

Quispe Prado, W. ; Herrera, L. ; Sichez Muñoz, J. ; Parodi, M. ; Matar, M. ; Gomez Insausti, J. ; Calcagno, G. ; Barrea, L. ; Mechini, M. ; Luccini, E.

*Dispersión de contaminantes en cursos de agua.
Estudios en el río Chumbao, Perú*

Energeia, Año 14, N° 14, 2016

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central "San Benito Abad". Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Quispe Prado, W. et al. Dispersión de contaminantes en cursos de agua : estudios en el río Chumbao, Perú [en línea]. *Energeia*, 14(14), 2016.

Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/dispersion-contaminantes-curso-agua.pdf> [Fecha de consulta:]

Dispersión de contaminantes en cursos de agua. Estudios en el río Chumbao, Perú

W. Quispe Prado^{1#,2}, L. Herrera¹, J. Sichez Muñoz², M. Parodi^{1,3}, M. Matar^{1,3}, J. Gomez Insausti¹, G. Calcagno^{1*}, L. Barrea¹, M. Mechni¹ y E. Luccini^{1,4}

¹ Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina, Rosario, Argentina. ^{1#} Egresado de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable. ^{1*} Alumna de grado adscripta al proyecto.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional José María Arguedas, Perú.

³ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

⁴ CONICET - Centro de Excelencia en Productos y Procesos de la Provincia de Córdoba (CEPROCOR), Santa María de Punilla, Córdoba, Argentina.

Resumen. Se estudia el modo de dispersión de un dado contaminante vertido en un curso de agua mediante un método experimental consistente en el uso de un "marcador" o sustancia "traza". Se aplica en un tramo de 100 metros del río Chumbao en la Provincia de Andahuaylas, Perú. En la práctica, el marcador utilizado es una solución de sal común (cloruro de sodio) vertido mediante un tubo de dos pulgadas, recolectando las muestras tramo abajo cada 30 segundos. Analizando la conductividad eléctrica de las muestras se estima la concentración de marcador en cada punto de recolección, y con ello los posibles valores de los parámetros de dispersión de un eventual contaminante sobre el río. Se comprueba que un modelo simple de dispersión gaussiana representa de un modo suficientemente preciso las condiciones observadas.

Palabras Clave. Contaminantes en ríos; Transporte y modelos de dispersión de contaminantes en agua; Trazadores; Río Chumbao; Perú.

DISPERSION OF CONTAMINANTS IN WATER COURSES. STUDIES IN CHUMBAO RIVER, PERÚ.

Abstract. The dispersion of a given contaminant poured in a water course is studied through an experimental method consistent in the use of a "marker" or "trace" substance. It is applied in a 100 m section of Chumbao River in Andahuaylas Province, Perú. In practice, the used tracer is a common salt (sodium chloride) solution poured through a two-inch tube, collecting samples at the end of the section at a rate of 30 seconds. The concentration of tracer at each collection point is estimated by analyzing the electric conductivity of the samples, and from them the possible values of the dispersion parameters of an eventual contaminant on the river. It is verified that a simple Gaussian dispersion model is precise enough to represent the observed conditions.

Keywords. Contaminants on rivers; Transport and models of contaminant dispersion in water; Tracers; Chumbao River; Perú.

1. Introducción

Para el estudio de dispersión de contaminantes en un curso de agua se utilizan "trazadores". Un trazador es una sustancia específica que sirve para "marcar" una sustancia, un objeto o una fase, para después seguirlo a través del sistema, o analizarlo después que ha abandonado el sistema (Espinoza, Vinicio, & Zavaleta, 2013).

Un trazador debe cumplir como mínimo dos requisitos fundamentales:

- 1) Comportarse de un modo igual o similar al material marcado.

- 2) Tener por lo menos una propiedad que lo distinga del material marcado, de forma que sea fácilmente detectable.

En un río, un trazador ideal deberá moverse a la misma velocidad que el agua, permitiendo determinar el mayor número de factores de flujo y cumpliendo las siguientes condiciones:

- 1) Estabilidad química y biológica en el agua ensayada.
- 2) Interacción nula y no retención en el terreno, débil absorción y adsorción.
- 3) Inalterabilidad del flujo superficial.
- 4) Fácil detección cualitativa y cuantitativa, incluso a baja concentración.
- 5) Ausencia o muy bajas concentraciones en las aguas naturales.
- 6) No toxicidad hacia los seres vivos.
- 7) Facilidad en el transporte y manejo.
- 8) Disponibilidad económica así como en el mercado.

En este trabajo se desarrollan estudios experimentales mediante trazadores y simulación numérica de la dispersión de contaminantes en el río Chumbao, provincia de Andahuaylas en la región Apurímac, Perú, constituyendo parte del desarrollo de la tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable del Ing. Wilber Quispe Prado.

