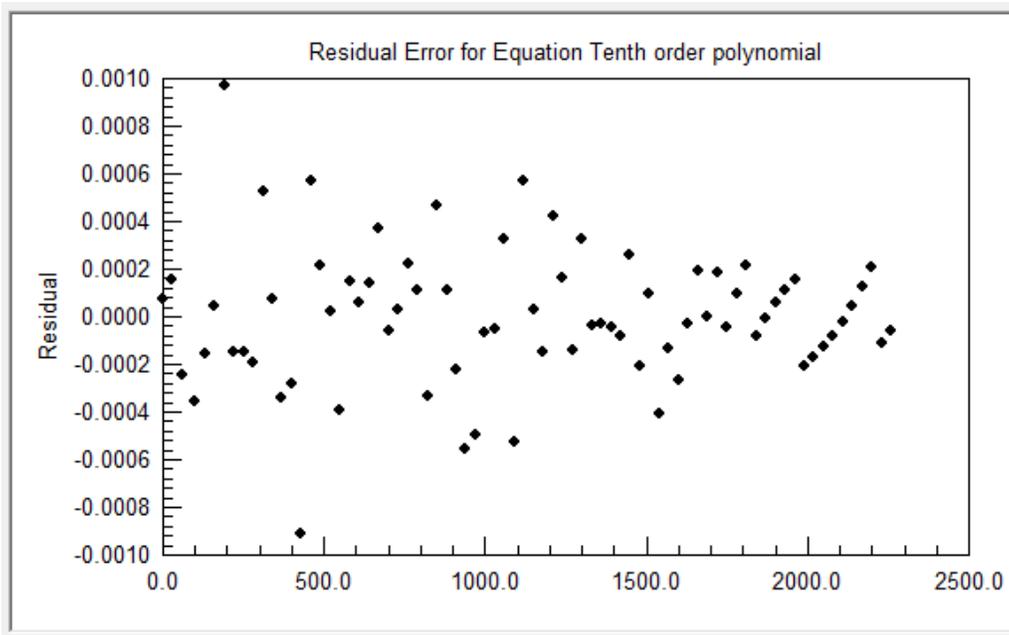


Figura IV-6: Gráfico de error residual para la regresión obtenida en el punto de detección 1.

Asimismo, se presenta el gráfico de probabilidad normal residual para la misma regresión. Se puede considerar que los datos poseen una distribución cercana a la distribución normal con media cero, ya que la línea de tendencia no pasa por el origen.

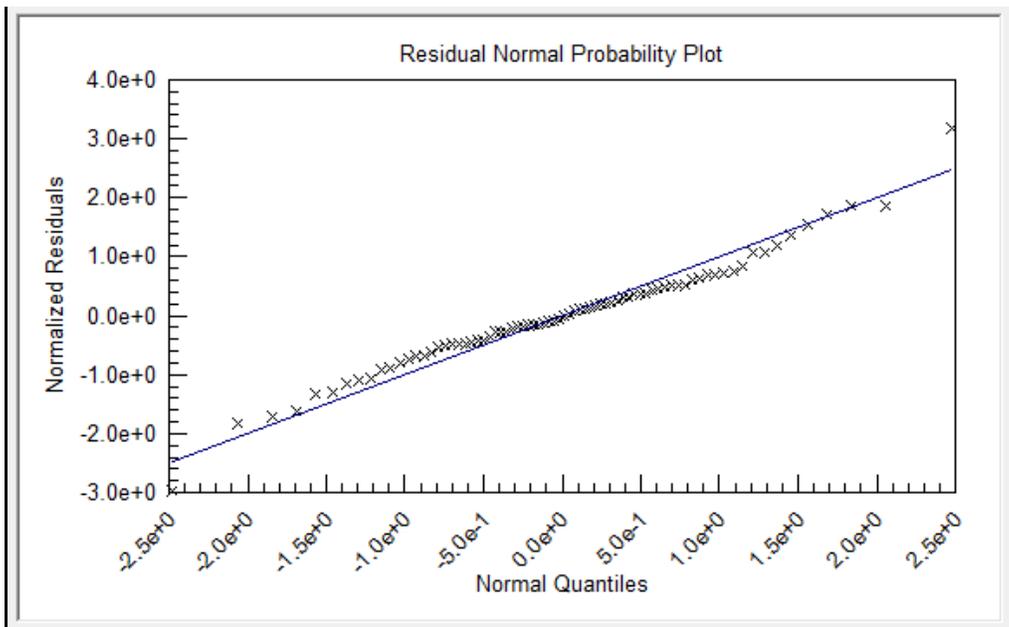


Figura IV-7:Gráfico de Probabilidad normal residual para la regresión obtenida para el punto de detección 1.

Calculando la intersección con el eje de las coordenadas:

$$\begin{aligned}
 0 = & -9.62376757395376E - 33t^{10} + 1.39247339740452E - 28t^9 - 8.55046339010427E - 25t^8 \\
 & + 2.90582025992545E - 21t^7 - 5.95782020942826E - 18t^6 \\
 & + 7.50210416568255E - 15t^5 - 5.61705608876116E - 12t^4 \\
 & + 2.28688408281425E - 09t^3 - 4.58192904799483E - 07t^2 \\
 & + 7.56949898402752E - 05t - 7.42958673859541E - 05
 \end{aligned}$$

t=2280

Evaluando valores de X para la función, se encuentra que a t=2280 se acerca al y=0, por lo tanto se tomará este valor como punto final para la integración.

$$\begin{aligned}
 \int_0^{2280} & (-9.62376757395376E - 33t^{10} + 1.39247339740452E - 28t^9 - 8.55046339010427E \\
 & - 25t^8 + 2.90582025992545E - 21t^7 - 5.95782020942826E - 18t^6 \\
 & + 7.50210416568255E - 15t^5 - 5.61705608876116E - 12t^4 \\
 & + 2.28688408281425E - 09t^3 - 4.58192904799483E - 07t^2 \\
 & + 7.56949898402752E - 05t - 7.42958673859541E - 05)dt
 \end{aligned}$$

=18.07831444691

Utilizando integración numérica se obtiene:

$$\int C(t)dt = 18.06792$$

Función de tiempos de residencia E(t)

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{2280} C(t)dt}$$

Tabla IV-11: Valores de las variables de regresión para la curva de Distribución de Tiempos de Residencia para el punto detector 1.

E(t)
-5.3264391108405E-34
7.7068826815955E-30
-4.7324005143394E-26
1.6082760273044E-22
-3.2974577092594E-19
4.1521681331789E-16
-3.1088559661329E-13
1.2657151917953E-10
-2.5359471638101E-08
4.1894689505087E-06
-4.1120321202415E-06

Comprobación:

$$\int_0^{2310} E(t) dt = 1.0006287240479$$

$$tm = \int_0^{\infty} tE(t) dt$$

$$tm = 750 \text{ s} = 12.506346 \text{ min} = 0.20 \text{ horas}$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - tm)^2 E(t) dt$$

$$\sigma^2 = 150,121.63600147$$

$$\sigma = 387.455$$

Cálculo de Peclet: utilizando la ecuación propuesta por Fogler para sistema abierto-abierto cuando se desconoce el tiempo espacial. Este caso surge cuando hay zonas de agregación muerta o estancadas en el sistema junto con efectos de dispersión.

$$\frac{\sigma^2}{tm^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$$

$$\frac{150,121.63600147}{750.3807524^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$$

$$Pe = 7.142549673407$$

$$tm = \left(1 + \frac{2}{pe_r}\right)\tau$$

$$750.3807524 = \left(1 + \frac{2}{7.142549673407911}\right)\tau$$

$$\tau = 586.22944249076 \text{ s}$$

$$\frac{tm}{\tau} = \frac{750.3807524}{586.22944249076} = 1.28$$

$$pe = \frac{Ul}{D_a}$$

Utilizando la distancia del punto de detección hasta el detector 1:

$$l = 797.48 \text{ m.}$$

Cálculo de la velocidad advectiva:

$$U = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{797.48 \text{ m}}{750.3807524 \text{ s}} = 1.0627671317 \text{ m/s}$$

Utilizando la definición de Número de Peclet:

$$Pe = \frac{Ul}{D_a}$$

$$7.142549673407 = \frac{(1.165096 \frac{\text{m}}{\text{s}})(797.48 \text{ m})}{D_a}$$

$$D_a = 118.66008232093$$

IV.2.3.2. CÁLCULOS EN PUNTO DE DETECCIÓN 2

Se calcula una regresión de la siguiente forma:

$$C\left(\frac{g}{l}\right) = at^{10} + bt^9 + ct^8 + dt^7 + et^6 + ft^5 + gt^4 + ht^3 + it^2 + jt + k$$

Tabla IV-12: Valores de las variables de regresión para la curva Concentración-tiempo para el punto detector 2.

Variable	Value
a	-1.34252549521233E-35
b	2.84295938372956E-31
c	-2.64309337731063E-27
d	1.41006200732292E-23
e	-4.69498525535578E-20
f	9.80985618449998E-17
g	-1.19985416805569E-13
h	6.91390998268797E-11
i	-8.37638892552587E-09
j	5.85540306680091E-06
k	-1.29068888666635E-04
R²	0.9987818167

A continuación se presentan la gráfica de la regresión obtenida y la gráfica de puntos para el punto de detector 2.

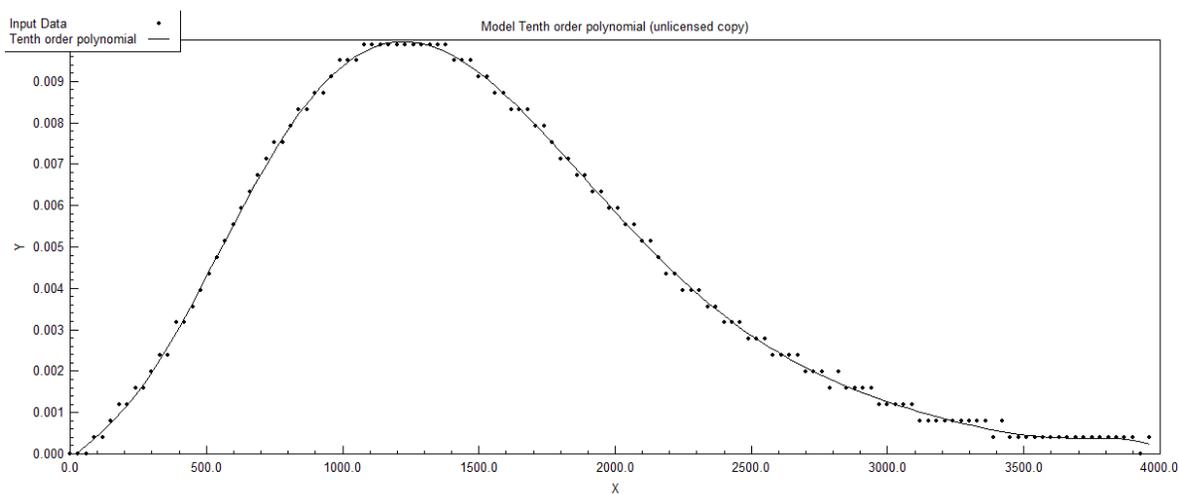


Figura IV-8: Gráfico de la regresión obtenida para los datos del punto detector 2.

Para el punto detector 2, se presenta el gráfico de dispersión de residuos para la regresión obtenida de orden a la 10 con un coeficiente de determinación múltiple de 0.9987818167 con la curva de calibración obtenida experimentalmente. Se puede observar que los datos residuales presentan un comportamiento aleatorio, confirmando un buen ajuste de la regresión.

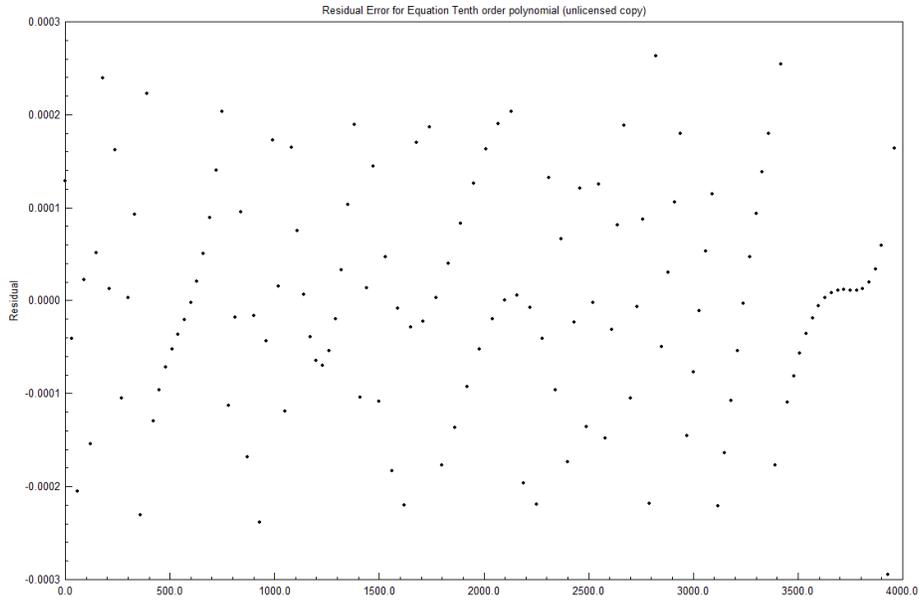


Figura IV-9: Gráfico de error residual para la regresión obtenida para el punto detector 2.

En la gráfica de probabilidad normal de residuos se puede observar un ajuste adecuado, ya que los datos residuales presentan un comportamiento típico de una curva normal con errores independientes.

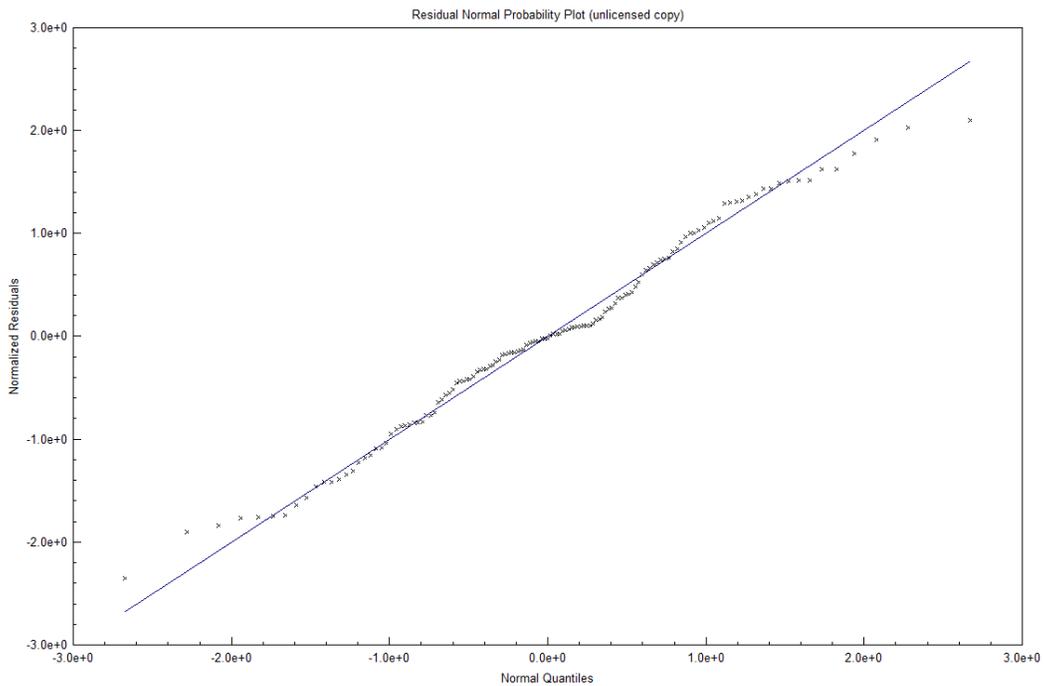


Figura IV-10: Gráfico de probabilidad normal residual para la regresión del punto detector 2.

Calculando la intersección con el eje de las coordenadas:

$$\begin{aligned}
 0 = & -1.34252549521233E - 35t^{10} + 2.84295938372956E - 31t^9 - 2.64309337731063E - 27t^8 \\
 & + 1.41006200732292E - 23t^7 - 4.69498525535578E - 20t^6 \\
 & + 9.80985618449998E - 17t^5 - 1.19985416805569E - 13t^4 \\
 & + 6.91390998268797E - 11t^3 - 8.37638892552587E - 09t^2 \\
 & + 5.85540306680091E - 06 + -3.52560327930532E - 0 - 1.29068888666635E \\
 & - 04
 \end{aligned}$$

t=4,023.03 s.

Evaluando la función para valores de X, se obtuvo un intercepto en el eje X en el valor de 4023 segundos.

$$\begin{aligned}
 \int_0^{4023} & (-1.34252549521233E - 35t^{10} + 2.84295938372956E - 31t^9 - 2.64309337731063E \\
 & - 27t^8 + 1.41006200732292E - 23t^7 - 4.69498525535578E - 20t^6 \\
 & + 9.80985618449998E - 17t^5 - 1.19985416805569E - 13t^4 \\
 & + 6.91390998268797E - 11t^3 - 8.37638892552587E - 09t^2 \\
 & + 5.85540306680091E - 06 + -3.52560327930532E - 0 - 1.29068888666635E \\
 & - 04)dt
 \end{aligned}$$

=16.796026981879

Utilizando integración numérica se obtiene:

$$\int C(t)dt = 16.78287$$

Tabla IV-13: Valores de las variables de regresión para la curva de distribución de tiempos de residencia del punto detector 2.

E(t)
-7.999379696156E-37
1.693964967690E-32
-1.574875678183E-28
8.401793062348E-25
-2.797486517715E-21
5.845160085552E-18
-7.149278806639E-15
4.119623153065E-12
-4.991034862050E-10
3.488916417038E-07
-7.690513521623E-06

Comprobación:

$$\int_0^{4023} E(t) dt = 1.00007839$$

$$tm = \int_0^{\infty} tE(t) dt$$

$$tm = 1,496.6525323615 \text{ s} = 24.944208 \text{ min}$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - tm)^2 E(t) dt$$

$$\sigma^2 = 503,573.17085306$$

$$\sigma = 709.629$$

$$\frac{503,573.17085306}{1,496.6525323615^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$$

$$Pe = 8.5782909906995$$

$$tm = \left(1 + \frac{2}{pe_r}\right) \tau$$

$$1,496.6525323615 = \left(1 + \frac{2}{8.5782909906995}\right) \tau$$

$$\tau = 1,213.6857405276$$

$$\frac{tm}{\sigma} = \frac{1,496.6525323615}{1,213.6857405276} = 1.23315$$

$$pe = \frac{Ul}{D_a}$$

Con velocidad advectiva de vadeo

$$8.5782909906995 = \frac{(0.354178016 \frac{m}{s})(2643.57m)}{D_a}$$

$$D_a = 109.14695931535$$

Cálculo del caudal mediante integración física

Se realizó el cálculo del caudal mediante la técnica del trazado utilizando integración física; tomando una muestra de volumen constante de agua continuamente en un recipiente y al final de la toma de datos, se mide la concentración promedio del total de muestras diluidas.

$$Q = \frac{M}{\sum C * t} \left[\frac{gr}{L} * s = \frac{L}{s} \right]$$

M=150 lb=68,038.8555 gr.

Punto de detección 1:

Conductividad promedio: 465 μ S/cm $\Delta t=2,360$ s. Background=447 μ S/cm

$$\Delta \text{Conductividad} = 465 - 447 = 18$$

Concentración = $0.0104292 \frac{g}{l}$

$$Q = \frac{68,038.855 \text{ gr}}{0.0104292 \frac{g}{l} * 2,360s} = 2,764.356184 \frac{l}{s} = 2.7644 \frac{m^3}{s}$$

Punto de detección 2:

Conductividad promedio: 459 μ S/cm $\Delta t=4,250$ s. Background=448 μ S/cm

$$\Delta \text{Conductividad} = 465 - 448 = 17$$

$$\text{Concentración} = 0.0063734 \frac{g}{l}$$

$$Q = \frac{68,038.855 \text{ gr}}{0.0063734 \frac{g}{l} * 4,250s} = 2,511.868464 \frac{l}{s} = 2.5119 \frac{m^3}{s}$$

Se puede observar que los valores de caudal obtenidos mediante esta técnica de cálculo son similares al caudal que obtuvo mediante la técnica de vadeo en el sitio A10SUQUI se 1.812 m^3/s .

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

V.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS OBTENIDOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO.

En la figura V.1 se resume el aumento del caudal del río Suquiapa luego de la contribución de sus tributarios, iniciando con el caudal del punto A01SUQUI, que fue el punto donde se inició el presente estudio, hasta el punto A18SUQUI.

El caudal del punto A18SUQUI es igual a la suma del caudal del río principal más la de todos los contribuyentes que desembocan sus aguas en el río Suquiapa. Esa es la razón por la que el caudal en el último punto es mayor.

A continuación se presenta la gráfica de distribución de caudales a lo largo del cauce principal del Río Suquiapa, sin tomar en cuenta (de forma gráfica) los aportes de los tributarios identificados.

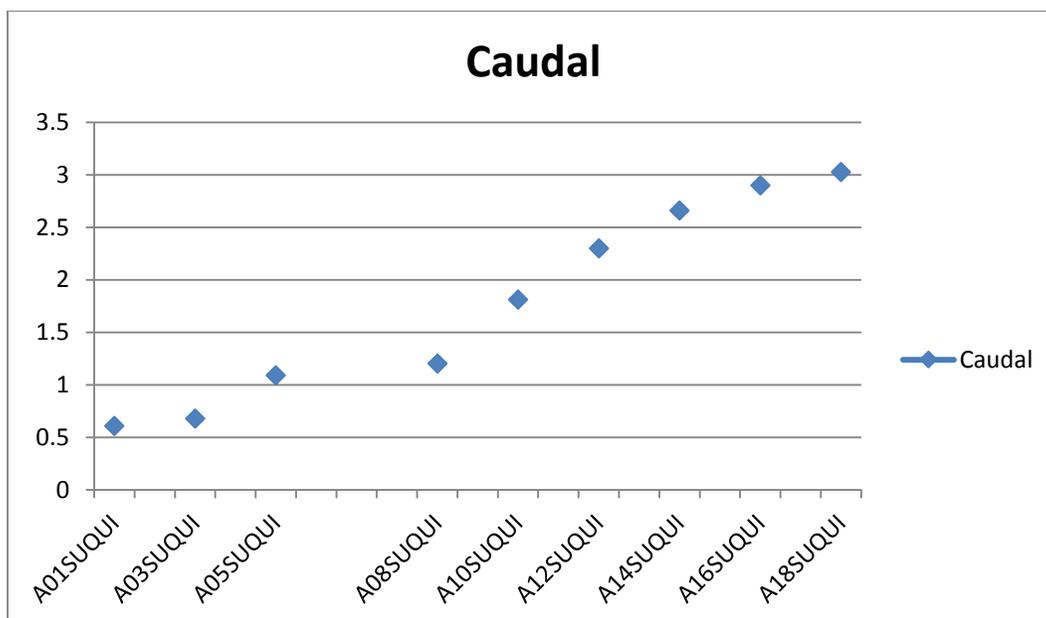


Figura V-1: Distribución de caudales a lo largo del río principal.