2. Materiales y métodos

2.1 Ubicación geográfica

La figura 1 muestra la ubicación geográfica de la Provincia de Andahuaylas en la región Apurímac, Perú, surcada por el río Chumbao que es el objeto de estudio en el presente trabajo.

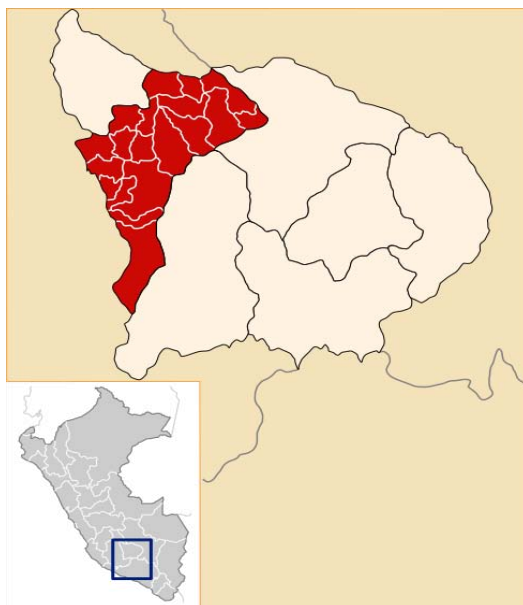


Figura 1. Ubicación geográfica de la Provincia de Andahuaylas en la región Apurímac, Perú.

2.2 Desarrollo experimental

Selección de tramo del río

Para el trabajo de campo se seleccionó un tramo del río Chumbao con las siguientes características:

- Estable, libre de rocas, plantas y otras obstrucciones que puedan crear turbulencia.
- Lecho plano, uniforme y estable para reducir componentes verticales de velocidad.

Acorde a dichas condiciones se eligió un tramo de río Chumbao sobre la Av. Manco Capac del distrito de Talavera, como se observa en la figura 2.