En la figura V-2 se puede observar la velocidad media de cada punto de estudio del río principal. Se observa que el punto con mayor velocidad es el A18SUQUI, y esto es debido a que el ancho de la sección es menor en este punto y el caudal es bastante alto, ya que captura todo el caudal de los sitios anteriores más sus tributarios. Se puede determinar que a mayor ancho de sección menor es la velocidad.

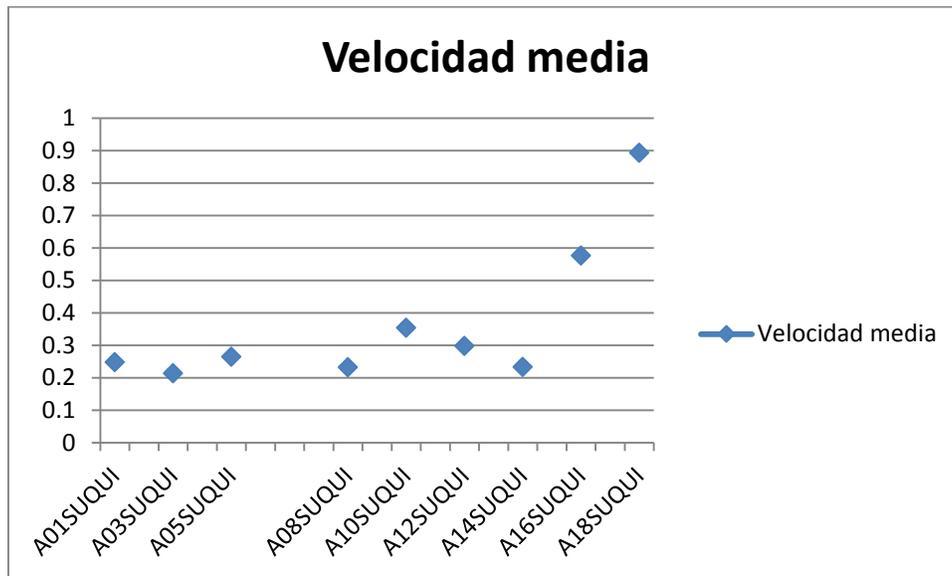


Figura V-2: Gráfico de dispersión de valores de la velocidad media a lo largo del río principal.

El ancho de la sección es inversamente proporcional a la velocidad media de la corriente, a mayor ancho de sección menor es la velocidad y a menor ancho mayor velocidad. Se puede observar que los sitios de mayores valores de ancho de la sección y área transversal, es decir, los sitios A12SUQUI y A14SUQUI, presentan valores de velocidad cercanos al promedio. Sin embargo, el sitio de menores dimensiones, el sitio A18SUQUI, presenta un valor de velocidad bastante alto, ya que la relación entre la velocidad y ancho de la sección son inversamente proporcionales.

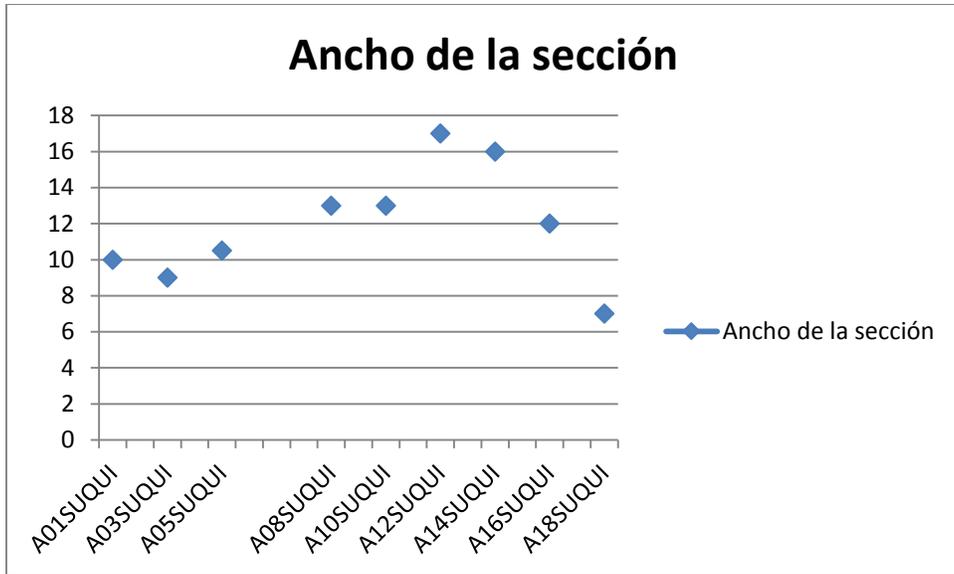


Figura V-3: Gráfico de dispersión de los valores del ancho de la sección a lo largo del río principal.

La figura V-4 resume el perímetro mojado de cada uno de los puntos del río principal que se analizaron.

Se le llama perímetro mojado a la línea de contacto entre el lecho y el agua y su valor es un poco más alto que el del ancho de la sección. El perímetro mojado está relacionado directamente con el ancho de sección.

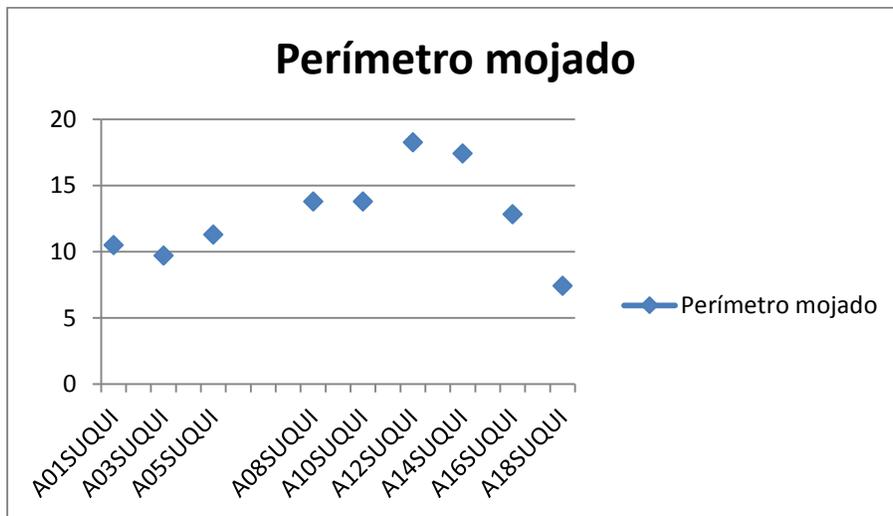


Figura V-4: Gráfico de dispersión de los valores de perímetro mojado a lo largo del río principal.

En la figura V-5 se observa el cambio del radio hidráulico en cada punto estudiado del río principal.

El radio hidráulico se obtiene del cociente del área de la sección entre el perímetro mojado. Está ligado también con la profundidad de la sección. El radio hidráulico será mayor cuando la profundidad o el ancho sean mayores.

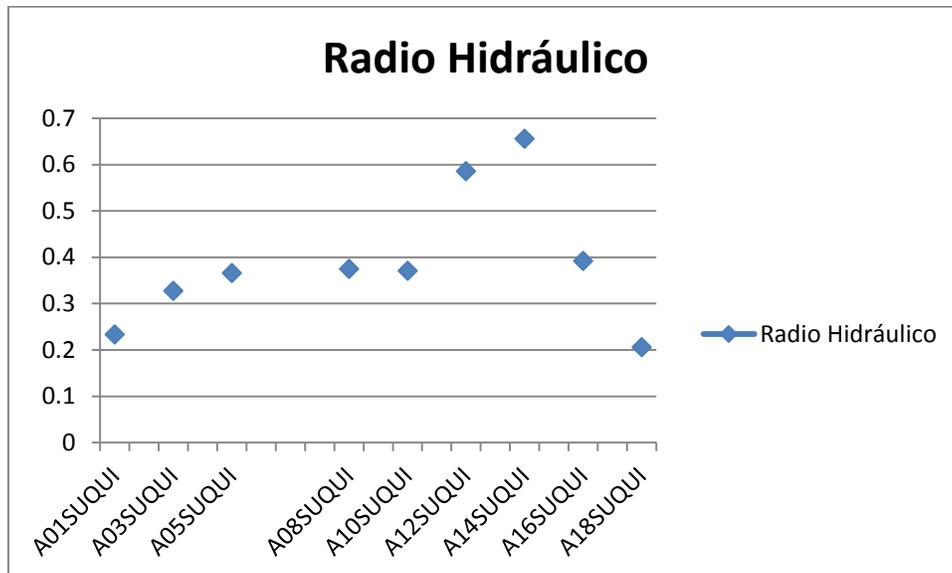


Figura V-5: Gráfico de dispersión de los valores de radio hidráulico a lo largo del río principal.

En la figura V-8 se observa los cambios en la profundidad a lo largo del río principal, la profundidad influye principalmente en la velocidad, de igual forma al ancho de la sección es inversamente proporcional a la velocidad. Ya que a mayor profundidad la velocidad media será menor.

Y como se mencionaba anteriormente la profundidad está ligada de igual forma al radio hidráulico.

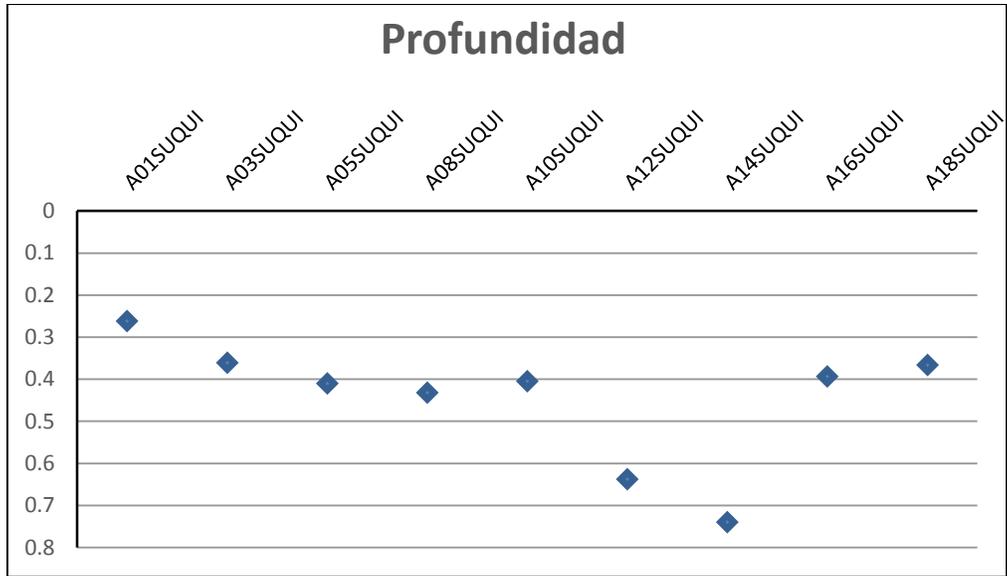


Figura V-6: Gráfico de dispersión de valores de profundidad a lo largo del río principal.

PROFUNDIDADES DE SITIOS MÁS REPRESENTATIVOS

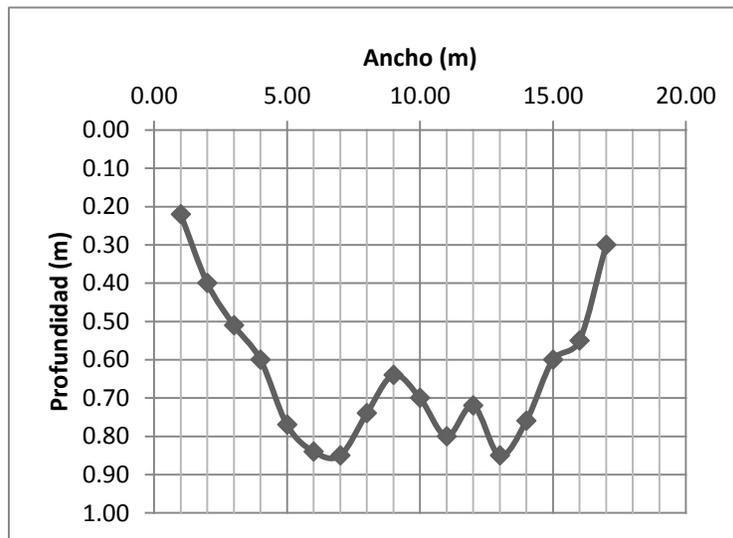


Figura V-7: Gráfico de profundidad sitio A12SUQUI.

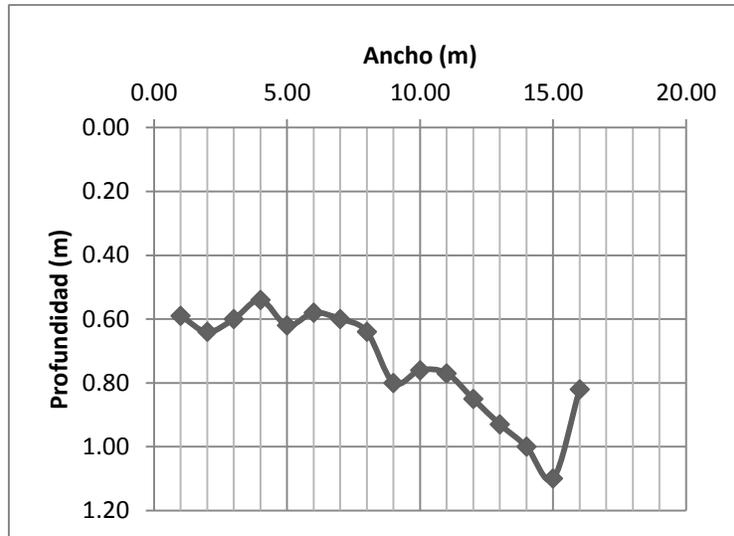


Figura V-8: Gráfico de profundidad sitio A14SUQUI.

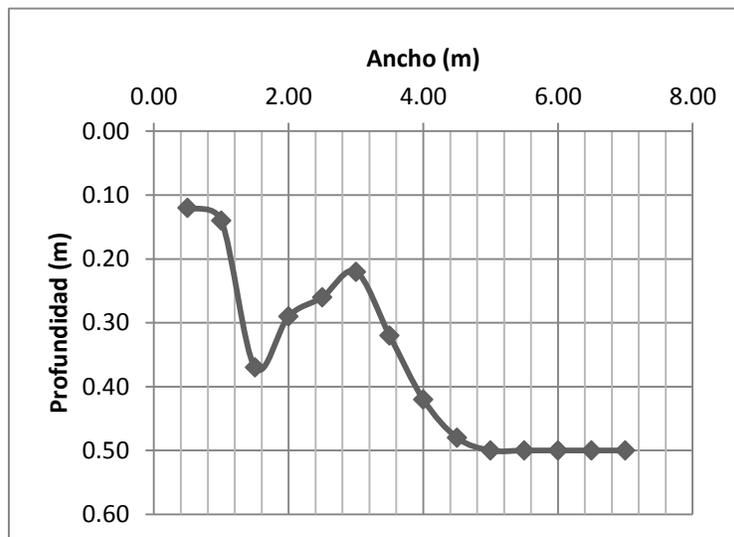


Figura V-9: Gráfico de profundidad sitio A18SUQUI.

En la figura V-9 se observan los distintos coeficientes de dispersión a lo largo del río principal. El método de Fischer depende únicamente de la velocidad media, el ancho de la sección, el radio hidráulico.

En el gráfico se observa que el punto con menor coeficiente de dispersión es A03SUQUI, debido a que su velocidad media es pequeña.

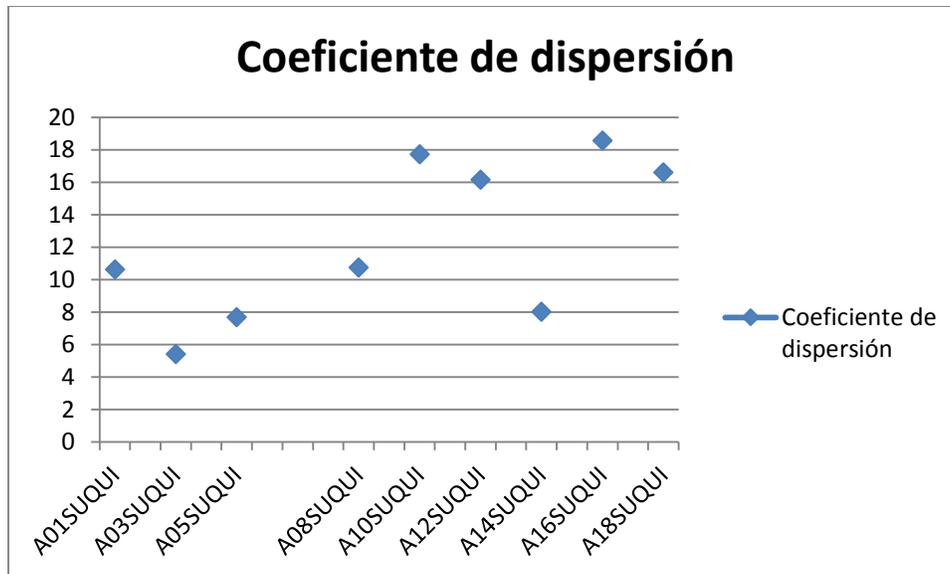


Figura V-10: Gráfico de dispersión de valores de coeficiente de dispersión mediante el método de Fischer a lo largo del río principal.

V.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE EL ESTUDIO DE TRAZADORES.

V.2.1. RESULTADOS OBTENIDOS CON MÉTODO DE FOGLER

Tabla V-1: Tabla resumen de parámetros hidrodinámicos obtenidos mediante el método de Fogler.

Punto detector	Tiempo final	t_m	σ^2	Pe	U	D	τ
Punto detector 1	2,280 s	750 s	150,121.63	7.1425	1.0627	118.6600	586.229
Punto detector 2	4,023	1,496.6525s	503,573.1708	8.5782	0.354	109.14695	1,213.6833

Se puede observar que como se puede esperar, la velocidad advectiva obtenida mediante la técnica de aforo por vadeo conduce a un valor aceptable de coeficiente de dispersión para el caso del punto detector 2, que coincidía con el sitio A10SUQUI. Sin embargo, para el caso del punto detector 1; donde no se obtuvo un valor de velocidad advectiva debido a que no se realizó el aforo

por vadeo, ya que no forma parte de la red seleccionada de sitios tributarios y sitios antes y después de tributarios; la velocidad advectiva fue calculada mediante los datos experimentales del experimento de trazadores. La integral de la función de distribución de tiempos de residencia debe dar un valor cercano a la unidad, ya que por definición, la integral de la distribución de tiempos de residencia representa la suma de la fracción de cada concentración sobre el aporte, y estos al ser sumados o integrados se obtiene un valor del 100%.

Es importante recalcar también la relación tm/τ ; siendo tm el tiempo medio de residencia de las partículas o contaminantes dentro del sistema; y τ el tiempo espacial sin dispersión. Este cociente para el detector 1 tiene un valor de 1.28 y de 1.233 para el detector 2; por lo tanto, el fenómeno de dispersión aporta una variación de aproximadamente un 20-30% en el valor del tiempo medio de residencia.

El coeficiente de dispersión obtenido en el punto detector 1 es 8.71% mayor que el obtenido en el punto detector 2. Los valores de números de Peclet obtenidos también son similares, siendo el número de Peclet del segundo detector 20.1% mayor que el del primero. A partir de estos valores se puede afirmar que la dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo; sin embargo debe tomarse en cuenta el efecto transversal de la difusión molecular; ya que la técnica lo considera uniforme.

Además, es notorio que los valores de Peclet fueron obtenidos de una ecuación para un sistema abierto-abierto; en el que hay zonas de agregación muertas o estancadas en el reactor o sistema de estudio junto con efectos de dispersión. Al ser esta ecuación la que proporcionó mejores valores de coeficiente de dispersión, se puede inferir que, a pesar de la cuidadosa selección de sitios a aforar ya sea por la técnica de vadeo o por la técnica de trazado, las zonas muertas a lo largo del cuerpo de agua tienen un efecto significativo en el fenómeno de transporte de contaminantes químicos.

V.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS CON ECUACIÓN DE SINGH Y BECK

En la tabla a continuación se muestran los resultados obtenidos mediante la ecuación de Singh y Beck.

Tabla V-2: Resumen de parámetros hidrodinámicos obtenidos por medio de la ecuación de Singh y Beck.

	Parámetro	Valor
Modelado de punto detector 2 a partir del punto detector 1.	D	134
	v	0.354
	Cd	1
	x	1880

El valor obtenido de coeficiente de dispersión en el punto detector 2 posee un valor 11.67% mayor que el valor obtenido para el punto detector 1. A diferencia del método de Fogler, la ecuación de Singh y Beck considera ambos puntos de detección y el coeficiente de dispersión describe a un solo sistema.

V.2.3. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE FOGLER Y ECUACIÓN DE SINGH Y BECK

El coeficiente de dispersión obtenido mediante el método de Fogler para el punto de detección 1, presenta un valor de 118.6600823209 m²/s. La curva modelada con el método de Fogler muestra un ajuste bastante cercano a la curva experimental.

En la figura que se presenta a continuación se puede observar que la regresión de orden 10 obtenida mediante el método de Fogler es la que más se ajusta a los datos experimentales en el punto de detección 2. La curva obtenida con el modelado de la ecuación de Singh y Beck presenta un área bajo la curva de 8.5753; es decir, 48.9% menor respecto al valor obtenido mediante la regresión utilizada para el método de Fogler (16.78287).

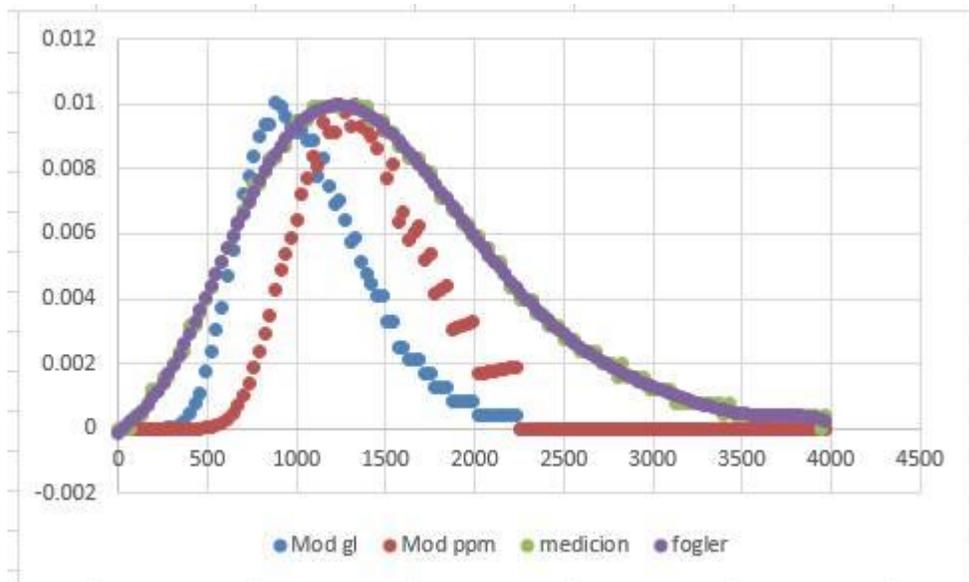


Figura V-11: Gráfico de curva de modelados obtenidos mediante Ecuación de Singh y Beck y Fogler respecto a la curva de datos experimentales.

El coeficiente de dispersión obtenido con el método de Fogler para este punto detector es de $109.14695931535 \text{ m}^2/\text{s}$ y el valor obtenido con la Ecuación de Singh y Beck es de $134 \text{ m}^2/\text{s}$; siendo este último valor 22.77% más grande que el primero. La ecuación de Singh y Beck considera además, como parámetro de ajuste, el coeficiente de dilución, que en este caso resulta un valor de 1. Considerando que el estudio de trazado se hizo para una inyección puntual, la duración de la inyección de aproximadamente 15 minutos debió haber afectado la dilución; alterando de esta forma las curvas; especialmente la generada mediante la ecuación de Singh y Beck; que considera el efecto de la dilución.

V.3: PARÁMETROS DE CAMPO RECOLECTADOS

A continuación se presenta la evolución de la temperatura a lo largo del tramo del río principal estudiado, presentando un valor promedio de $26.84 \text{ }^\circ\text{C}$; presentando los valores más altos en los últimos sitios.

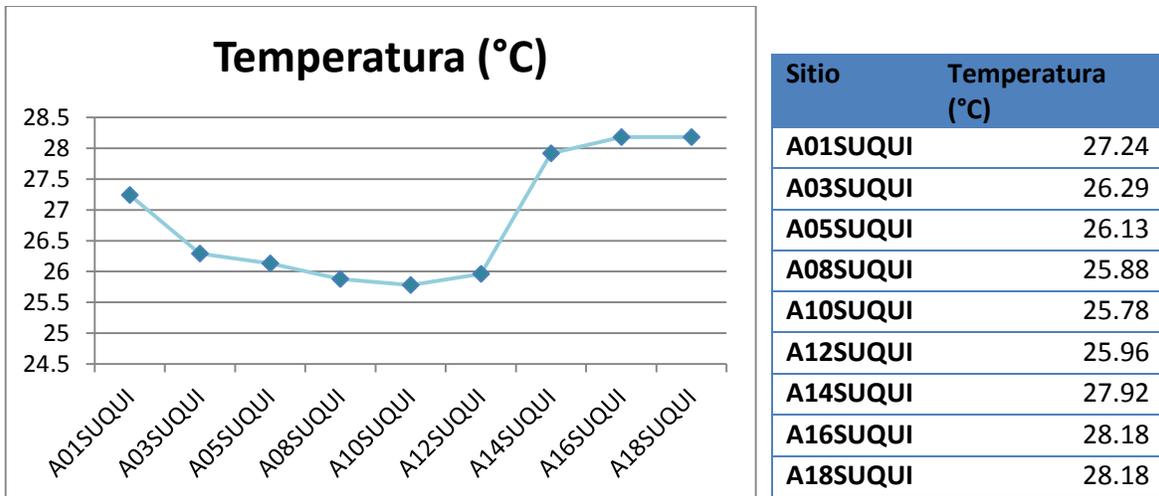


Figura V-12: Gráfica de temperatura medida a lo largo del río principal.

Además, se presentan los valores de pH obtenidos. El valor promedio de pH es de 7.67; presentando el valor más alto el sitio A01SUQUI, presentando una tendencia a disminuir en el punto A18SUQUI con un valor de 6.73. Algunos de los factores que influyen en el factor temperatura son el porcentaje de sombra del sitio y el clima del día en el que se tomaron las medidas, ya que no se tomaron en el mismo día.

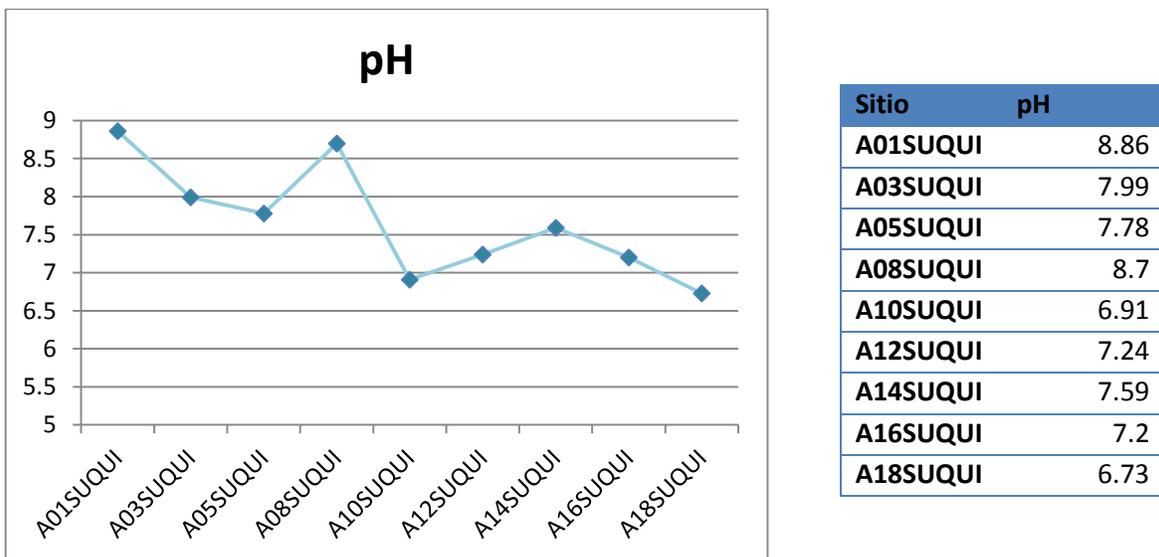
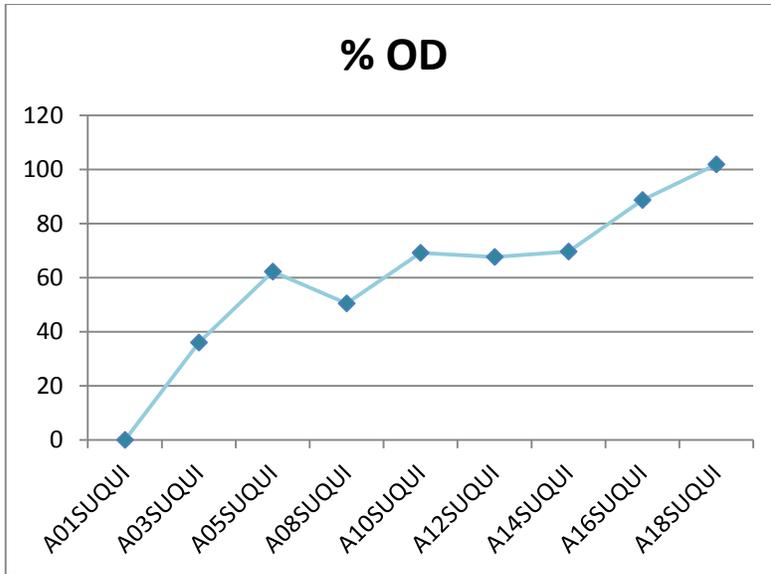


Figura V-13: Gráfica de pH medido a lo largo del río principal.

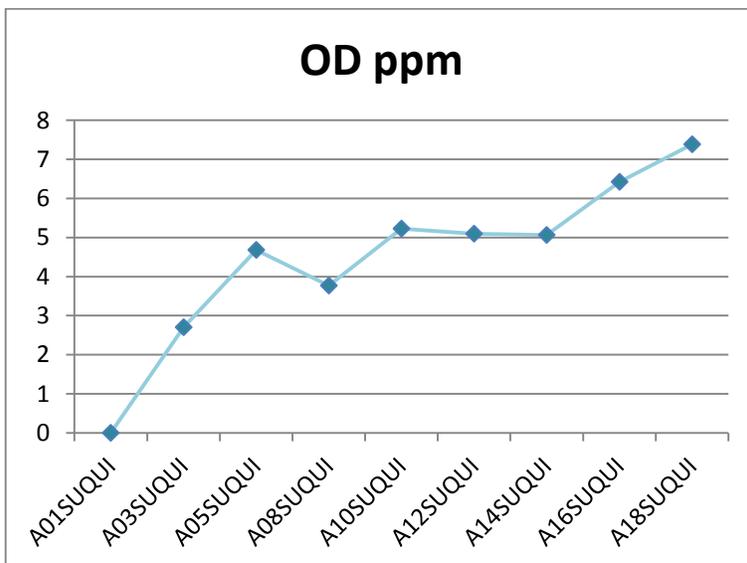
El valor promedio del porcentaje de oxígeno disuelto es de 60.66; se puede observar una notoria tendencia de mayor porcentaje de Oxígeno Disuelto al ir aguas abajo en el río.



Sitio	% OD
A01SUQUI	0
A03SUQUI	36
A05SUQUI	62.2
A08SUQUI	50.5
A10SUQUI	69.2
A12SUQUI	67.7
A14SUQUI	69.7
A16SUQUI	88.7
A18SUQUI	101.9

Figura V-14: Valores de porcentaje de Oxígeno Disuelto a lo largo del río principal.

Por lo tanto, se espera que la concentración de Oxígeno en partes por millón presente la misma tendencia. El valor promedio de este parámetro es de 4.48; en un rango de 0 a 7.38 ppm.



Sitio	OD ppm
A01SUQUI	0
A03SUQUI	2.7
A05SUQUI	4.68
A08SUQUI	3.77
A10SUQUI	5.23
A12SUQUI	5.1
A14SUQUI	5.06
A16SUQUI	6.42
A18SUQUI	7.38

Figura V-15: Valores de concentración de oxígeno registrado a lo largo del río principal.

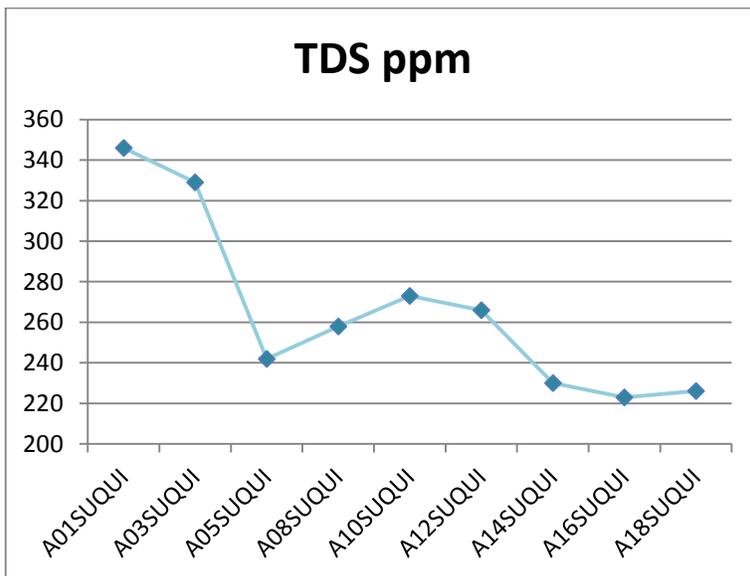
Como se explicó en el capítulo IV, el agua posee una base de conductividad eléctrica. El valor promedio a lo largo de los sitios es 532 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores mayores corresponden a los primeros sitios y los menores corresponden a los últimos sitios.



Sitio	Conductividad
A01SUQUI	693
A03SUQUI	658
A05SUQUI	484
A08SUQUI	515
A10SUQUI	547
A12SUQUI	532
A14SUQUI	461
A16SUQUI	446
A18SUQUI	452

Figura V-16: Valores de conductividad registrados en los sitios a lo largo del río principal.

En la gráfica de la concentración de sólidos disueltos totales, igualmente se observan los altos valores de los primeros sitios y bajos valores en los últimos; registrando un valor promedio de 265.89 ppm.



Sitio	TDS ppm
A01SUQUI	346
A03SUQUI	329
A05SUQUI	242
A08SUQUI	258
A10SUQUI	273
A12SUQUI	266
A14SUQUI	230
A16SUQUI	223
A18SUQUI	226

Figura V-17: Valores de Sólidos disueltos Totales registrados en los sitios a lo largo del río principal.

Mediante los gráficos de Oxígeno Disuelto se puede observar que a medida que se avanza aguas abajo, los niveles de oxígeno disuelto aumentan debido a la presencia de caídas de agua y la turbulencia del flujo en algunas zonas. Los gráficos de conductividad y sólidos disueltos totales muestran que los tributarios contribuyen a la dilución y autodepuración del río. Además, estos gráficos comprueban los efectos de la alta dispersión del río, ya que permite que los sólidos disueltos totales a lo largo del río se diluyan, permitiendo la auto depuración de este.

RECOMENDACIONES

- En el caso de ríos extensos y con múltiples tributarios, caídas de agua y estancamientos; es necesario considerar un caso especial para la aplicación del procedimiento propuesto por Fogler, utilizando la siguiente ecuación para la obtención de un número de Peclet más adecuado:

$$\frac{\sigma^2}{tm^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$$

- Para el cálculo de parámetros hidrodinámicos mediante la ecuación de Singh y Beck; es recomendable utilizar un trazador fluorescente; ya que el cloruro de sodio es operacionalmente difícil de inyectar y requiere mucho tiempo. Por esta última razón, el cloruro de sodio es un trazador más adecuado para un experimento de inyección continua.
- Una curva de calibración obtenida con el agua del sistema en estudio es más adecuada que utilizar una relación Conductividad eléctrica-Concentración teórica; de esta forma se consideran las propiedades químicas y físicas características del cuerpo de agua que ofrecen resistencia a los fenómenos de transporte.
- Es importante asegurarse de calibrar bien el equipo, y considerar el error que este lleva. Para optimizar estos procesos de medición es recomendable realizar las calibraciones con al menos dos soluciones de calibración en el rango de medición del sistema y realizar las mediciones con el mismo equipo en todos los sitios y en todas las visitas.

CONCLUSIONES

- Considerando los múltiples tributarios que posee el río y su alta capacidad de transporte y adecuación al relieve y fondo del cauce; se puede considerar el Río Suquiapa como un río de tipo anastomosado.
- El fenómeno de dispersión aporta una variación de 20-30% al valor del tiempo medio de residencia, en base al cociente de tm/τ .
- En base a los valores de Número de Peclet de 7.14 y 8.58; se puede afirmar que la dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo; sin embargo debe tomarse en cuenta el efecto transversal de la difusión molecular; ya que la técnica lo considera uniforme.
- Los valores obtenidos para el coeficiente de dispersión son 134, 118.66, 109.147; obteniendo un valor promedio de 120.602 m²/s.
- El coeficiente de dilución obtenido con la ecuación de Singh y Beck es de 1; y considerando que la inyección del trazador no fue precisamente puntual, a este factor se debe la falta de ajuste de la curva de modelado obtenida con dicha ecuación.
- El método empírico para la evaluación del coeficiente de dispersión por medio de la técnica de Fischer proporciona valores imprecisos respecto a los otros dos métodos utilizados; por lo tanto se puede concluir que el método de Fischer no aplica para el sistema en estudio.
- Para un estudio realmente representativo de caracterización hidrodinámica, es importante considerar todos los ríos tributarios que realizan un aporte significativo al río; por lo tanto es necesario verificar todos los tributarios del área en estudio, y agregar aquellos que no están identificados en el mapa.

REFERENCIAS

- Arellano Díaz, J., (2002) *Introducción a la Ingeniería Ambiental*, ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V.
- Basán Nickischh, M. (2008). *Curso de Aforadores de Corrientes de Agua*. Argentina: INTA-EEA Santiago del Estero.
- Esquivel Orellana, O. A. (2007) *Informe Nacional Diagnóstico Nacional de la Calidad Sanitaria de las Aguas Superficiales de El Salvador*. Contrato MARN-BID-1209/OC-ES N°60/2006. San Salvador, El Salvador.
- <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00246/doc00246-contenido.pdf>
- Guizerix, J. & Margrita, R. (1976) «*Méthodologie d'étude par traceur des transferts de masses*». *La Houille Blanche* 3-4: 187-196.
- Hernández, W., Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005) *Nacimiento y Desarrollo del Río Lempa*. San Salvador, El Salvador.
- www.snet.gob.sv/Geologia/NacimientoEvolucionRLempa.pdf
- Carrera, J. (2006) Transporte de solutos. *UPC, Jornadas Sobre Geotecnia Medioambiental*. Sevilla.
- Glynn Henry J., Heinke G. W., *Ingeniería Ambiental* 2^{da} edición, Prentice Hall, 1999.
- Lepiller, M. & Mondain, P. (1986) *Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique*. *Hydrogéologie* 1: 33-52.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección General del Observatorio Ambiental (2012) *Informe de la Calidad de Agua de los Ríos de El Salvador. Año 2011*". San Salvador, El Salvador.
- http://www.marn.gob.sv/phocadownload/Informe_Calidad_de_Agua%202011.pdf
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (2012) *Clasificación de Ríos por Cuencas Hidrográficas de El Salvador*, C.A. San Salvador, El Salvador.
- Molinari, J. (1976) «*Interactions avec le milieu et développements récents dans l'emploi de traceurs artificiels*» *La Houille Blanche* 3/4: 197-204.
- Pastora Flores, D. V. (2009). *Imágenes de Caracterización para la Cuenca Suquiapa, El Salvador*". Guatemala.
- Procedimiento de Aforo por Vadeo y Volumétrico de Ríos y manantiales. (Documento de Microsoft Word proporcionado por asesor)

Oyarzún L, Ricardo (2007) *Transporte de contaminantes en aguas subterráneas*, CEAZA-Chile, Temas Ambientales. Chile.

http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Contaminantes_aguas_subterranas/Transp_orte_contaminantes.pdf

Rickly Hydrological Co. *“Discharge Measurement at Gaging Stations”* Ohio, USA.

Sánchez San Román, J. *Transporte de contaminantes, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca (España)*.

Servicio Nacional de Estudios Territoriales (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales) con Información del Programa Ambiental de El Salvador (Ministerio de Agricultura y Ganadería) (2002). *Estrategias de Descontaminación de los Ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa*. San Salvador, El Salvador.

portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00246/doc00246-contenido.pdf

Stanley E. M. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. Reverté Ediciones, S.A. de C.V.

United States Geological Survey. 1986. *“Determinación de Caudal y Técnicas de Muestreo en Agua Superficial”*. San José, Costa Rica. United States Department of the Interior.

Comisión Cuenca Valle de Bravo-Amanalco. (Sin fecha). *Acerca de la Cuenca*. Abril, 14, 2013.
<http://www.cuencaamanalcovalle.org/sec01.php>

Antigüedad, I., Ibarra V., Morales T. (1990). *Los trazadores en la hidrología kárstica: Metodología de su uso e interpretación de ensayos de trazado*. Abril, 2, 2013.

<http://www.aranzadi-zientziak.org/fileadmin/docs/Munibe/1989-1990031045CN.pdf>

Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. *“Proyectos de Energía Renovable, a través de la utilización del recurso hídrico”*. El Salvador, Centroamérica.

<http://www.naruc.org/international/Documents/EL%20SALVADOR-%20Arias%20Illustrated%20RE%20SPANISH1.pdf>

<http://elsalvador.abogadosnotarios.com/leyes-el-salvador/derecho-agrario/ley-de-creacion-del-distrto-de-riego-y-avenamiento-no-2-atiocoyo>

ANEXOS

ANEXO A: MOLINETE HIDROMÉTRICO

A.1. MANTENIMIENTO DEL MOLINETE

A.1.1. Desmontaje del molinete

En general, el desmontaje del molinete Price tipo AA no presenta dificultades, por lo que no se describirá en detalle. Sin embargo, se deben observar las siguientes precauciones:

1. La remoción de la cámara de contacto del yugo debe realizarse con cuidado y sin ejercer fuerza apreciable, de modo que el engrane y el eje no se dañen.
2. La tapa de la cámara de contacto no se debe destornillar nunca cuando el extremo superior del eje soporta forzosamente contra el lado posterior, una condición que existe si la tuerca que se está levantando en la rueda de canguilones ha sido previamente apretada, y si el ajuste del pivote se ha apretado tanto que no hay relación entre el extremo del eje y el lado posterior de la tapa.

Cuando la tuerca del canguilón que se levanta ha sido apretada, el extremo superior del eje soporta el lado posterior de la tapa, a tal punto que está aproximadamente a 3/16 de una pulgada fuera del centro, respecto al centro de la tapa. Si esas dos partes están en contacto cuando la capa se esté ya sea apretando o aflojando, ocurre una severa fuerza de doblez en el punto donde el extremo superior del eje emerge desde el cojinete superior. La falta de atención a esto es una causa común de “ejes curvos” en los molinetes tipo Price.

A.1.2. Pruebas de Giro

La prueba de giro es un método fácil de determinar las condiciones de los cojinetes de un molinete. Al hacer esta prueba, el molinete debe colocarse de modo que el eje se encuentre en posición vertical y la rueda de canguilones esté protegida de corrientes de aire. Se debe dar una vuelta rápida a la rueda de canguilones con la mano para que comience a girar, la duración se mide con un cronómetro. Cuando el canguilón se acerca al punto de detención, se debe observar cuidadosamente su movimiento para observar si la parada es gradual o abrupta. Sin importar la

duración del giro, si la rueda de canguilones se detiene abruptamente, se debe buscar la causa de tal comportamiento y corregir, antes de utilizar el molinete. En tales casos, la falta de aceite, el mal ajuste del engrane o un mal alineado del yugo son las posibles causas del problema que debe recibir pronta atención.

El giro normal del Price tipo AA debe ser aproximadamente de minutos y bajo ninguna circunstancia debe ser menor que 1 ½ minutos. Las variaciones grandes en la duración de la prueba de giro serán introducidas por ligeras variaciones de la posición vertical del eje. Algunos operadores acuerdan en proveer a sí mismos una ampollita de nivel circular que puede colocarse en la tapa del molinete para ayudarse a hacer la prueba con el eje alineado en una verdadera posición vertical.

Otra prueba común para determinar el estado del cojinete del molinete es sostener el molinete de forma que el eje se encuentre en posición vertical y manteniendo el eje en una posición lo más fija posible, voltear el yugo y la cola en un plano horizontal alrededor de éste. Si la rueda de canguilones permanece en la posición fija, es una indicación de que los cojinetes funcionan satisfactoriamente, mientras que si la rueda de canguilones tiene a girar con el yugo y la cola, es una indicación de que el molinete requiere atención.

A.2.3. Limpieza y Engrasado Rutinario de Molinetes

Al final de cada día de uso, el molinete debe ser completamente limpiado y engrasado. El pivote y el pivote del cojinete necesitan especial atención: a diferencia de todas las demás partes del molinete, estos están expuestos a oxidarse, y, por lo tanto, es deseable que se sequen antes de ser engrasados.

Los lineamientos a continuación brindan un procedimiento paso a paso para la limpieza y engrasado de los molinetes.

- **Equipo:**
 1. Destornilladores del tamaño adecuado para utilizar en el juego de tornillos que se encuentra en el yugo y en la tuerca de ajuste del pivote.
 2. Una franela grande y suave que absorba el agua para limpiar las superficies externas del molinete.

3. Hisopos con extremos de algodón para limpiar las superficies del cojinete.
4. Provisión de aceite (Aceite del instrumento que está disponible en la PropertyMaintenanceSection) en un contenedor con las facilidades que permitan aplicar una gota de aceite en lugares que de otra forma sería difícil alcanzar.

- **Desmantelar el molinete de la siguiente manera:**

1. Soltar la tuerca.
2. Soltar los tornillos de dos juegos en el yugo, sosteniendo la cámara de contacto y el pivote con el dedo índice y el pulgar.
3. Remover la cámara de contacto del yugo despacio y con cuidado, para mientras no remover la tapa.
4. Remover el pivote del yugo.

- **Limpieza de las partes:**

1. Cojinete del pivote:
 - a) Limpiar y secar el bolsillo de aire y el cojinete del pivote utilizando
 - b) Inspeccionar el cojinete del pivote.
2. El agujero del pivote en el yugo.
3. Limpiar el agujero del pivote en el yugo con un hisopo con extremos de algodón.
4. Eje.
5. Limpie y seque el eje, particularmente las roscas.
6. Pivote.
7. Limpie el pivote hasta que esté completamente seco.
8. Cámara de contacto:
 - a) Remueva la tapa y sacuda cualquier resto de agua que pudiera estar atrapado en la cámara de contacto.
 - b) Limpie el interior del pie o de la cámara de contacto.
 - c) Limpie el agujero del cojinete por medio de un hisopo de extremos de algodón insertado en la estaca o en la cámara de contacto. Frecuentemente, la limpieza del agujero del cojinete desde la parte superior causa que los alambres de contacto se curven y que eventualmente se quiebren, mientras que si se limpia desde el fondo los alambres no se doblan ni se afecta su ajuste.

- **Engrasado:**

1. Eje.

Aplique una película de aceite a a) las roscas del cenit (aplicar abundantemente, de modo que el exceso de aceite se propague después sobre en engrane pentagonal y el eje) b) el área que entra en la ojereta del cojinete, y c) el extremo más alto del eje.

2. Cojinete del Pivote.

Aplique una película delgada de aceite sobre todas las partes expuestas del cojinete del pivote.

3. Agujero del pivote en el yugo. Aplique una gota de aceite a los lados o en el agujero a través del cual pasa el pivote.

4. Pivote. Aplique una película delgada de aceite en el pivote.

- **Re montaje:**

1. Coloque nuevamente el pivote y refuerce tornillo. Asegúrese de que la tuerca de seguro del pivote soporte el yugo, y que el tornillo soporte la parte aplanada del pivote.

2. Ajuste la cámara de contacto sobre el extremo del eje y sobre su agujero en la extremidad superior del yugo. Realice esto despacio y cuidadosamente, sin aplicar mucha fuerza, de otra forma se podría dañar el engrane pentagonal o el eje.

3. Combine las marcas de la cámara de contacto y el yugo, y refuerce el tornillo sosteniendo la cámara de contacto.

4. Revise los alambres de contacto.

5. Coloque nuevamente la tapa en la cámara de contacto.

6. Mueva el ensamble de la rueda de canguilones con su centro hacia arriba y abajo para determinar si el ajuste del pivote es correcto.

7. Revise la operación del molinete mediante la prueba de giro.

8. A menos que necesite utilizar el molinete inmediatamente, levante el cojinete del pivote fuera del pivote por medio de la tuerca de canguilones.

ANEXO B: CONDUCTIVIDAD Y SALINIDAD EN LOS ECOSISTEMAS

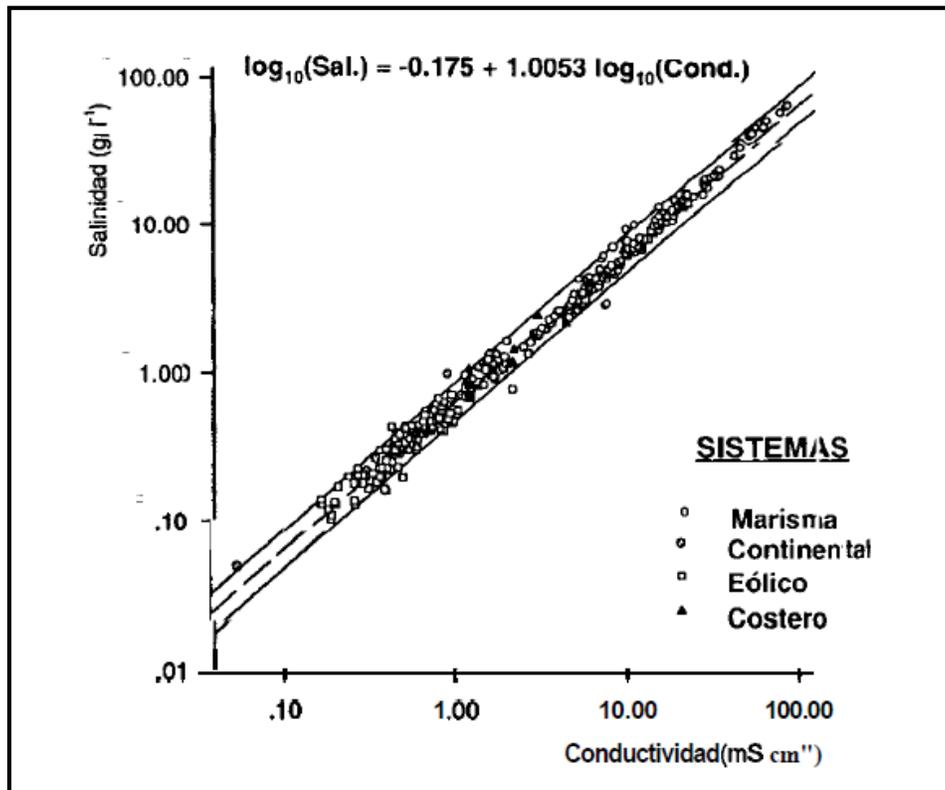


Figura B.1: Curva Salinidad-Conductividad de la sal.

Modelo de regresión lineal para la relación salinidad-conductividad en masas de agua del Parque Nacional de Doñana (los diferentes símbolos indican los diferentes sectores ambientales). Las líneas continuas marcan las bandas de confianza (95%) de la predicción de una observación futura.

La figura muestra también las bandas de confianza (95%) de la predicción para el conjunto de las muestras. Considerando que el objetivo principal de derivar una relación entre conductividad y salinidad es obtener una herramienta eficaz de estima de la segunda a partir de la primera, se ha confeccionado una tabla que permite hacer predicciones de forma rápida

TABLA B.1 Bandas de confianza (95%) estimadas para la salinidad (g/L) a partir de valores de conductividad en el intervalo de 1 a 100 mS/cm

Cond. (mS cm ⁻¹)	Salinidad (g l ⁻¹) L.C. (95%)	Cond. (mS cm ⁻¹)	Salinidad (g l ⁻¹) L.C. (95%)	Cond. (mS cm ⁻¹)	Salinidad (g l ⁻¹) L.C. (95%)
1.00	0.50 — 0.91	26.00	13.28 — 24.08	52.00	26.64 — 48.37
2.00	1.01 — 1.83	27.00	13.79 — 25.01	54.00	27.67 — 50.24
3.00	1.52 — 2.74	28.00	14.31 — 25.94	56.00	28.70 — 52.11
4.00	2.02 — 3.66	29.00	14.82 — 26.87	58.00	29.73 — 53.98
5.00	2.53 — 4.59	30.00	15.33 — 27.81	60.00	30.76 — 55.86
6.00	3.04 — 5.51	31.00	15.85 — 28.74	62.00	31.79 — 57.73
7.00	3.55 — 6.43	32.00	16.36 — 29.67	64.00	32.82 — 59.61
8.00	4.06 — 7.36	33.00	16.87 — 30.61	66.00	33.85 — 61.48
9.00	4.57 — 8.28	34.00	17.39 — 31.54	68.00	34.88 — 63.36
10.00	5.08 — 9.21	35.00	17.90 — 32.47	70.00	35.91 — 65.23
11.00	5.60 — 10.13	36.00	18.41 — 33.41	72.00	36.94 — 67.11
12.00	6.11 — 11.06	37.00	18.93 — 34.34	74.00	37.97 — 68.99
13.00	6.62 — 11.99	38.00	19.44 — 35.27	76.00	39.00 — 70.86
14.00	7.13 — 12.92	39.00	19.96 — 36.21	78.00	40.03 — 72.74
15.00	7.64 — 13.84	40.00	20.47 — 37.14	80.00	41.06 — 74.62
16.00	8.15 — 14.77	41.00	20.98 — 38.08	82.00	42.10 — 76.49
17.00	8.67 — 15.70	42.00	21.50 — 39.01	84.00	43.13 — 78.37
18.00	9.18 — 16.63	43.00	22.01 — 39.95	86.00	44.16 — 80.25
19.00	9.69 — 17.56	44.00	22.53 — 40.88	88.00	45.19 — 82.13
20.00	10.20 — 18.49	45.00	23.04 — 41.82	90.00	46.22 — 84.01
21.00	10.72 — 19.42	46.00	23.56 — 42.75	92.00	47.25 — 85.89
22.00	11.23 — 20.35	47.00	24.07 — 43.69	94.00	48.28 — 87.77
23.00	11.74 — 21.28	48.00	24.58 — 44.62	96.00	49.32 — 89.65
24.00	12.25 — 22.21	49.00	25.10 — 45.56	98.00	50.35 — 91.53
25.00	12.77 — 23.15	50.00	25.61 — 46.49	100.00	51.38 — 93.41

En esta tabla se puede apreciar que, para conductividades elevadas, las predicciones tienden a hacerse poco precisas (ej., para una conductividad observada de 90 mS cm⁻¹ la banda de predicción de la salinidad tiene una anchura de, aproximadamente, 38 g l⁻¹).

ANEXO C: FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL CLORURO DE SODIODE ACUERDO EL REGLAMENTO (CE) NO. 1907/2006

Fecha de revisión

28.10.2009

1. Identificación de la sustancia/mezcla y de la compañía o empresa

Información del Producto	
Artículo número:	116224
Denominación:	Cloruro de sodio pobre en endotoxinas, adecuado para uso como excipiente EMPROVE® expPhEur,BP,JP,USP
Uso de la sustancia/mezcla	Producción y análisis farmacéuticos
Compañía:	Merck KGaA * 64271 Darmstadt *Alemania *Tel: +49615172-0
Teléfono de urgencias:	Instituto Nacional de Toxicología * Madrid * Tel: 91 562 04 20
Departamento	EQ-EPS * e-mail: prodsafe@merck.de
Responsable:	

2. Identificación de los peligros

Esta sustancia no es clasificada como siendo peligrosa según la legislación de la Unión Europea.

3. Composición/Información sobre los componentes

Formula	NaCl	ClNa(Hill)
No. CAS	7647-14-5	
No. CE	231-598-3	
PM	58,44 g/mol	

4. Primeros auxilios

Tras inhalación: aire fresco.

Tras contacto con la piel: aclarar con abundante agua. Eliminar ropa contaminada. Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua.

Tras ingestión: hacer beber agua (máximo 2 vasos), en caso de malestar consultar al médico.

5. Medidas de lucha contra incendios

Medios de extinción adecuados

Usar medidas de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores.

Peligros específicos en la lucha contra incendios

No combustible.

Otros datos

Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

6. Medidas en caso de liberación accidental

Precauciones personales

Evitar la inhalación de polvo.

Precauciones para la protección del medio ambiente

No tirar los residuos por el desagüe.

Métodos de limpieza

Recoger en seco y proceder a la eliminación de residuos. Aclarar. Evitar la formación de polvo.

7. Manipulación y almacenamiento

Manipulación

Consejos para una manipulación segura

Observar las indicaciones de la etiqueta.

Almacenamiento

Información complementaria sobre las condiciones de almacenamiento

Bien cerrado. Seco.

Sin limitaciones.

8. Controles de la exposición/protección personal

No contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.

Protección personal

Los tipos de auxiliares para protección del cuerpo deben elegirse específicamente según el puesto de trabajo en función de la concentración y cantidad de la sustancia peligrosa. Debería aclararse con el suministrador la estabilidad de los medios protectores frente a los productos químicos.

Protección respiratoria necesaria en presencia de polvo.

Protección de las manos

Sumersión:

Material del guante:	Caucho nitrilo
Espesor del guante:	0,11 mm
Tiempo de perforación:	> 480 min

Salpicaduras:

Material del guante:	Caucho nitrilo
Espesor del guante:	0,11 mm
Tiempo de perforación:	> 480 min

Los guantes de protección indicados deben cumplir con las especificaciones de la Directiva 89/686/EEC y con su norma resultante EN374, por ejemplo KCL 741 Dermatril® L (Sumersión), KCL 741 Dermatril® L (Salpicaduras).

Los tiempos de ruptura mencionados anteriormente han sido determinados con muestras de material de los tipos de guantes recomendados en mediciones de laboratorio de KCL según EN374. Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN374, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ej. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

9. Propiedades físicas y químicas

Estado físico	Sólido
Color	Incoloro
Olor	Inodoro
pH	4,5 - 7,0
	a 100 g/l
	20 °C
Viscosidad, dinámica	sin datos disponibles
Punto de fusión	801 °C
Punto /intervalo de ebullición	1.461 °C
	a 1.013 hPa
Temperatura de ignición	no aplicable
Punto de inflamación	no aplicable
Propiedades comburentes	sin datos disponibles
Inflamabilidad	sin datos disponibles
Límite de explosión, inferior	sin datos disponibles
Límite de explosión, superior	sin datos disponibles
Presión de vapor	1,3 hPa
	a 865°C
Densidad relativa del vapor	sin datos disponibles
Densidad	2,17 g/cm ³
	a 20 °C
Densidad aparente	aprox.1.140 kg/m ³
Solubilidad	sin datos disponibles
Solubilidad en agua	358 g/l
	a 20 °C
Coeficiente de reparto n- octanol/agua	sin datos disponibles
Velocidad de evaporación	sin datos disponibles

10. Estabilidad y reactividad

Condiciones que deben evitarse

Información no disponible

Materias que deben evitarse

Reacción exotérmica con:

Metales alcalinos

Productos de descomposición peligrosos

Información no disponible

11. Información toxicológica

Toxicidad oral aguda

DL50 rata

Dosis: 3.000 mg/kg

(RTECS)

Toxicidad cutánea aguda

DL50 conejo

Dosis: > 10.000 mg/kg

(RTECS)

Irritación ocular

Conejo

Resultado: ligera irritación

(IUCLID)

Genotoxicidad in vitro

Mutagenicidad (ensayo de células de mamífero): test micronucleus.

Resultado: negativo

(IUCLID)

Prueba de Ames

Resultado: negativo

(IUCLID)

Efectos CMR

Carcinogenicidad:

No muestra efectos cancerígenos en experimentos con animales.

Mutagenicidad:

Los ensayos con animales no mostraron ningún efecto mutágeno.

Teratogenicidad:

No muestra efectos teratogénicos en experimentos con animales.

Toxicidad para la reproducción:

No hay sospecha de que perjudique la capacidad reproductora.

Otros datos

Efectos sistémicos:

Tras ingestión de grandes cantidades:

Náusea, Vómitos

Otras indicaciones:

No deben esperarse efectos tóxicos si la manipulación es adecuada.

12. Información ecológica

Ecotoxicidad

Toxicidad para los peces

CL50

Especies: Pimephalespromelas (Piscardo de cabeza gorda)

Dosis: 7.650 mg/l

Tiempo de exposición: 96 h

(IUCLID)

Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos.

CE50

Especies: *Daphnia magna* (Pulga de mar grande)

Dosis: 1.000 mg/l

Tiempo de exposición: 48 h

(IUCLID)

Persistencia y degradabilidad

Biodegradabilidad

Los métodos para la determinación de la degradabilidad biológica no son aplicables para las sustancias inorgánicas.

Información ecológica complementaria

¡No incorporar a suelos ni acuíferos!

13. Consideraciones relativas a la eliminación

Producto

Los productos químicos han de eliminarse siguiendo las normativas nacionales. Bajo www.retrologistik.de encontrará indicaciones sobre países, indicaciones específicas de productos así como contactos.

Envases

Los envases de productos Merck han de eliminarse siguiendo las normativas nacionales. Bajo www.retrologistik.de encontrará indicaciones especiales para las peculiaridades nacionales así como contactos

14. Información relativa al transporte

Producto no peligroso según los criterios de la reglamentación del transporte.

15. Información reglamentaria

Etiquetado SGA

No es una sustancia peligrosa según SGA.

No. CAS 7647-14-5

Etiquetado de acuerdo con las Directivas CE

El producto no necesita ser etiquetado de acuerdo con las directivas de la Comunidad Europea o las respectivas leyes nacionales.

No. CE 231-598-3

Legislación nacional

Clase de almacenamiento 10 - 13

VCI: Otros líquidos y sustancias sólidas

16. Otra información

Representante regional: VWR International S.L. * Apartado 48 * E-08100 Mollet del Vallès
Tel.: +34 (0) 93 5655 500 * Fax: +34 (0) 93 5440 000

Merck Farma y Química, S.A. * Apartado 47 * E-08100 Mollet del
Vallès * Tel.: +34 (0) 93 5655 500 * Fax: +34 (0) 93 5440 000 *
e-mail:lifescience@merck.es

Los datos suministrados en ésta ficha de seguridad se basan a nuestro actual conocimiento. Describen tan sólo las medidas de seguridad en el manejo de éste producto y no representan una garantía sobre las propiedades descritas del mismo.

ANEXO D: DATOS RECOLECTADOS EN LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO

Tabla D.1: Datos de aforo por vadeo del sitio A01SUQUI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A01SUQUI			FECHA DE AFORO:			Estado del río	
ESTACION: SECA			ANCHO DE LA SECCIÓN: 9 m									Estable	Limpio
AFORO POR VADEO			ESCALA EXTERNA 2.02									Subiendo	Turbio
Molinete 141815			MARCA 1=1			Varilla			ESC. EXT.				
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1		0.08					40						
2	0.50	0.37				3	40	-				0.50	
3	1.00	0.32				4	40	-				0.50	
4	1.50	0.38				7	40	0.382				0.50	
5	2.00	0.38				8	40	0.459				0.50	
6	2.50	0.36				8	40	-				0.50	
7	3.00	0.34				7	40	-				0.50	
8	3.50	0.38				5	40	0.293				0.50	
9	4.00	0.38				11	40	0.617				0.50	
10	4.50	0.32				21	40	-				0.50	
11	5.00	0.30				29	40	1.600				0.50	
12	5.50	0.26				54	40	2.994				0.50	
13	6.00	0.28				44	40	2.443				0.50	
14	6.50	0.22				23	40	1.282				0.50	
15	7.00	0.16				7	40	0.404				0.50	
16	7.50	0.12				4	40	0.238				0.50	
17	8.00	0.14				20	40	1.112				0.50	
18	8.50	0.12				6	40	0.349				0.50	
19	9.00	0.06				2	40	0.128				0.50	

Tabla D.2: Datos de aforo por vadeo del sitio A02VERTI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A02VERTI			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 1.50 m						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1		0.22					40						
2	0.15	0.22				9	40	0.514				0.15	
3	0.30	0.21				9	40	0.514				0.15	
4	0.45	0.21				16	40	0.900				0.15	
5	0.60	0.22				16	40	0.885				0.15	
6	0.75	0.22				17	40	0.955				0.15	
7	0.90	0.21				16	40	0.891				0.15	
8	1.05	0.20				17	40	0.955				0.15	
9	1.20	0.17				12	40	0.679				0.15	
10	1.35	0.12				6	40	0.335				0.15	
11	1.50							1.600				0.15	

Observaciones: Tiempo 40 segundos

Tabla D.3: Datos de aforo por vadeo del sitio A03SUQUI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A03SUQUI		FECHA DE AFORO			Estado del río		
ESTACION: SECA			ANCHO DE LA SECCIÓN:						Estable Limpio		Subiendo Turbio	Bajando Muy turbio	
AFORO POR VADEO			ESCALA EXTERNA 2.02										
Molinete 141815			MARCA 1=1		Varilla		ESC.		EXT.				
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	0.50	0.22				2	40	0.039				0.50	
3	1.00	0.47				2	40	0.037				0.50	
4	1.50	0.42				2	41.8	0.037				0.50	
5	2.00	0.58				8	40	0.134				0.50	
6	2.50	0.47				10	41.2	0.169				0.50	
7	3.00	0.38				16	40	0.274				0.50	
8	3.50	0.40				17	40.9	0.285				0.50	
9	4.00	0.40				17	40	0.291				0.50	
10	4.50	0.39				16	40.7	0.270				0.50	
11	5.00	0.40				20	40	0.341				0.50	
12	5.50	0.38				24	40	0.409				0.50	
13	6.00	0.34				21	40.2	0.356				0.50	
14	6.50	0.33				17	40	0.138				0.50	
15	7.00	0.26				7	41	0.120				0.50	
16	7.50	0.22				17	40	0.284				0.50	
17	8.00	0.26				17	40.6	0.303				0.50	
18	8.50	0.31				5	40	0.089				0.50	
19	9.00	0.27				3	40	0.056				0.50	

Observaciones: Tiempo 40 segundos

Tabla D.4: Datos de aforo por vadeo del sitio A04APANT

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A04APANT		FECHA DE AFORO			Estado del río		
ESTACION: SECA			ANCHO DE LA SECCIÓN: 4 m						Estable Limpio				
AFORO POR VADEO			ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo Turbio				
Molinete 141815			MARCA 1=1		Varilla		ESC.		EXT.				
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	0.50	0.26				16	40	0.900				0.50	
3	1.00	0.28				19	40	1.065				0.50	
4	1.50	0.30				17	40	0.955				0.50	
5	2.00	0.32				16	40	0.900				0.50	
6	2.50	0.44				21	40.5	1.161				0.50	
7	3.00	0.38				25	40	1.396				0.50	
8	3.50	0.30				23	40	1.286				0.50	
9	4.00	0.10					40	-				0.50	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.5: Datos de aforo por vadeo del sitio A05SUQUI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A05SUQUI			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 10.5 m						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	1.00	0.22				3	41.3	0.178				1.00	
3	2.00	0.47				15	40	0.845				1.00	
4	3.00	0.42				22	40	1.230				1.00	
5	4.00	0.58				19	40.4	1.054				1.00	
6	5.00	0.47				20	40	1.120				1.00	
7	6.00	0.38				8	40	0.459				1.00	
8	7.00	0.40				10	40	0.569				1.00	
9	8.00	0.40				18	40	1.070				1.00	
10	9.00	0.39				16	40.6	0.900				1.00	
11	10.00	0.40				20	41.3	1.104				1.00	
12	10.50	0.38				12	40	0.658				0.50	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.6: Datos de aforo por vadeo del sitio A06SAUCE-1

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A06SAUCE			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 1 m						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1		0.60											
2	11.00	0.60				15	40	0.845				0.11	
3	22.00	0.70				15	40	0.845				0.11	
4	33.00	0.64				15	40	0.845				0.11	
5	44.00	0.66				15	40.4	0.845				0.11	
6	55.00	0.72				16	40	0.895				0.11	
7	66.00	0.64				17	40	0.934				0.11	
8	77.00	0.64				16	40	0.900				0.11	
9	88.00	0.65				14	40	0.789				0.11	
10	99.00	0.62				14	40.9	0.789				0.11	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.7: Datos de aforo por vadeo del sitio A06SAUCE-2

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A06SAUCE			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 0.8 m						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	10.00	0.30				2	55.3	0.097				0.10	
3	20.00	0.32				2	40	0.128				0.10	
4	30.00	0.32				3	40	0.177				0.10	
5	40.00	0.30				5	40.7	0.291				0.10	
6	50.00	0.28				6	40	0.349				0.10	
7	60.00	0.26				8	40	0.450				0.10	
8	70.00	0.23				10	40	0.569				0.10	
9	80.00	0.26				12	40	0.679				0.10	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.8: Datos de aforo por vadeo del sitio A07CARC

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A07CARC			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 1.50 m						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	0.15	0.24				8	40.6	0.452				0.15	
3	0.30	0.30				19	40	1.065				0.15	
4	0.45	0.32				20	40.4	1.109				0.15	
5	0.60	0.32				17	40	0.955				0.15	
6	0.75	0.33				16	40	0.900				0.15	
7	0.90	0.32				15	40	0.845				0.15	
8	1.05	0.30				15	40	0.845				0.15	
9	1.20	0.31				9	41.6	0.495				0.15	
10	1.35	0.33				5	40	0.293				0.15	
11	1.50											0.15	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.9: Datos de aforo por vadeo del sitio A08SUQUI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE														
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A02VERTI			FECHA DE AFORO			Estado del río		
ESTACION: SECA			ANCHO DE LA SECCIÓN: 13 m.									Estable	Limpio	
AFORO POR VADEO			ESCALA EXTERNA 2.02									Subiendo	Turbio	
Molinete 141815			MARCA 1=1			Varilla			ESC. EXT.			Bajando		Muy turbio
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL	
			0.2			0.6			0.8					
			R	S	V	R	S	V	R	S	V			
1														
2	1.00	0.29				4	40	0.236				1.00		
3	2.00	0.43				19	40	1.065				1.00		
4	3.00	0.38				16	41.8	0.900				1.00		
5	4.00	0.35				19	40	1.062				1.00		
6	5.00	0.34				21	41.2	1.175				1.00		
7	6.00	0.33				21	40	1.175				1.00		
8	7.00	0.45				22	40.9	1.212				1.00		
9	8.00	0.44				10	40	0.554				1.00		
10	9.00	0.40				9	40.7	0.504				1.00		
11	10.00	0.50				12	40	0.676				1.00		
12	11.00	0.63				11	40	0.614				1.00		
13	12.00	0.64				15	40.2	0.845				1.00		
14	13.00							-				1.00		
Observaciones: Tiempo 40 segundos														

Tabla D.10: Datos de aforo por vadeo del sitio A09MOLIN-1

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A09MOLIN			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 3 m.						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1							40						
2	0.25	0.03				7	40	0.395				0.25	
3	0.50	0.10				9	40.6	0.506				0.25	
4	0.75	0.17				10	40	0.569				0.25	
5	1.00	0.21				8	40.1	0.447				0.25	
6	1.25	0.21				12	40	0.679				0.25	
7	1.50	0.26				9	40	0.514				0.25	
8	1.75	0.21				7	41.7	0.388				0.25	
9	2.00	0.15				9	40	0.514				0.25	
10	2.25	0.16				10	40	0.569				0.25	
11	2.50	0.12				7	42.7	0.379				0.25	
12	2.75	0.11				7	40	0.404				0.25	
13	3.00	0.09				5	42	0.280				0.25	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.11: Datos de aforo por vadeo del sitio A09MOLIN-2

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A09MOLIN			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 1 m.						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	0.10	0.24				1	40.3	0.729				0.10	
3	0.20	0.23				15	40	0.845				0.10	
4	0.30	0.34				16	40	0.900				0.10	
5	0.40	0.32				17	40	0.955				0.10	
6	0.50	0.30				21	40.4	1.164				0.10	
7	0.60	0.30				22	40.8	1.207				0.10	
8	0.70	0.26				24	40.4	1.327				0.10	
9	0.80	0.24				30	40	1.671				0.10	
10	0.90	0.21				32	40.5	1.760				0.10	
11	1.00	0.20				19	40	1.065				0.10	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.13: Datos de aforo por vadeo del sitio A11ZARCO

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE														
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A11ZARCO			FECHA DE AFORO			Estado del río		
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 6.5 m.						Estable	Limpio	
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio	
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.	
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL	
			0.2			0.6			0.8					
			R	S	V	R	S	V	R	S	V			
1		0.36				1	40.2							
2	0.50	0.42				4	40	0.236				0.50		
3	1.00	0.42				7	42.2	1.065				0.50		
4	1.50	0.40				11	40	0.900				0.50		
5	2.00	0.43				10	40.8	1.062				0.50		
6	2.50	0.38				11	40	1.175				0.50		
7	3.00	0.35				11	41.2	1.175				0.50		
8	3.50	0.33				12	40	1.212				0.50		
9	4.00	0.33				12	40.6	0.554				0.50		
10	4.50	0.33				13	40.1	0.504				0.50		
11	5.00	0.34				14	41	0.676				0.50		
12	5.50	0.33				15	40	0.614				0.50		
13	6.00	0.31				14	40	0.845				0.50		
14	6.50	0.26				12	41.2	-				0.50		
Observaciones: Tiempo 40 segundos														

Tabla D.14: Datos de aforo por vadeo del sitio A12SUQUI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A12SUQUI		FECHA DE AFORO		Estado del río			
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN: 17 m.						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1		Varilla		ESC.		EXT.	
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	1.00	0.22	9	40	0.514							1.00	
3	2.00	0.40	11	40.6	1.104							1.00	
4	3.00	0.51	11	40.3	0.729							1.00	
5	4.00	0.60	12	40	0.679							1.00	
6	5.00	0.77	8	40	0.459				6	41.1		1.00	
7	6.00	0.84	8	40.2	0.459				7	40		1.00	
8	7.00	0.85	7	44.1	0.347				8	40		1.00	
9	8.00	0.74	11	40	0.828				14	40.7		1.00	
10	9.00	0.64	15	40	0.845							1.00	
11	10.00	0.70	15	40	1.065							1.00	
12	11.00	0.80	16	40	1.341				24	40		1.00	
13	12.00	0.72	24	40	1.732							1.00	
14	13.00	0.85	16	40	1.616				33	40.4		1.00	
15	14.00	0.76	16	40	1.230				28	40		1.00	
16	15.00	0.60	15	40.6	1.375							1.00	
17	16.00	0.55	13	41.2	0.874							1.00	
18	17.00	0.30		40								1.00	

Observaciones: Tiempo 40 segundos

Tabla D.15: Datos de aforo por vadeo del sitio A13VERTI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A02VERTI			FECHA DE AFORO			Estado del río	
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN:						Estable	Limpio
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF. OBSER. VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	0.20	0.35				2	40	0.128				0.20	
3	0.40	0.35				2	40	0.128				0.20	
4	0.60	0.40				2	43.7	0.270				0.20	
5	0.80	0.38				5	40	0.399				0.20	
6	1.00	0.45				6	41.5	0.230				0.20	
7	1.20	0.45				4	41.4	0.231				0.20	
8	1.40	0.42				4	46.1	0.230				0.20	
9	1.60	0.42				4	40	0.238				0.20	
10	1.80	0.40				4	40	0.455				0.20	
11	2.00	0.40				8	40	-				0.20	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.17: Datos de aforo por vadeo del sitio A15PUENTE

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A02VERTI		FECHA DE AFORO			Estado del río		
ESTACION: SECA			ANCHO DE LA SECCIÓN:						Estable Limpio		Subiendo Turbio		
AFORO POR VADEO			ESCALA EXTERNA 2.02						Bajando Muy turbio				
Molinete 141815			MARCA 1=1		Varilla		ESC.		EXT.				
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1													
2	0.50	0.14				4	40	0.238				0.50	
3	1.00	0.39				20	40	1.120				0.50	
4	1.50	0.38				27	40.3	1.495				0.50	
5	2.00	0.37				31	40	1.727				0.50	
6	2.50	0.36				37	40	2.057				0.50	
7	3.00	0.35				37	40	2.057				0.50	
8	3.50	0.26				30	40.4	1.655				0.50	
9	4.00	0.26				29	40	1.616				0.50	
10	4.50	0.30				30	40	1.671				0.50	
11	5.00	0.34				14	40	0.789				0.50	
12	5.50	0.26				5	44.4	0.266				0.50	
13	6.00	0.10					40	-				0.50	
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.18: Datos de aforo por vadeo del sitio A16SUQUI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A02VERTI			FECHA DE AFORO			Estado del rio	
ESTACION: SECA			ANCHO DE LA SECCIÓN:			Estable		Limpio		Subiendo		Turbio	
AFORO POR VADEO			ESCALA EXTERNA 2.02			Bajando		Muy turbio					
Molinete 141815			MARCA 1=1			Varilla			ESC. EXT.				
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1		0.13	16	40	0.9							1.00	
2	1.00	0.18	28	40	.561							1.00	
3	2.00	0.33	46	40	2.553							1.00	
4	3.00	0.52	42	40	2.333							1.00	
5	4.00	0.72	49	40	2.719							1.00	
6	5.00	0.76	37	40	2.057				53	40.2		1.00	
7	6.00	0.70	38	40	2.112							1.00	
8	7.00	0.65	30	40	1.671							1.00	
9	8.00	0.51	23	40.7	1.264							1.00	
10	9.00	0.34	18	40	1.070							1.00	
11	10.00	0.15	12	41.4	0.657							1.00	
12	11.00	0.10	14	40.8	0.774							1.00	
13	12.00	0.02		40	-								
Observaciones: Tiempo 40 segundos													

Tabla D.19: Datos de aforo por vadeo del sitio A17GÜILGUAYO

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE													
CUENCA: LEMPA		SUBCUENCA: SUQUIAPA		SITIO: A02VERTI		FECHA DE AFORO			Estado del río				
ESTACION: SECA		ANCHO DE LA SECCIÓN:			Subiendo		Limpio		Bajando		Muy turbio		
AFORO POR VADEO				ESCALA EXTERNA 2.02									
Molinete 141815		MARCA 1=1		Varilla			ESC.		EXT.				
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL
			0.2			0.6			0.8				
			R	S	V	R	S	V	R	S	V		
1							40						
2	0.25	0.33				14	40	0.789				0.25	
3	0.50	0.32				19	40.6	1.048				0.25	
4	0.75	0.28				22	40	1.230				0.25	
5	1.00	0.28				17	40	0.955				0.25	
6	1.25	0.27				14	40.9	0.772				0.25	
7	1.50	0.26				9	42.3	0.487				0.25	
8	1.75	0.25				7	40	0.404				0.25	
9	2.00	0.22				5	43.4	0.272				0.25	
10	2.25	0.10				9	42.8	0.481				0.25	
11	2.50						40	-				0.25	

Observaciones: Tiempo 40 segundos

Tabla D.20: Datos de aforo por vadeo del sitio A18SUQUI

AFORO DE CORRIENTE POR MOLINETE														
CUENCA: LEMPA			SUBCUENCA: SUQUIAPA			SITIO: A02VERTI			FECHA DE AFORO			Estado del río		
ESTACION: SECA						ANCHO DE LA SECCIÓN:						Estable	Limpio	
AFORO POR VADEO						ESCALA EXTERNA 2.02						Subiendo	Turbio	
Molinete 141815						MARCA 1=1			Varilla			ESC.	EXT.	
N° de medición	DIST. DEL PTO. INICIAL	PROF OBSER VADA	VELOCIDAD									ANCHO DEL TRAMO	CAUDAL PARCIAL	
			0.2			0.6			0.8					
			R	S	V	R	S	V	R	S	V			
1	0.50	0.12				27	40						0.50	
2	1.00	0.14				10	40	0.236					0.50	
3	1.50	0.37				30	40.3	1.065					0.50	
4	2.00	0.29				41	40	0.900					0.50	
5	2.50	0.26				52	40	1.062					0.50	
6	3.00	0.22				67	40	1.175					0.50	
7	3.50	0.32				65	40.2	1.175					0.50	
8	4.00	0.42				59	40.1	1.212					0.50	
9	4.50	0.48				84	40.1	1.554					0.50	
10	5.00	0.50				91	40	1.504					0.50	
11	5.50	0.50				95	40	-					0.50	
12	6.00	0.50				99	40	-					0.50	
13	6.50	0.50				102	40	-					0.50	
14	7.00	0.50				105	40	-					0.50	

Observaciones: Tiempo 40 segundos

D.1. HOJAS DE CÁLCULO DE AFOROS POR VADEO

A continuación se presentan las hojas de Excel como memorias de cálculo para cada sitio.

Tabla D.21: Hoja de cálculo de aforo por vadeo para el sitio A01SUQU

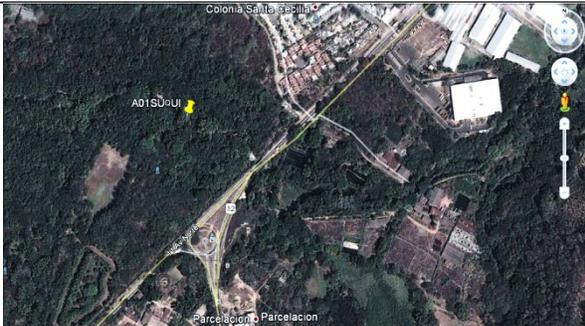
No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	No. REV 0.8	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC -L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL	CAUDAL LEIDO
							0.2		0.6		0.8							
							m	V	M	V	m	V						
1		0.08		40														
2	0.50	0.37	3	40			---	---	0.22	0.183	---	---	-	-	0.50	0.113	0.0031	
3	1.00	0.32	4	40			---	---	0.19	0.238	---	---	-	-	0.50	0.173	0.0111	
4	1.50	0.38	7	40			---	---	0.23	0.404	---	---	0.382	0.116	0.50	0.175	0.0171	0.0102
5	2.00	0.38	8	40			---	---	0.23	0.459	---	---	0.459	0.140	0.50	0.190	0.0250	0.0244
6	2.50	0.36	8	40			---	---	0.22	0.459	---	---	-	-	0.50	0.185	0.0259	
7	3.00	0.34	7	40			---	---	0.20	0.404	---	---	-	-	0.50	0.175	0.0230	
8	3.50	0.38	5	40			---	---	0.23	0.293	---	---	0.293	0.089	0.50	0.180	0.0191	0.0080
9	4.00	0.38	11	40			---	---	0.23	0.624	---	---	0.617	0.188	0.50	0.190	0.0266	0.0263
10	4.50	0.32	21	40			---	---	0.19	1.175	---	---	-	-	0.50	0.175	0.0480	
11	5.00	0.30	29	40			---	---	0.18	1.616	---	---	1.600	0.488	0.50	0.155	0.0659	0.0378
12	5.50	0.26	54	40			---	---	0.16	2.994	---	---	2.994	0.913	0.50	0.140	0.0984	0.0980
13	6.00	0.28	44	40			---	---	0.17	2.443	---	---	2.443	0.745	0.50	0.135	0.1119	0.1119
14	6.50	0.22	23	40			sup	1.286	---	---	---	---	1.282	0.391	0.50	0.125	0.0710	0.0710
15	7.00	0.16	7	40			sup	0.404	---	---	---	---	0.404	0.123	0.50	0.095	0.0245	0.0244
16	7.50	0.12	4	40			sup	0.238	---	---	---	---	0.238	0.073	0.50	0.070	0.0068	0.0068
17	8.00	0.14	20	40			sup	1.120	---	---	---	---	1.112	0.339	0.50	0.065	0.0135	0.0134
18	8.50	0.12	6	40			sup	0.349	---	---	---	---	0.349	0.106	0.50	0.065	0.0145	0.0145
19	9.00	0.06	2	40			sup	0.128	---	---	---	---	0.128	0.039	0.50	0.045	0.0033	0.0033
																2.450	0.6087	0.4499

Tabla D.23: Hoja de cálculo de aforos por vadeo para sitio A03SUQI

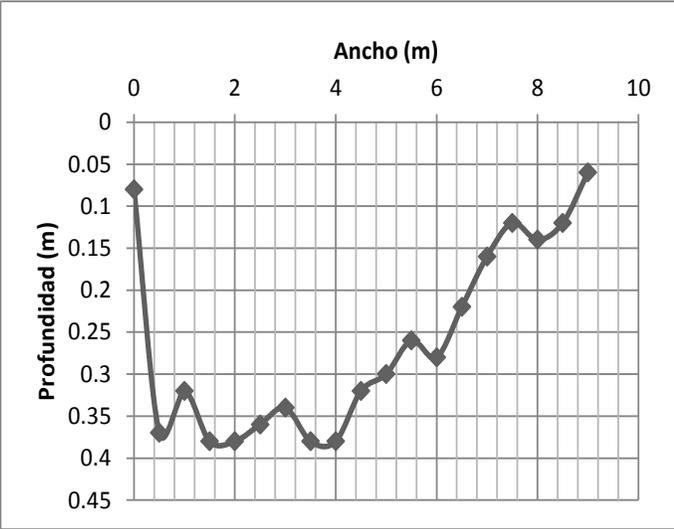
No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	No. REV 0.8	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL	CAUDAL LEIDO
							0.2		0.6		0.8							
							m	V	M	V	m	V						
1																		
2	0.50	0.22	2	40			sup	0.128	---	---	---	---	0.128	0.039	0.50	0.055	0.0011	0.0011
3	1.00	0.47	2	40			---	---	0.28	0.128	---	---	0.123	0.037	0.50	0.173	0.0067	0.0066
4	1.50	0.42	2	41.8			---	---	0.25	0.123	---	---	0.123	0.037	0.50	0.223	0.0085	0.0083
5	2.00	0.58	8	40			---	---	0.35	0.459	---	---	0.439	0.134	0.50	0.250	0.0222	0.0214
6	2.50	0.47	10	41.2			---	---	0.28	0.553	---	---	0.553	0.169	0.50	0.263	0.0405	0.0397
7	3.00	0.38	16	40			---	---	0.23	0.900	---	---	0.900	0.274	0.50	0.213	0.0470	0.0471
8	3.50	0.40	17	40.9			---	---	0.24	0.934	---	---	0.934	0.285	0.50	0.195	0.0545	0.0545
9	4.00	0.40	17	40			---	---	0.24	0.955	---	---	0.955	0.291	0.50	0.200	0.0576	0.0576
10	4.50	0.39	16	40.7			---	---	0.23	0.885	---	---	0.885	0.270	0.50	0.198	0.0554	0.0554
11	5.00	0.40	20	40			---	---	0.24	1.120	---	---	1.120	0.341	0.50	0.198	0.0603	0.0603
12	5.50	0.38	24	40			---	---	0.23	1.341	---	---	1.341	0.409	0.50	0.195	0.0731	0.0731
13	6.00	0.34	21	40.2			---	---	0.20	1.170	---	---	1.169	0.356	0.50	0.180	0.0689	0.0689
14	6.50	0.33	17	40			---	---	0.20	0.955	---	---	0.453	0.138	0.50	0.168	0.0542	0.0414
15	7.00	0.26	7	41			---	---	0.16	0.394	---	---	0.394	0.120	0.50	0.148	0.0303	0.0190
16	7.50	0.22	17	40			sup	0.955	---	---	---	---	0.933	0.284	0.50	0.120	0.0247	0.0243
17	8.00	0.26	17	40.6			---	---	0.16	0.941	---	---	0.993	0.303	0.50	0.120	0.0347	0.0352
18	8.50	0.31	5	40			---	---	0.19	0.293	---	---	0.293	0.089	0.50	0.143	0.0268	0.0279
19	9.00	0.27	3	40			---	---	0.16	0.183	---	---	0.183	0.056	0.50	0.145	0.0105	0.0105
																3.183	0.6770	0.6523

ANEXO E. FICHAS DE LOS SITIOS

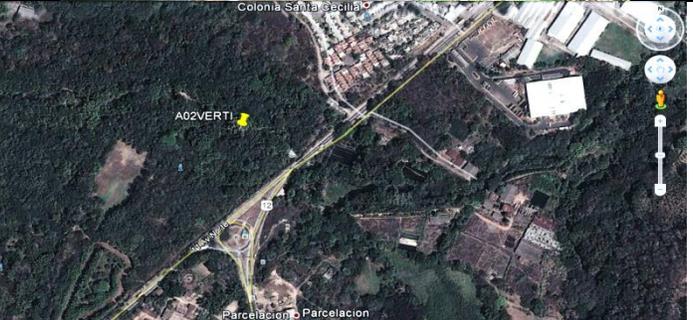
FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A01SUQUI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	11/03/2013 ; 12:35 pm	
Latitud:	14 00.801	
Longitud:	89 32.575	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	100 m aguas arriba de puente Sucio.	

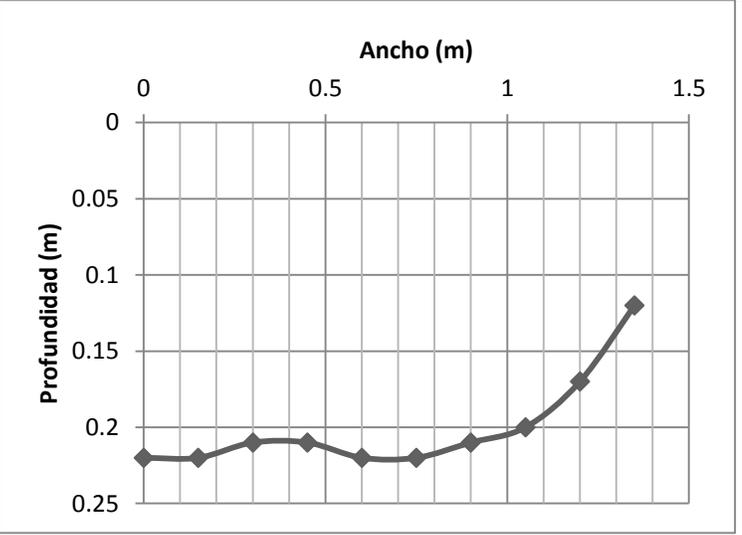
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.6086	
Área Mojada (m ²)	2.45	
Ancho del cauce (m)	10	
Perímetro Mojado (m)	10.49	
Radio Hidráulico (m)	0.2335	
Velocidad Media (m/s)	0.251	
Nivel medio (m)	0.262	
Coeficiente de Dispersión	11.8215	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A02VERTI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	11/03/2013 ; 1:00 pm	
Latitud:	14 00.791	
Longitud:	89 32.585	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	3 m debajo de punto A01SUQUI	

DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.0607	
Área Mojada (m ²)	0.2835	
Ancho del cauce (m)	1.5	
Perímetro Mojado (m)	1.878	
Radio Hidráulico (m)	0.1509	
Velocidad Media (m/s)	0.226	
Nivel medio (m)	0.200	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	0.3705	

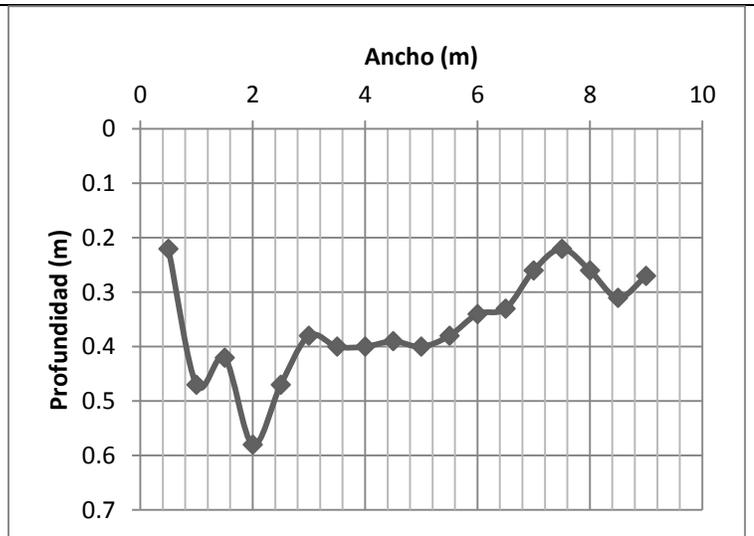
FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A03SUQUI
Nombre del río:	Suquiapa
Región Hidrográfica:	A
Cuenca:	Lempa
Fecha, Hora:	30/04/13; 4:11 pm
Latitud:	14 00.744
Longitud:	89 32.484
Departamento:	Santa Ana
Municipio:	Santa Ana
Dirección:	20 m debajo de puente Sucio



DATOS HIDROLÓGICOS

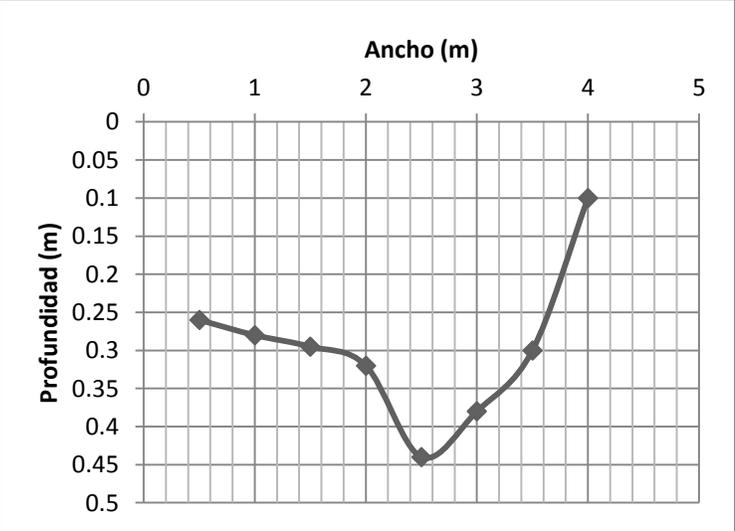
Caudal (m ³ /s)	0.6770
Área Mojada (m ²)	3.1825
Ancho del cauce (m)	9
Perímetro Mojado (m)	9.7072
Radio Hidráulico (m)	0.3278
Velocidad Media (m/s)	0.21
Nivel medio (m)	0.361
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	5.7072



FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A04APANT	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	30-04-13; ; 9:30 A.M	
Latitud:	14 00.734	
Longitud:	89 32.480	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	1 m debajo de A03SUQUI	

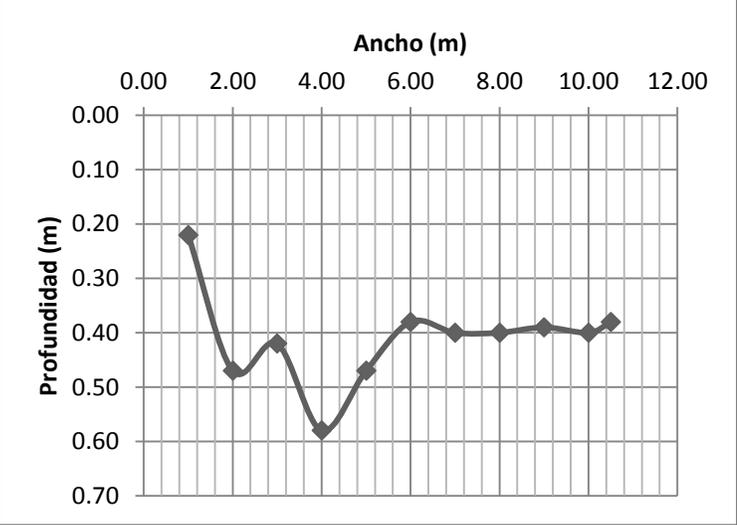
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.3460	
Área Mojada (m ²)	1.1625	
Ancho del cauce (m)	4.1	
Perímetro Mojado (m)	4.6670	
Radio Hidráulico (m)	0.2490	
Velocidad Media (m/s)	0.334	
Nivel medio (m)	0.297	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	2.4794	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A05SUQUI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	07-05-13; 4:10 pm	
Latitud:	14 00.736	
Longitud:	89 32.460	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	6 m abajo de A04SUQUI	

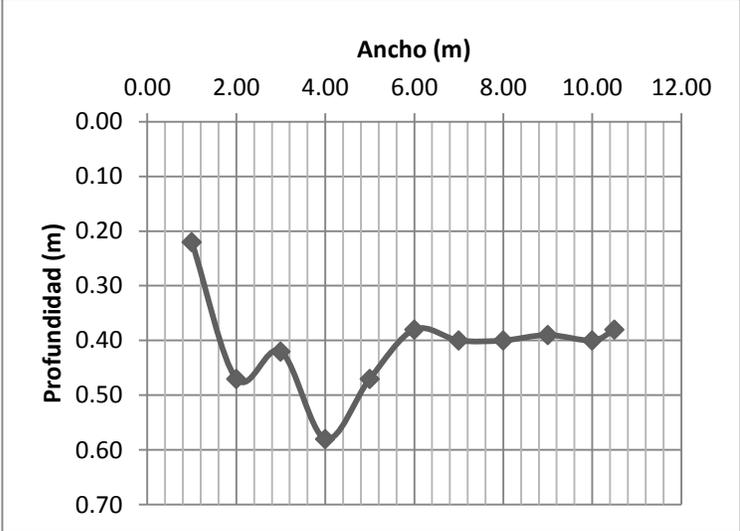
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	1.0905	
Área Mojada (m ²)	4.125	
Ancho del cauce (m)	10.5	
Perímetro Mojado (m)	11.2857	
Radio Hidráulico (m)	0.3655	
Velocidad Media (m/s)	0.253	
Nivel medio (m)	0.410	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	8.3945	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A06SAUCE-1	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	02-05-13	
Latitud:	14 00.745	
Longitud:	89 32.410	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	9 m arriba de puente improvisado por el beneficio	

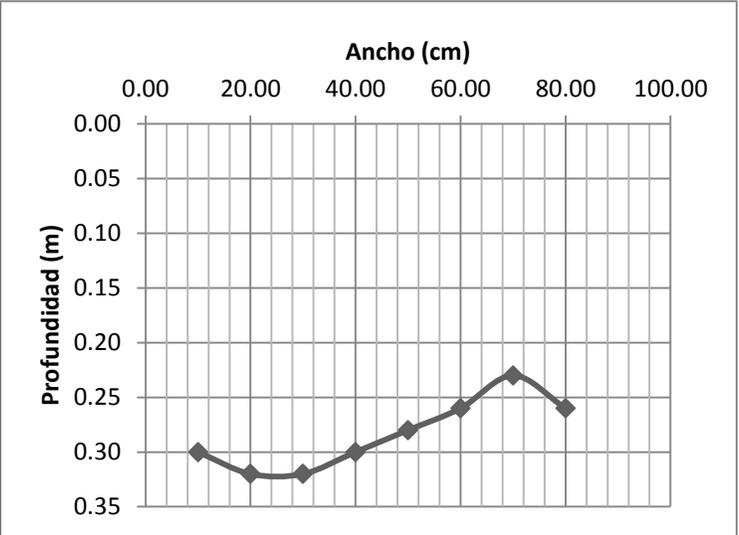
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.1602	
Área Mojada (m ²)	0.6446	
Ancho del cauce (m)	1.0	
Perímetro Mojado (m)	2.2892	
Radio Hidráulico (m)	0.2815	
Velocidad Media (m/s)	0.26	
Nivel medio (m)	0.647	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	0.1015	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A06SAUCE-2	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	02-05-13 ; 11:23 a.m.	
Latitud:	14 00.745	
Longitud:	89 32.410	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	bifurcación natural del río al salir de uso en el beneficio	

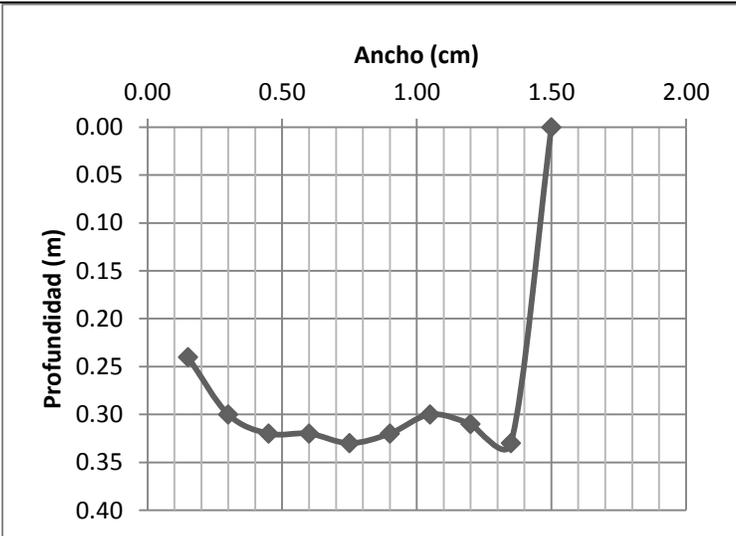
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.0196	
Área Mojada (m ²)	0.214	
Ancho del cauce (m)	0.8	
Perímetro Mojado (m)	1.335	
Radio Hidráulico (m)	0.1603	
Velocidad Media (m/s)	0.105	
Nivel medio (m)	0.284	
Coeficiente de Dispersión (m ² /s)	0.0461	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A07CARCAG	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	02-05-13	
Latitud:	14 00.711	
Longitud:	89 32.387	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	tributario proveniente de uso para piscinas, aporte simultáneo a la vertiente del sauce	

DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.0949	
Área Mojada (m ²)	0.4155	
Ancho del cauce (m)	1.5	
Perímetro Mojado (m)	2.054	
Radio Hidráulico (m)	0.2023	
Velocidad Media (m/s)	0.236	
Nivel medio (m)	0.308	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	0.2887	

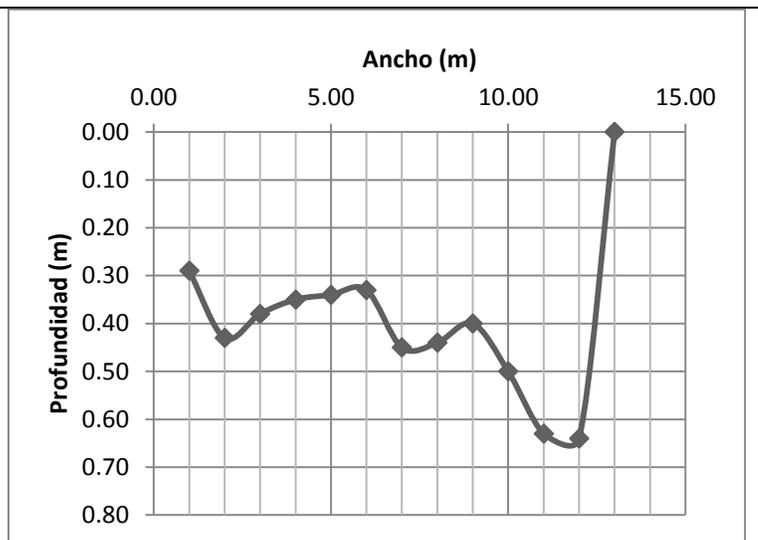
FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A08SUQUI
Nombre del río:	Suquiapa
Región Hidrográfica:	A
Cuenca:	Lempa
Fecha, Hora:	30-04-13; 11:23 a.m.
Latitud:	14 00.778
Longitud:	89 32.302
Departamento:	Santa Ana
Municipio:	Santa Ana
Dirección:	frente a viviendas dentro del beneficio, mucho antes del aporte de A09MOLIN



DATOS HIDROLÓGICOS

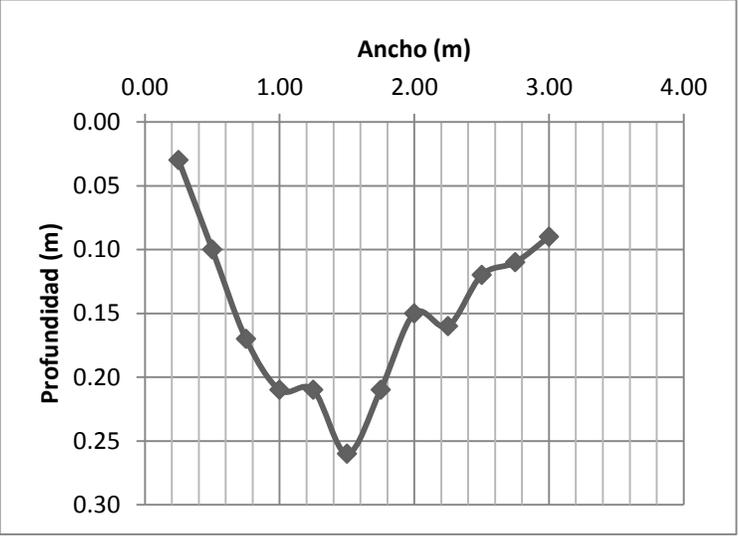
Caudal (m ³ /s)	1.2027
Área Mojada (m ²)	5.18
Ancho del cauce (m)	13
Perímetro Mojado (m)	13.7969
Radio Hidráulico (m)	0.3754
Velocidad Media (m/s)	0.253
Nivel medio (m)	0.432
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	12.5271



FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A09MOLIN	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	30-04-13;	
Latitud:	14 00.778	
Longitud:	89 32.302	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	20 m debajo de caída de agua	

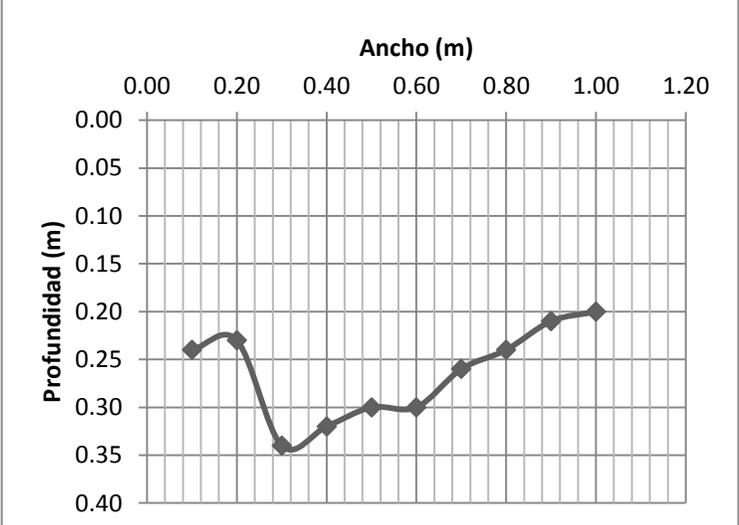
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.0669	
Área Mojada (m ²)	0.44375	
Ancho del cauce (m)	3	
Perímetro Mojado (m)	3.2958	
Radio Hidráulico (m)	0.1346	
Velocidad Media (m/s)	0.144	
Nivel medio (m)	0.152	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	1.0588	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A09MOLIN-2	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	07-05-13	
Latitud:	14 00.814	
Longitud:	89 32.223	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	Bifurcación elaborada para aprovechamiento del agua, en viviendas y riego.	

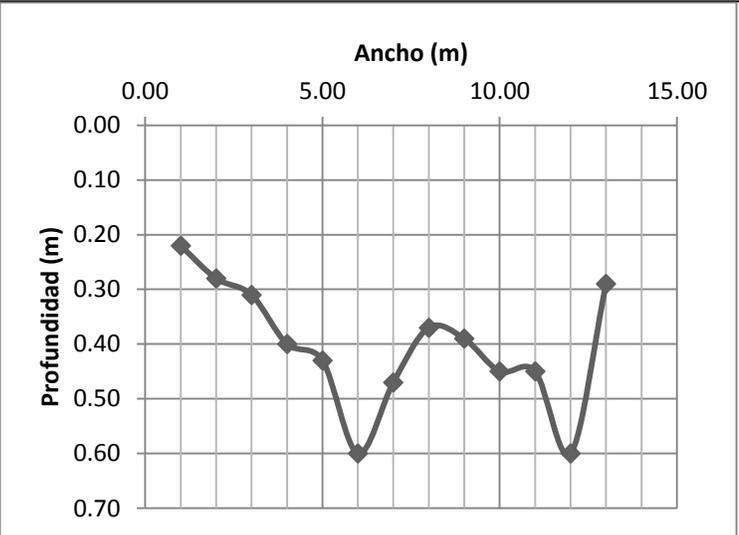
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.0839	
Área Mojada (m ²)	0.254	
Ancho del cauce (m)	1	
Perímetro Mojado (m)	1.508	
Radio Hidráulico (m)	0.1684	
Velocidad Media (m/s)	0.334	
Nivel medio (m)	0.264	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	0.2181	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A10SUQUI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	09-05-13	
Latitud:	14 01.108	
Longitud:	89 31.181	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	Finca San Cayetano justo antes del tributario A11ZARCO.	

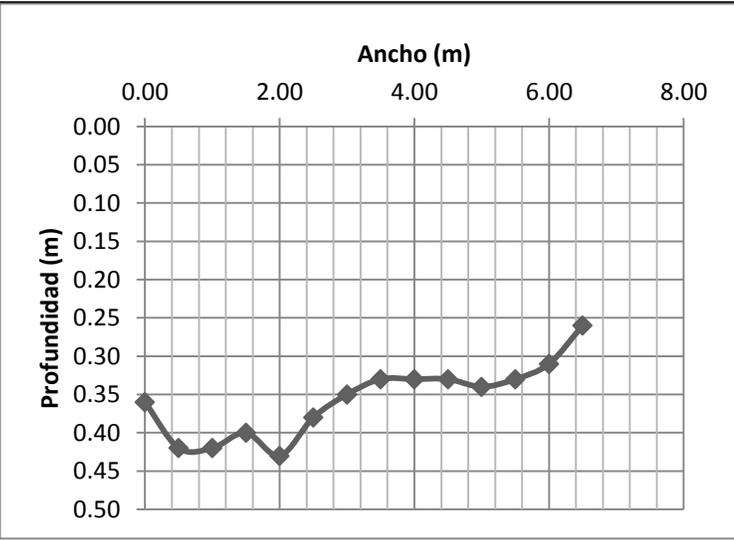
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	1.81162055276976	
Área Mojada (m ²)	5.115	
Ancho del cauce (m)	13	
Perímetro Mojado (m)	13.7869230769231	
Radio Hidráulico (m)	0.371003738213469	
Velocidad Media (m/s)	0.354178016181771	
Nivel medio (m)	0.405	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	17.7379883870968	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A11ZARCO	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	09-05-13	
Latitud:	14 01.133	
Longitud:	89 31.178	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	Delimitante natural entre terrenos, utilizada para lavar y recreación. Conocida como la Poza El Cajón	

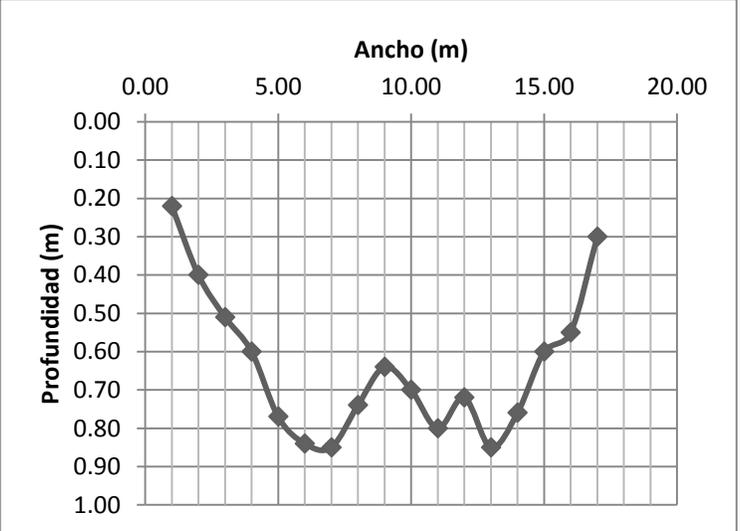
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.4221	
Área Mojada (m ²)	2.34	
Ancho del cauce (m)	6.5	
Perímetro Mojado (m)	7.22	
Radio Hidráulico (m)	0.3241	
Velocidad Media (m/s)	0.1804	
Nivel medio (m)	0.356	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	2.5766	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A12SUQUI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	04-05-13	
Latitud:	14 01.305	
Longitud:	89 30.294	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	3 m arriba de la vertiente	

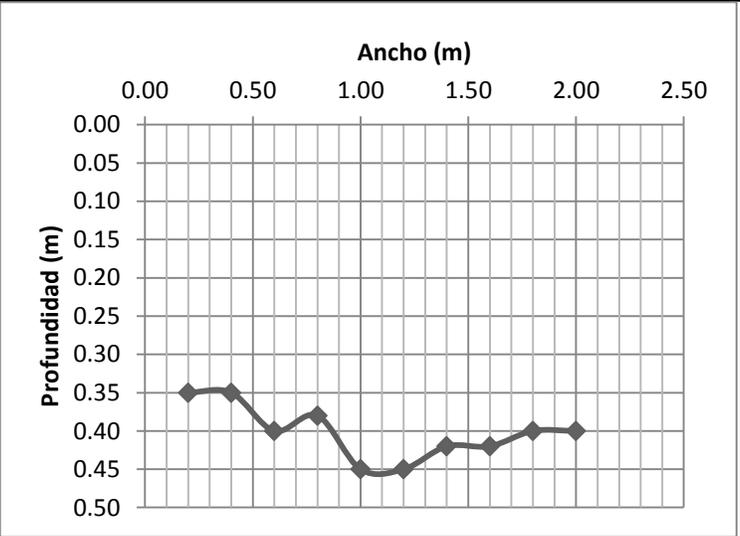
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	3.1248	
Área Mojada (m ²)	10.7	
Ancho del cauce (m)	17	
Perímetro Mojado (m)	18.2588	
Radio Hidráulico (m)	0.5860	
Velocidad Media (m/s)	0.298	
Nivel medio (m)	0.638	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	16.1657	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A13VERTI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	05-05-13	
Latitud:	14 01.447	
Longitud:	89 30.251	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	atravesando camino vecinal, junto a instalación de bombeo comunal	

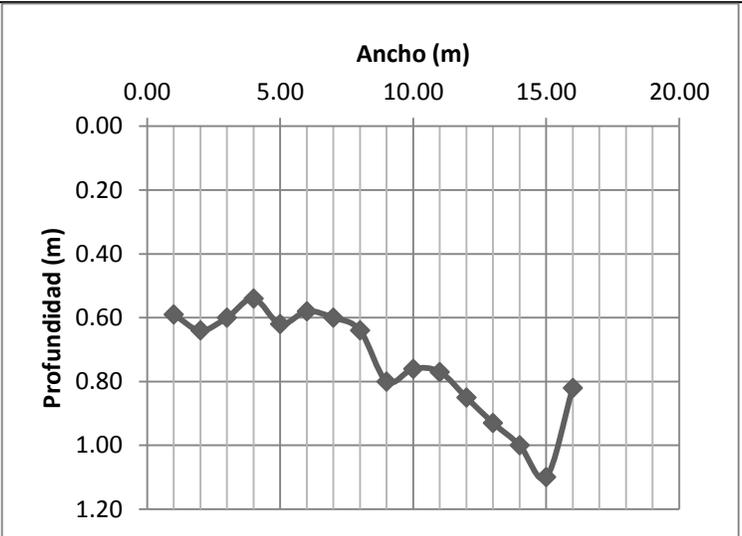
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.0528	
Área Mojada (m ²)	0.764	
Ancho del cauce (m)	2	
Perímetro Mojado (m)	2.764	
Radio Hidráulico (m)	0.2764	
Velocidad Media (m/s)	0.073	
Nivel medio (m)	0.402	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	0.1162	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A14SUQUI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	11-05-13	
Latitud:	14 01.271	
Longitud:	89 30.194	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	8 m debajo de puente, justo antes del tributario A15PUENTE	

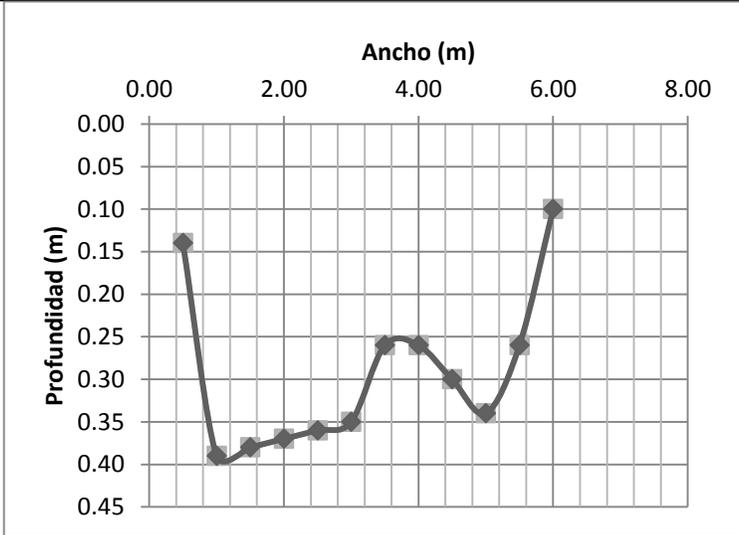
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	2.6595	
Área Mojada (m ²)	11.43	
Ancho del cauce (m)	16	
Perímetro Mojado (m)	17.4287	
Radio Hidráulico (m)	0.6558	
Velocidad Media (m/s)	0.199	
Nivel medio (m)	0.740	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	8.5448	

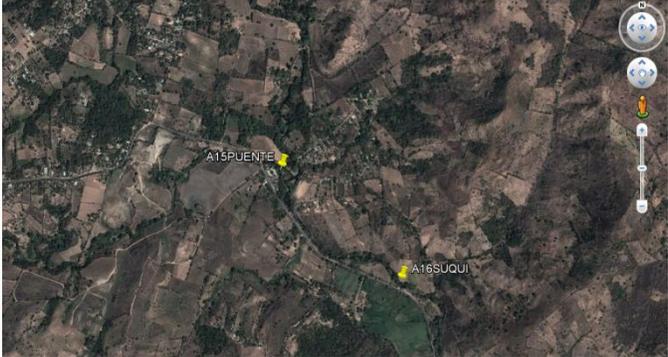
FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A15PUENTE	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	11-05-13	
Latitud:	14 00.429	
Longitud:	89 29.582	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	Sobre carretera a San Pablo Tacachico, bajo puente del mismo nombre	

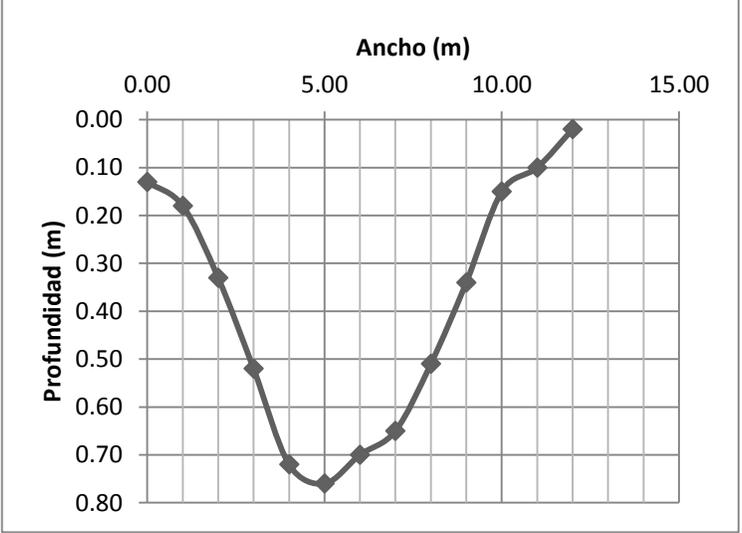
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.7193	
Área Mojada (m ²)	1.73	
Ancho del cauce (m)	6	
Perímetro Mojado (m)	6.5766	
Radio Hidráulico (m)	0.2630	
Velocidad Media (m/s)	0.407	
Nivel medio (m)	0.293	
Coeficiente de Dispersión (m ² /s)	6.1270	

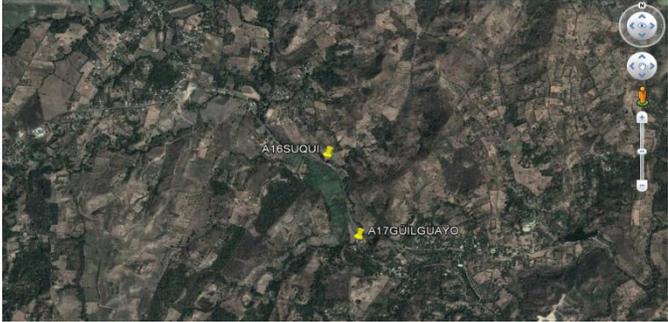
FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A16SUQUI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	11-05-13	
Latitud:	14 00.142	
Longitud:	89 29.264	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	sobre carretera a San Pablo Tacachico, antes del lugar donde realizan extracción de arena	

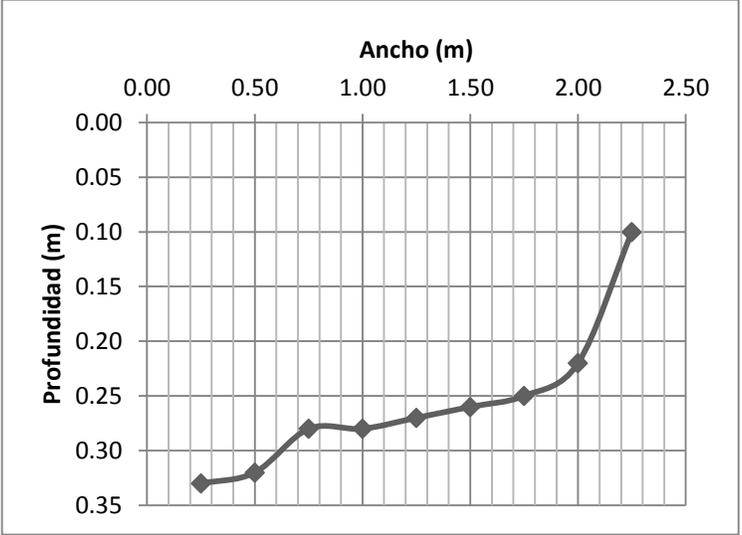
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	2.8997	 <p style="text-align: center;">Ancho (m)</p> <p style="text-align: center;">Profundidad (m)</p>
Área Mojada (m ²)	5.035	
Ancho del cauce (m)	12	
Perímetro Mojado (m)	12.8392	
Radio Hidráulico (m)	0.39215	
Velocidad Media (m/s)	0.498	
Nivel medio (m)	0.393	
Coeficiente de Dispersión (m ² /s)	20.1151	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A17GUILGUAYO	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	11-05-13	
Latitud:	13 59.731	
Longitud:	89 29.118	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	sobre carretera a San Pablo Tacachico, 45 m antes de desvío a la planta San Luis	

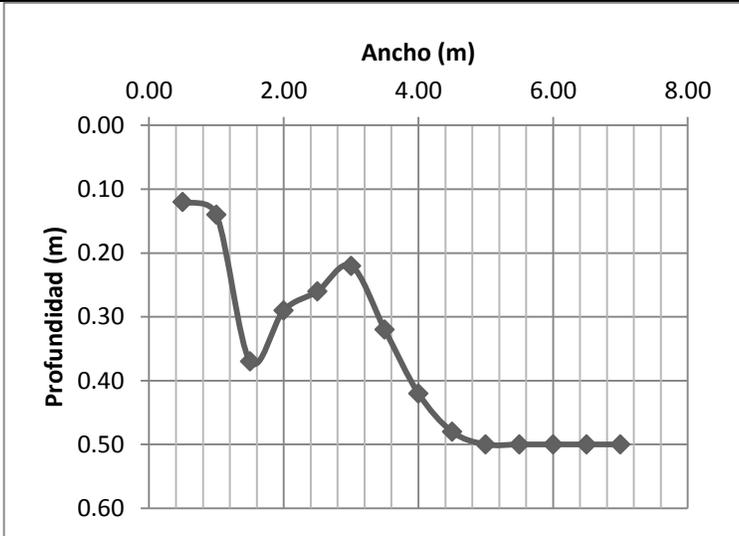
DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	0.1272	
Área Mojada (m ²)	0.5775	
Ancho del cauce (m)	2.5	
Perímetro Mojado (m)	2.962	
Radio Hidráulico (m)	0.1949	
Velocidad Media (m/s)	0.218	
Nivel medio (m)	0.257	
Coeficiente de Dispersión (m ² /s)	0.7687	

FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio:	A18SUQUI	
Nombre del río:	Suquiapa	
Región Hidrográfica:	A	
Cuenca:	Lempa	
Fecha, Hora:	11-05-13	
Latitud:	13 59.784	
Longitud:	89 29.020	
Departamento:	Santa Ana	
Municipio:	Santa Ana	
Dirección:	35 m antes de modificación de la Planta San Luis Nº 2	

DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m ³ /s)	3.0268	
Área Mojada (m ²)	2.405	
Ancho del cauce (m)	7	
Perímetro Mojado (m)	7.6871	
Radio Hidráulico (m)	0.3128	
Velocidad Media (m/s)	1.117	
Nivel medio (m)	0.366	
Coefficiente de Dispersión (m ² /s)	19.2400	

ANEXO G: HOJA DE CÁLCULO DE ECUACIÓN DE SINGH Y BECK

Hoja de cálculo de generación de datos de punto detector 2 a partir del punto detector 1.

t(s)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	$(x-vt)/2\sqrt{Dt}$	$\text{erfc}((x-vt)/2\sqrt{Dt})$	$(x+vt)/(2\sqrt{Dt})$	$\text{erfc}((x+vt)/(2\sqrt{Dt}))$	Función Pulso	Pulso	Modelado
0	0	0					0		
30	2	0	14.7419376	1.58106E-96	14.90943636	1.08921E-98	1.57222E-96	1.57222E-96	0.00E+00
60	3	0	10.3649043	1.19417E-48	10.60178329	8.13555E-51	1.18095E-48	1.18095E-48	2.36E-48
100	4.353533899	0	7.96745849	1.8948E-29	8.273267912	1.27202E-31	1.86029E-29	1.86029E-29	5.58E-29
130	5.540861326	0	6.94769147	8.74221E-23	7.296367859	5.80501E-25	8.53716E-23	8.53716E-23	3.72E-22
160	6.728188753	0	6.22629992	1.30482E-18	6.613121646	8.57083E-21	1.26751E-18	1.26743E-18	7.02E-18
190	8.707067798	0	5.68036604	9.49234E-16	6.101895244	6.16838E-18	9.17301E-16	9.16034E-16	6.16E-15
220	8.707067798	0	5.24795342	1.15603E-13	5.701542091	7.43239E-16	1.11141E-13	1.10224E-13	9.60E-13
250	9.894395225	0	4.89400505	4.47934E-12	5.377532205	2.8495E-14	4.28466E-12	4.17352E-12	3.63E-11
280	11.08172265	0	4.59698669	7.97237E-11	5.108703727	5.01847E-13	7.58777E-11	7.15931E-11	7.08E-10
310	13.0606017	0	4.34283985	8.16414E-10	4.881272903	5.08575E-12	7.73194E-10	6.97316E-10	7.73E-09
340	13.85215331	0	4.12194291	5.56578E-09	4.685827624	3.43133E-11	5.24544E-09	4.47225E-09	5.84E-08
370	14.64370493	0	3.92745772	2.78784E-08	4.515693892	1.70108E-10	2.61473E-08	2.09018E-08	2.90E-07
400	15.83103236	0	3.75437218	1.09936E-07	4.365991023	6.63968E-10	1.02619E-07	7.64715E-08	1.12E-06
430	16.22680817	0	3.59891691	3.58749E-07	4.233056825	2.14475E-09	3.33296E-07	2.30678E-07	3.65E-06
460	18.60146302	0	3.45819479	1.00516E-06	4.114082935	5.94876E-09	9.29502E-07	5.96205E-07	9.67E-06
490	18.99723883	0	3.32993716	2.48639E-06	4.00687517	1.45678E-08	2.28868E-06	1.35918E-06	2.53E-05
520	19.39301464	0	3.21233844	5.5477E-06	3.909691221	3.21807E-08	5.08335E-06	2.79467E-06	5.31E-05
550	19.39301464	0	3.10394117	1.13541E-05	3.821127837	6.52106E-08	1.0357E-05	5.27363E-06	1.02E-04
580	20.18456626	0	3.00355398	2.16008E-05	3.740040601	1.22842E-07	1.96164E-05	9.25937E-06	1.80E-04

610	20.18456626	0	2.91019218	3.86118E-05	3.665485735	2.17434E-07	3.49104E-05	1.5294E-05	3.09E-04
640	20.18456626	0	2.82303367	6.54155E-05	3.596677115	3.6479E-07	5.88875E-05	2.39771E-05	4.84E-04
670	20.18456626	0	2.74138597	0.000105794	3.53295403	5.84251E-07	9.48265E-05	3.5939E-05	7.25E-04
700	19.39301464	0	2.66466096	0.000164297	3.473756638	8.9861E-07	0.000146639	5.18125E-05	1.05E-03
730	18.99723883	0	2.59235548	0.000246235	3.41860704	1.33387E-06	0.000218845	7.22055E-05	1.40E-03
760	18.60146302	0	2.52403612	0.000357628	3.367094521	1.91883E-06	0.000316522	9.7677E-05	1.86E-03
790	17.8099114	0	2.45932724	0.000505144	3.318863907	2.68462E-06	0.000445238	0.000128716	2.39E-03
820	16.62258398	0	2.39790138	0.000696014	3.273606295	3.66411E-06	0.000610968	0.00016573	2.95E-03
850	16.62258398	0	2.33947159	0.00093793	3.231051608	4.89129E-06	0.000819997	0.000209029	3.47E-03
880	15.43525655	0	2.2837852	0.001238942	3.190962552	6.40068E-06	0.001078826	0.000258829	4.30E-03
910	14.24792912	0	2.23061868	0.001607342	3.153129695	8.22666E-06	0.001394071	0.000315245	4.87E-03
940	13.0606017	0	2.17977347	0.002051558	3.117367407	1.0403E-05	0.001772366	0.000378296	5.39E-03
970	12.26905008	0	2.13107247	0.00258005	3.083510508	1.29622E-05	0.002220278	0.000447912	5.85E-03
1000	11.87327427	0	2.08435716	0.003201205	3.051411467	1.59352E-05	0.002744219	0.000523941	6.43E-03
1030	11.08172265	0	2.03948513	0.003923253	3.020938062	1.93509E-05	0.003350376	0.000606158	7.20E-03
1060	10.68594684	0	1.99632806	0.004754183	2.991971403	2.32358E-05	0.00404465	0.000694274	7.69E-03
1090	9.102843607	0	1.95476993	0.005701672	2.964404262	2.7614E-05	0.004832598	0.000787948	8.42E-03
1120	9.498619416	0	1.91470556	0.00677303	2.938139643	3.25064E-05	0.005719393	0.000886795	8.07E-03
1150	8.311291989	0	1.87603937	0.007975144	2.913089574	3.79315E-05	0.006709791	0.000990398	9.41E-03
1180	7.519740371	0	1.83868419	0.009314443	2.889174053	4.39046E-05	0.007808105	0.001098314	9.13E-03
1210	7.519740371	0	1.80256042	0.010796869	2.866320154	5.04378E-05	0.009018189	0.001210084	9.10E-03
1240	6.728188753	0	1.76759514	0.012427851	2.844461239	5.75407E-05	0.01034343	0.001325241	9.97E-03
1270	5.936637135	0	1.73372143	0.014212296	2.823536289	6.52196E-05	0.011786744	0.001443313	9.71E-03
1300	5.936637135	0	1.70087775	0.016154579	2.803489307	7.34783E-05	0.013350579	0.001563835	9.28E-03
1330	5.145085517	0	1.66900737	0.018258544	2.784268805	8.23175E-05	0.015036927	0.001686348	1.00E-02
1360	4.749309708	0	1.63805792	0.020527509	2.765827347	9.17358E-05	0.01684733	0.001810403	9.31E-03
1390	4.353533899	0	1.60798094	0.022964276	2.748121154	0.000101729	0.018782899	0.00193557	9.19E-03
1420	3.95775809	0	1.57873155	0.025571139	2.731109748	0.000112291	0.020844333	0.002061434	8.97E-03

1450	3.95775809	0	1.55026806	0.028349907	2.714755645	0.000123414	0.023031936	0.002187602	8.66E-03
1480	3.166206472	0	1.52255173	0.031301918	2.699024073	0.000135086	0.025345638	0.002313702	9.16E-03
1510	3.166206472	0	1.49554651	0.034428059	2.683882731	0.000147297	0.027785021	0.002439383	7.72E-03
1540	2.374654854	0	1.46921873	0.037728792	2.669301566	0.000160032	0.03034934	0.002564319	8.12E-03
1570	2.374654854	0	1.44353701	0.041204171	2.655252578	0.000173276	0.033037546	0.002688206	6.38E-03
1600	1.978879045	0	1.41847195	0.044853871	2.641709645	0.000187014	0.03584831	0.002810764	6.67E-03
1630	1.978879045	0	1.39399608	0.048677208	2.628648367	0.000201228	0.038780046	0.002931736	5.80E-03
1660	1.978879045	0	1.3700836	0.052673164	2.616045918	0.000215899	0.041830934	0.003050888	6.04E-03
1690	1.583103236	0	1.34671033	0.056840411	2.603880925	0.000231009	0.044998941	0.003168007	6.27E-03
1720	1.583103236	0	1.32385352	0.061177335	2.592133349	0.000246538	0.048281842	0.003282901	5.20E-03
1750	1.187327427	0	1.30149178	0.065682056	2.580784382	0.000262465	0.051677244	0.003395401	5.38E-03
1780	1.187327427	0	1.27960498	0.070352452	2.569816351	0.00027877	0.055182599	0.003505355	4.16E-03
1810	1.187327427	0	1.25817413	0.075186181	2.559212632	0.000295432	0.058795229	0.00361263	4.29E-03
1840	0.791551618	0	1.23718129	0.080180701	2.548957573	0.000312429	0.062512339	0.00371711	4.41E-03
1870	0.791551618	0	1.21660955	0.085333289	2.539036424	0.000329741	0.066331037	0.003818698	3.02E-03
1900	0.791551618	0	1.1964429	0.09064106	2.529435268	0.000347345	0.070248346	0.003917309	3.10E-03
1930	0.791551618	0	1.17666619	0.096100983	2.520140964	0.000365222	0.074261221	0.004012875	3.18E-03
1960	0.791551618	0	1.15726507	0.101709904	2.511141095	0.000383348	0.078366562	0.00410534	3.25E-03
1990	0.395775809	0	1.13822594	0.107464553	2.502423915	0.000401704	0.082561224	0.004194662	3.32E-03
2020	0.395775809	0	1.11953589	0.113361568	2.493978304	0.000420268	0.086842034	0.00428081	1.69E-03
2050	0.395775809	0	1.10118268	0.119397502	2.485793726	0.000439021	0.091205796	0.004363762	1.73E-03
2080	0.395775809	0	1.08315464	0.125568839	2.477860193	0.000457941	0.095649304	0.004443508	1.76E-03
2110	0.395775809	0	1.06544071	0.131872007	2.470168226	0.000477009	0.100169351	0.004520047	1.79E-03
2140	0.395775809	0	1.04803034	0.13830339	2.462708823	0.000496206	0.104762735	0.004593384	1.82E-03
2170	0.395775809	0	1.03091348	0.144859334	2.455473432	0.000515512	0.109426269	0.004663534	1.85E-03
2200	0.395775809	0	1.01408058	0.151536163	2.448453919	0.00053491	0.114156787	0.004730517	1.87E-03
2230	0	0	0.99752251	0.158330184	2.441642544	0.000554381	0.118951147	0.004794361	1.90E-03
2260	0	0	0.98123054	0.165237697	2.435031937	0.000573907	0.123806244	0.004855097	0.00E+00

2290	0	0	0.96519636	0.172255003	2.428615075	0.000593472	0.128719006	0.004912762	0.00E+00
2320	0	0	0.94941203	0.17937841	2.422385264	0.000613059	0.133686405	0.004967399	0.00E+00
2350	0	0	0.93386994	0.186604239	2.416336116	0.000632652	0.138705456	0.005019052	0.00E+00
2380	0	0	0.91856281	0.193928833	2.410461534	0.000652236	0.143773226	0.00506777	0.00E+00
2410	0	0	0.9034837	0.201348559	2.404755696	0.000671796	0.148886831	0.005113605	0.00E+00
2440	0	0	0.88862592	0.208859815	2.399213036	0.000691317	0.154043443	0.005156612	0.00E+00
2470	0	0	0.87398309	0.216459032	2.393828233	0.000710787	0.159240289	0.005196846	0.00E+00
2500	0	0	0.85954908	0.224142681	2.388596197	0.00073019	0.164474655	0.005234366	0.00E+00
2530	0	0	0.84531802	0.231907275	2.383512055	0.000749516	0.169743888	0.005269233	0.00E+00
2560	0	0	0.83128425	0.239749373	2.378571141	0.000768751	0.175045394	0.005301506	0.00E+00
2590	0	0	0.81744237	0.247665581	2.373768984	0.000787885	0.180376642	0.005331248	0.00E+00
2620	0	0	0.80378716	0.255652554	2.369101298	0.000806905	0.185735163	0.005358521	0.00E+00
2650	0	0	0.79031362	0.263707005	2.364563972	0.000825802	0.191118553	0.00538339	0.00E+00
2680	0	0	0.77701694	0.271825695	2.360153063	0.000844565	0.19652447	0.005405917	0.00E+00
2710	0	0	0.76389248	0.280005447	2.355864785	0.000863185	0.201950635	0.005426166	0.00E+00
2740	0	0	0.75093579	0.288243138	2.351695501	0.000881653	0.207394836	0.0054442	0.00E+00
2770	0	0	0.73814258	0.296535705	2.347641719	0.000899959	0.212854919	0.005460084	0.00E+00
2800	0	0	0.72550872	0.304880145	2.34370008	0.000918097	0.218328798	0.005473879	0.00E+00
2830	0	0	0.71303021	0.313273515	2.339867356	0.000936057	0.223814448	0.005485649	0.00E+00
2860	0	0	0.70070321	0.321712932	2.33614044	0.000953833	0.229309904	0.005495456	0.00E+00
2890	0	0	0.68852403	0.330195577	2.332516344	0.000971419	0.234813266	0.005503362	0.00E+00
2920	0	0	0.67648907	0.33871869	2.328992191	0.000988807	0.240322691	0.005509425	0.00E+00
2950	0	0	0.66459489	0.347279574	2.325565208	0.001005991	0.245836399	0.005513708	0.00E+00
2980	0	0	0.65283816	0.355875593	2.322232725	0.001022966	0.251352667	0.005516268	0.00E+00
3010	0	0	0.64121566	0.364504173	2.318992169	0.001039727	0.256869831	0.005517164	0.00E+00
3040	0	0	0.62972426	0.373162801	2.315841059	0.001056269	0.262386283	0.005516452	0.00E+00
3070	0	0	0.61836097	0.381849027	2.312777002	0.001072587	0.267900473	0.005514189	0.00E+00
3100	0	0	0.60712288	0.390560457	2.309797688	0.001088677	0.273410903	0.00551043	0.00E+00

3130	0	0	0.59600717	0.399294763	2.306900889	0.001104535	0.278916131	0.005505228	0.00E+00
3160	0	0	0.58501112	0.408049672	2.304084454	0.001120157	0.284414768	0.005498637	0.00E+00
3190	0	0	0.57413209	0.416822971	2.301346306	0.001135541	0.289905475	0.005490707	0.00E+00
3220	0	0	0.56336753	0.425612506	2.298684435	0.001150684	0.295386965	0.00548149	0.00E+00
3250	0	0	0.55271496	0.434416182	2.296096904	0.001165582	0.300858	0.005471035	0.00E+00
3280	0	0	0.542172	0.443231957	2.293581837	0.001180233	0.306317389	0.005459389	0.00E+00
3310	0	0	0.53173632	0.452057847	2.29113742	0.001194636	0.311763989	0.0054466	0.00E+00
3340	0	0	0.52140566	0.460891925	2.288761899	0.001208789	0.317196704	0.005432714	0.00E+00
3370	0	0	0.51117786	0.469732316	2.286453579	0.001222689	0.322614479	0.005417776	0.00E+00
3400	0	0	0.50105078	0.478577197	2.284210816	0.001236336	0.328016307	0.005401828	0.00E+00
3430	0	0	0.49102238	0.487424802	2.282032021	0.001249728	0.33340122	0.005384913	0.00E+00
3460	0	0	0.48109066	0.496273413	2.279915655	0.001262865	0.338768293	0.005367073	0.00E+00
3490	0	0	0.47125369	0.505121363	2.277860226	0.001275745	0.344116641	0.005348348	0.00E+00
3520	0	0	0.46150959	0.513967037	2.275864289	0.001288368	0.349445417	0.005328776	0.00E+00
3550	0	0	0.45185652	0.522808866	2.273926446	0.001300735	0.354753813	0.005308396	0.00E+00
3580	0	0	0.44229272	0.53164533	2.272045338	0.001312844	0.360041056	0.005287244	0.00E+00
3610	0	0	0.43281647	0.540474957	2.27021965	0.001324695	0.365306412	0.005265356	0.00E+00
3640	0	0	0.42342608	0.549296319	2.268448106	0.001336289	0.370549178	0.005242766	0.00E+00
3670	0	0	0.41411993	0.558108035	2.266729469	0.001347627	0.375768688	0.00521951	0.00E+00
3700	0	0	0.40489644	0.566908764	2.265062535	0.001358708	0.380964306	0.005195618	0.00E+00
3730	0	0	0.39575405	0.575697214	2.263446142	0.001369533	0.386135429	0.005171123	0.00E+00
3760	0	0	0.38669128	0.58447213	2.261879155	0.001380104	0.391281484	0.005146055	0.00E+00
3790	0	0	0.37770667	0.5932323	2.260360478	0.00139042	0.39640193	0.005120445	0.00E+00
3820	0	0	0.36879878	0.601976554	2.258889042	0.001400483	0.40149625	0.005094321	0.00E+00
3850	0	0	0.35996625	0.610703758	2.257463812	0.001410294	0.40656396	0.00506771	0.00E+00
3880	0	0	0.35120771	0.619412818	2.25608378	0.001419854	0.4116046	0.00504064	0.00E+00
3910	0	0	0.34252187	0.628102679	2.254747967	0.001429165	0.416617738	0.005013137	0.00E+00
3940	0	0	0.33390743	0.636772319	2.253455422	0.001438228	0.421602964	0.004985227	0.00E+00

3970	0	0	0.32536317	0.645420756	2.25220522	0.001447044	0.426559897	0.004956933	0.00E+00
4000	0	0	0.31688785	0.65404704	2.250996463	0.001455615	0.431488176	0.004928279	0.00E+00
4030	0	0	0.3084803	0.662650255	2.249828274	0.001463944	0.436387465	0.004899289	0.00E+00
4060	0	0	0.30013937	0.671229519	2.248699803	0.00147203	0.441257448	0.004869983	0.00E+00
4090	0	0	0.29186393	0.679783984	2.247610223	0.001479877	0.446097832	0.004840384	0.00E+00
4120	0	0	0.28365287	0.688312829	2.246558727	0.001487486	0.450908345	0.004810513	0.00E+00
4150	0	0	0.27550514	0.696815269	2.245544532	0.00149486	0.455688733	0.004780388	0.00E+00
4180	0	0	0.26741967	0.705290545	2.244566873	0.001502	0.460438762	0.004750029	0.00E+00
4210	0	0	0.25939547	0.71373793	2.243625007	0.001508908	0.465158218	0.004719456	0.00E+00
4240	0	0	0.25143152	0.722156723	2.242718211	0.001515586	0.469846903	0.004688684	0.00E+00
4270	0	0	0.24352686	0.730546252	2.241845779	0.001522037	0.474504636	0.004657733	0.00E+00
4300	0	0	0.23568053	0.738905871	2.241007023	0.001528263	0.479131254	0.004626618	0.00E+00
4330	0	0.395775809	0.22789162	0.747234963	2.240201275	0.001534266	0.483726609	0.004595355	0.00E+00
4360	0	0.395775809	0.22015921	0.755532932	2.239427883	0.001540048	0.48829057	0.004563961	0.00E+00
4390	0	0.791551618	0.21248242	0.763799212	2.238686209	0.001545612	0.492823018	0.004532449	0.00E+00
4420	0	1.187327427	0.20486039	0.772033257	2.237975635	0.00155096	0.497323852	0.004500834	0.00E+00
4450	0	1.187327427	0.19729226	0.780234546	2.237295555	0.001556095	0.501792982	0.004469129	0.00E+00
4480	0	1.583103236	0.18977722	0.788402582	2.236645381	0.001561018	0.506230331	0.004437349	0.00E+00
4510	0	1.583103236	0.18231446	0.796536889	2.236024536	0.001565733	0.510635837	0.004405506	0.00E+00
4540	0	1.978879045	0.17490319	0.804637012	2.235432461	0.001570241	0.515009449	0.004373612	0.00E+00
4570	0	2.374654854	0.16754263	0.81270252	2.234868608	0.001574546	0.519351128	0.004341679	0.00E+00
4600	0	2.374654854	0.16023203	0.820732999	2.234332443	0.001578649	0.523660846	0.004309718	0.00E+00
4630	0	3.166206472	0.15297065	0.828728058	2.233823445	0.001582553	0.527938586	0.00427774	0.00E+00
4660	0	3.166206472	0.14575777	0.836687322	2.233341105	0.001586261	0.532184342	0.004245756	0.00E+00
4690	0	3.561982281	0.13859268	0.844610438	2.232884927	0.001589776	0.536398117	0.004213776	0.00E+00
4720	0	3.95775809	0.1314747	0.852497069	2.232454425	0.001593099	0.540579926	0.004181809	0.00E+00
4750	0	4.353533899	0.12440313	0.860346897	2.232049127	0.001596233	0.54472979	0.004149864	0.00E+00
4780	0	4.749309708	0.11737733	0.868159622	2.231668569	0.001599182	0.548847741	0.004117951	0.00E+00

4810	0	5.145085517	0.11039663	0.875934958	2.2313123	0.001601946	0.55293382	0.004086079	0.00E+00
4840	0	5.540861326	0.10346041	0.883672638	2.230979879	0.00160453	0.556988074	0.004054254	0.00E+00
4870	0	5.936637135	0.09656804	0.891372409	2.230670874	0.001606935	0.56101056	0.004022486	0.00E+00
4900	0	6.332412944	0.08971891	0.899034035	2.230384865	0.001609164	0.56500134	0.003990781	0.00E+00
4930	0	6.728188753	0.08291242	0.906657294	2.230121439	0.00161122	0.568960487	0.003959147	0.00E+00
4960	0	7.123964562	0.07614799	0.914241978	2.229880194	0.001613104	0.572888077	0.00392759	0.00E+00
4990	0	7.519740371	0.06942505	0.921787893	2.229660737	0.00161482	0.576784194	0.003896118	0.00E+00
5020	0	7.519740371	0.06274304	0.92929486	2.229462682	0.00161637	0.58064893	0.003864736	0.00E+00
5050	0	7.91551618	0.05610139	0.936762712	2.229285655	0.001617757	0.58448238	0.00383345	0.00E+00
5080	0	8.311291989	0.04949958	0.944191294	2.229129286	0.001618983	0.588284647	0.003802267	0.00E+00
5110	0	8.311291989	0.04293707	0.951580467	2.228993216	0.00162005	0.592055838	0.003771191	0.00E+00
5140	0	8.707067798	0.03641334	0.9589301	2.228877093	0.001620962	0.595796066	0.003740228	0.00E+00
5170	0	8.707067798	0.02992789	0.966240075	2.228780573	0.00162172	0.599505448	0.003709383	0.00E+00
5200	0	9.102843607	0.02348021	0.973510287	2.228703319	0.001622327	0.603184109	0.00367866	0.00E+00
5230	0	9.498619416	0.01706982	0.980740639	2.228645002	0.001622785	0.606832173	0.003648065	0.00E+00
5260	0	9.498619416	0.01069624	0.987931048	2.228605298	0.001623097	0.610449773	0.0036176	0.00E+00
5290	0	9.498619416	0.00435899	0.995081438	2.228583892	0.001623265	0.614037044	0.003587271	0.00E+00
5320	0	9.894395225	-0.00194239	1.002191746	2.228580476	0.001623292	0.617594126	0.003557081	0.00E+00
5350	0	9.894395225	-0.00820834	1.009261916	2.228594746	0.00162318	0.62112116	0.003527034	0.00E+00
5380	0	9.894395225	-0.01443933	1.016291903	2.228626406	0.001622931	0.624618293	0.003497134	0.00E+00
5410	0	9.894395225	-0.02063577	1.023281671	2.228675167	0.001622548	0.628085676	0.003467383	0.00E+00
5440	0	9.894395225	-0.02679811	1.030231193	2.228740744	0.001622033	0.63152346	0.003437784	0.00E+00
5470	0	9.894395225	-0.03292676	1.037140449	2.228822859	0.001621388	0.634931801	0.003408341	0.00E+00
5500	0	9.894395225	-0.03902214	1.044009429	2.228921239	0.001620615	0.638310858	0.003379057	0.00E+00
5530	0	9.894395225	-0.04508465	1.05083813	2.229035619	0.001619718	0.641660792	0.003349934	0.00E+00
5560	0	9.894395225	-0.05111469	1.057626557	2.229165735	0.001618697	0.644981765	0.003320973	0.00E+00
5590	0	9.894395225	-0.05711265	1.064374723	2.229311333	0.001617556	0.648273945	0.003292179	0.00E+00
5620	0	9.894395225	-0.06307892	1.071082647	2.22947216	0.001616296	0.651537497	0.003263553	0.00E+00

5650	0	9.498619416	-0.06901387	1.077750355	2.229647972	0.00161492	0.654772593	0.003235096	0.00E+00
5680	0	9.498619416	-0.07491788	1.084377883	2.229838526	0.00161343	0.657979404	0.003206811	0.00E+00
5710	0	9.498619416	-0.08079131	1.090965268	2.230043587	0.001611827	0.661158104	0.0031787	0.00E+00
5740	0	9.102843607	-0.08663451	1.097512559	2.230262922	0.001610115	0.664308868	0.003150764	0.00E+00
5770	0	9.102843607	-0.09244785	1.104019806	2.230496306	0.001608295	0.667431872	0.003123004	0.00E+00
5800	0	8.707067798	-0.09823166	1.110487068	2.230743514	0.001606369	0.670527294	0.003095422	0.00E+00
5830	0	8.707067798	-0.10398629	1.11691441	2.231004328	0.00160434	0.673595313	0.00306802	0.00E+00
5860	0	8.311291989	-0.10971207	1.123301899	2.231278535	0.001602209	0.676636111	0.003040798	0.00E+00
5890	0	8.311291989	-0.11540933	1.129649613	2.231565925	0.001599978	0.679649868	0.003013757	0.00E+00
5920	0	8.311291989	-0.12107839	1.135957629	2.231866291	0.001597649	0.682636767	0.002986899	0.00E+00
5950	0	7.91551618	-0.12671957	1.142226033	2.232179431	0.001595225	0.685596991	0.002960224	0.00E+00
5980	0	7.91551618	-0.13233318	1.148454914	2.232505148	0.001592707	0.688530725	0.002933734	0.00E+00
6010	0	7.519740371	-0.13791953	1.154644366	2.232843246	0.001590097	0.691438152	0.002907428	0.00E+00
6040	0	7.123964562	-0.14347892	1.160794489	2.233193535	0.001587398	0.694319459	0.002881307	0.00E+00
6070	0	7.123964562	-0.14901165	1.166905384	2.233555827	0.00158461	0.697174832	0.002855372	0.00E+00
6100	0	6.728188753	-0.154518	1.172977158	2.23392994	0.001581736	0.700004456	0.002829624	0.00E+00
6130	0	6.728188753	-0.15999828	1.179009922	2.234315693	0.001578777	0.702808518	0.002804062	0.00E+00
6160	0	6.332412944	-0.16545276	1.185003791	2.234712908	0.001575736	0.705587206	0.002778688	0.00E+00
6190	0	6.332412944	-0.17088171	1.190958883	2.235121412	0.001572614	0.708340707	0.0027535	0.00E+00
6220	0	5.936637135	-0.17628542	1.19687532	2.235541034	0.001569413	0.711069207	0.0027285	0.00E+00
6250	0	5.936637135	-0.18166416	1.202753227	2.235971608	0.001566135	0.713772895	0.002703688	0.00E+00
6280	0	5.540861326	-0.18701818	1.208592731	2.236412968	0.001562781	0.716451958	0.002679063	0.00E+00
6310	0	5.540861326	-0.19234774	1.214393965	2.236864953	0.001559354	0.719106583	0.002654625	0.00E+00
6340	0	5.145085517	-0.19765312	1.220157063	2.237327405	0.001555854	0.721736958	0.002630375	0.00E+00
6370	0	5.145085517	-0.20293455	1.225882162	2.237800169	0.001552283	0.724343269	0.002606312	0.00E+00
6400	0	4.749309708	-0.20819229	1.231569402	2.238283091	0.001548644	0.726925705	0.002582436	0.00E+00
6430	0	4.353533899	-0.21342658	1.237218926	2.238776021	0.001544937	0.729484451	0.002558746	0.00E+00
6460	0	4.353533899	-0.21863767	1.242830879	2.239278811	0.001541165	0.732019695	0.002535244	0.00E+00

6490	0	3.95775809	-0.22382579	1.248405409	2.239791318	0.001537328	0.734531622	0.002511927	0.00E+00
6520	0	3.95775809	-0.22899117	1.253942665	2.240313398	0.001533429	0.737020418	0.002488796	0.00E+00
6550	0	3.95775809	-0.23413406	1.2594428	2.240844912	0.001529469	0.739486269	0.002465851	0.00E+00
6580	0	3.561982281	-0.23925466	1.264905967	2.241385723	0.001525449	0.741929359	0.00244309	0.00E+00
6610	0	3.561982281	-0.24435321	1.270332323	2.241935694	0.001521371	0.744349873	0.002420514	0.00E+00
6640	0	3.166206472	-0.24942993	1.275722027	2.242494695	0.001517236	0.746747994	0.002398121	0.00E+00
6670	0	3.166206472	-0.25448504	1.281075237	2.243062594	0.001513046	0.749123906	0.002375912	0.00E+00
6700	0	3.166206472	-0.25951874	1.286392115	2.243639263	0.001508803	0.751477791	0.002353885	0.00E+00
6730	0	2.770430663	-0.26453125	1.291672825	2.244224576	0.001504507	0.753809832	0.002332041	0.00E+00
6760	0	2.770430663	-0.26952278	1.296917532	2.24481841	0.00150016	0.75612021	0.002310378	0.00E+00
6790	0	2.770430663	-0.27449353	1.302126402	2.245420643	0.001495763	0.758409105	0.002288895	0.00E+00
6820	0	2.374654854	-0.27944371	1.307299602	2.246031155	0.001491318	0.760676697	0.002267592	0.00E+00
6850	0	2.374654854	-0.2843735	1.312437302	2.246649829	0.001486826	0.762923166	0.002246469	0.00E+00
6880	0	2.374654854	-0.28928311	1.317539671	2.247276548	0.001482288	0.765148689	0.002225523	0.00E+00
6910	0	2.374654854	-0.29417274	1.322606882	2.2479112	0.001477706	0.767353445	0.002204756	0.00E+00
6940	0	1.978879045	-0.29904256	1.327639107	2.248553672	0.00147308	0.76953761	0.002184165	0.00E+00
6970	0	1.978879045	-0.30389277	1.332636519	2.249203855	0.001468413	0.771701359	0.00216375	0.00E+00
7000	0	1.978879045	-0.30872356	1.337599293	2.24986164	0.001463705	0.773844869	0.00214351	0.00E+00
7030	0	1.583103236	-0.3135351	1.342527604	2.250526921	0.001458958	0.775968313	0.002123444	0.00E+00
7060	0	1.978879045	-0.31832757	1.347421629	2.251199593	0.001454172	0.778071864	0.002103551	0.00E+00
7090	0	1.583103236	-0.32310116	1.352281545	2.251879553	0.001449349	0.780155694	0.002083831	0.00E+00
7120	0	1.583103236	-0.32785603	1.35710753	2.252566701	0.00144449	0.782219976	0.002064282	0.00E+00
7150	0	1.583103236	-0.33259237	1.361899761	2.253260936	0.001439596	0.784264879	0.002044903	0.00E+00
7180	0	1.583103236	-0.33731033	1.366658419	2.253962161	0.001434669	0.786290572	0.002025694	0.00E+00
7210	0	1.187327427	-0.34201009	1.371383683	2.254670279	0.001429708	0.788297225	0.002006653	0.00E+00
7240	0	1.187327427	-0.34669182	1.376075733	2.255385195	0.001424716	0.790285005	0.00198778	0.00E+00
7270	0	1.187327427	-0.35135567	1.38073475	2.256106817	0.001419694	0.792254078	0.001969073	0.00E+00
7300	0	1.187327427	-0.3560018	1.385360914	2.256835051	0.001414642	0.794204609	0.001950532	0.00E+00

7330	0	1.187327427	-0.36063038	1.389954408	2.257569808	0.001409562	0.796136764	0.001932155	0.00E+00
7360	0	0.791551618	-0.36524157	1.394515413	2.258310998	0.001404454	0.798050705	0.001913941	0.00E+00
7390	0	0.791551618	-0.36983551	1.399044411	2.259058535	0.00139932	0.799946595	0.00189589	0.00E+00
7420	0	0.791551618	-0.37441236	1.403540683	2.259812332	0.001394161	0.801824595	0.001878	0.00E+00
7450	0	0.791551618	-0.37897226	1.408005314	2.260572304	0.001388977	0.803684865	0.00186027	0.00E+00
7480	0	0.791551618	-0.38351538	1.412438184	2.261338367	0.001383769	0.805527565	0.0018427	0.00E+00
7510	0	0.791551618	-0.38804185	1.416839478	2.26211044	0.001378539	0.807352852	0.001825287	0.00E+00
7540	0	0.791551618	-0.39255182	1.421209377	2.262888441	0.001373287	0.809160884	0.001808032	0.00E+00
7570	0	0.791551618	-0.39704543	1.425548065	2.263672291	0.001368014	0.810951817	0.001790932	0.00E+00
7600	0	0.791551618	-0.40152283	1.429855724	2.264461911	0.001362721	0.812725804	0.001773988	0.00E+00
7630	0	0.395775809	-0.40598414	1.434132538	2.265257224	0.001357409	0.814483001	0.001757197	0.00E+00
7660	0	0.791551618	-0.41042952	1.438378688	2.266058154	0.001352079	0.81622356	0.001740559	0.00E+00
7690	0	0.395775809	-0.41485909	1.442594357	2.266864625	0.001346732	0.817947632	0.001724072	0.00E+00
7720	0	0.395775809	-0.41927299	1.446779729	2.267676565	0.001341368	0.819655368	0.001707736	0.00E+00
7750	0	0.395775809	-0.42367135	1.450934985	2.2684939	0.001335988	0.821346918	0.001691549	0.00E+00
7780	0	0.395775809	-0.4280543	1.455060307	2.26931656	0.001330594	0.823022428	0.001675511	0.00E+00
7810	0	0.395775809	-0.43242197	1.459155878	2.270144472	0.001325185	0.824682047	0.001659619	0.00E+00
7840	0	0.395775809	-0.43677449	1.463221879	2.270977569	0.001319763	0.826325921	0.001643874	0.00E+00
7870	0	0.395775809	-0.44111198	1.467258492	2.27181578	0.001314328	0.827954195	0.001628273	0.00E+00
7900	0	0.395775809	-0.44543456	1.471265897	2.27265904	0.001308882	0.829567012	0.001612817	0.00E+00
7930	0	0.395775809	-0.44974237	1.475244276	2.273507282	0.001303424	0.831164515	0.001597503	0.00E+00
7960	0	0.395775809	-0.45403551	1.479193809	2.27436044	0.001297956	0.832746846	0.001582331	0.00E+00
7990	0	0.395775809	-0.45831412	1.483114676	2.27521845	0.001292478	0.834314145	0.001567299	0.00E+00
8020	0	0.395775809	-0.4625783	1.487007057	2.276081248	0.001286991	0.835866552	0.001552407	0.00E+00
8050	0	0.395775809	-0.46682818	1.490871131	2.276948772	0.001281495	0.837404205	0.001537653	0.00E+00
8080	0	0.395775809	-0.47106386	1.494707078	2.27782096	0.001275992	0.838927241	0.001523036	0.00E+00
8110	0	0.395775809	-0.47528547	1.498515075	2.278697751	0.001270482	0.840435797	0.001508556	0.00E+00
8140	0	0.395775809	-0.47949311	1.5022953	2.279579086	0.001264966	0.841930007	0.00149421	0.00E+00