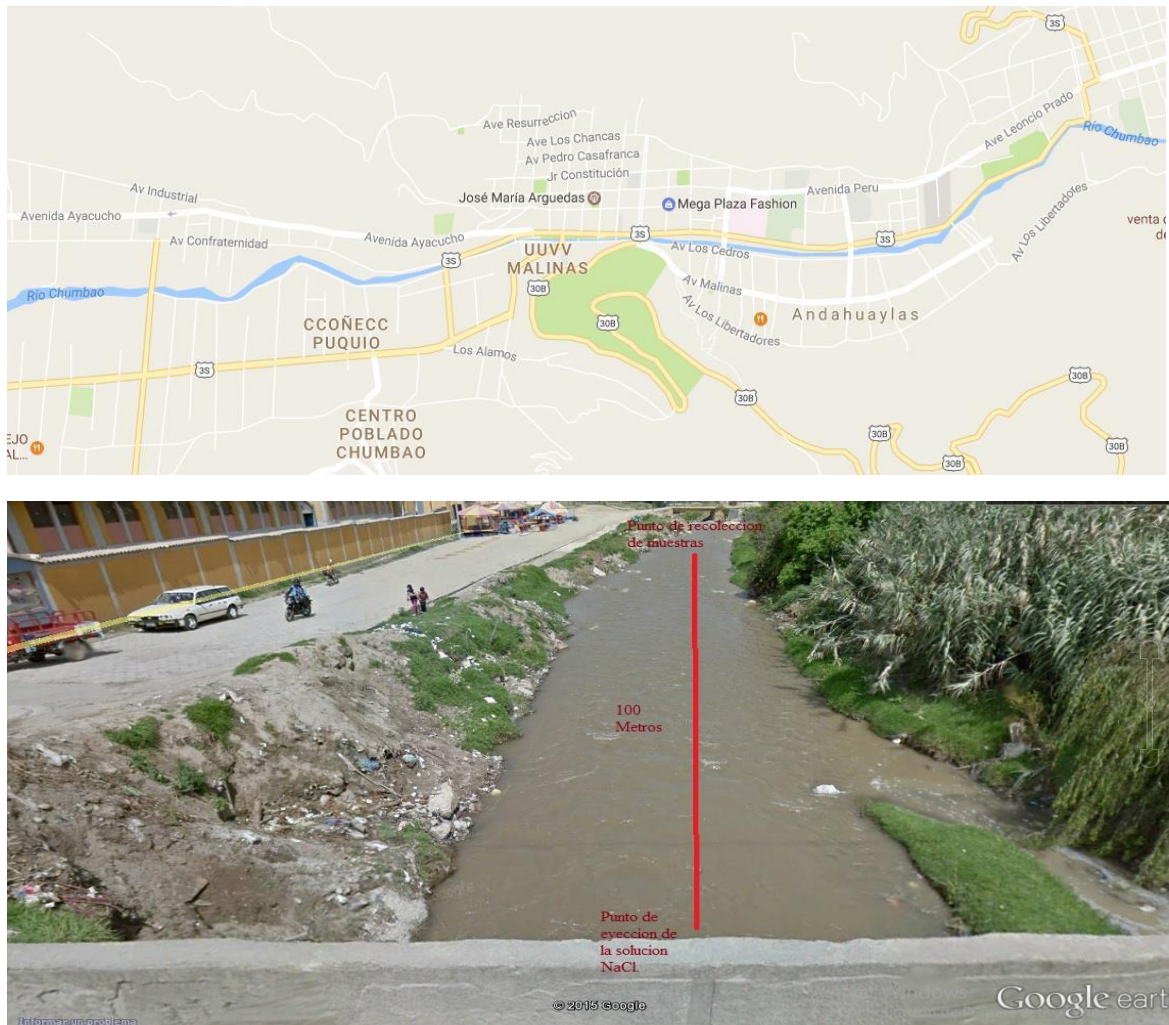


Figura 2. (superior) Mapa del recorrido del río Chumbao por la localidad de Andahuaylas. (inferior) Registro fotográfico y zonas de referencia sobre el río donde se realizaron la inyección del marcador y la recolección de muestras.

La primera actividad realizada en campo fue la limpieza de la sección de aforo, quitando cualquier obstáculo (ramas, piedras, lama, maleza, etc.) que dificulte la medición o que incida en la velocidad o corriente normal del vertido. El ancho de la sección de aforo seleccionada se realizó mediante cinta métrica. Una vez definidas las verticales donde se harán las mediciones, se procede a tomar las profundidades en cada una de ellas.

Técnica de inyección

Existen dos tipos de técnicas de inyección: continua e instantánea. Se recurrió a la segunda, que consiste en inyectar de forma instantánea o en un período de corta duración un volumen de una disolución con una concentración conocida de trazador. La inyección continua no es aplicable en la realización de ensayos de trazado, ya que el consumo de trazador sería enorme.

De la disolución “madre” se toma una muestra previa a la inyección, para verificar su concentración. Una inyección instantánea es fácilmente realizable siempre que el caudal del sumidero sea elevado, superior a 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.

Selección del trazador

Si bien existen varios tipos de trazadores para uso en ríos, en esta investigación se optó el cloruro de sodio por no ser tóxico y ser muy asequible. Sin embargo su manejo operacional es algo complejo, implicando cientos de litros de agua con algunos metros cúbicos de sal. La concentración a utilizar fue estimada a partir de las siguientes consideraciones:

1. La sensibilidad del sistema de medición. Se aconseja no preparar concentraciones más altas de lo necesario.
2. La posible toxicidad del trazador en altas concentraciones.
3. Las características hidrológicas del cuerpo de agua, tales el volumen de agua que va a ser trazado.
4. La capacidad de absorción del medio.

La mayoría de estos factores no son bien conocidos, pero existen fórmulas estimativas de la cantidad de trazador a utilizar en un ensayo.

Inyección de trazador y recolección de muestras

Se preparó una solución de 50 litros de agua del mismo río Chumbao a una concentración de 4 molar de cloruro de sodio en un cilindro de polietileno con capacidad de 90 litros, luego se procedió a separar en partes iguales en bidones con capacidad de 25 litros cada uno. Para inyectar la solución preparada se utilizó una tubería de PVC de 5 m de longitud y 4 pulgadas de diámetro, 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. Además, desde el inicio se tomaron las muestras con un intervalo de tiempo de 30 segundos en frascos de 50 ml, un total de 100 muestras que fueron depositadas debidamente rotuladas para luego realizar la lectura de la conductividad eléctrica a una temperatura constante de 15 °C.

En cuanto a la recolección de muestras, se escogió un sitio aproximadamente 100 m aguas abajo del lugar de inyección. Se asignaron dos personas del equipo para monitorear este punto de detección.

Equipos de trabajo utilizados

- Conductímetro portátil, código HI 98324, marca Hanna.
- Guantes, mascarillas descartables.
- Trajes de Vadeo y/o Botas de hule.
- Cilindro de polietileno, capacidad 90 litros.
- 2 Bidones de polietileno, capacidad 25 litros.
- 2 baldes, capacidad 12 litros.
- Cinta métrica de fibra de vidrio de 100 metros.
- Frascos de polietileno de alta densidad capacidad 50 ml.
- Rotulador.
- Calculadora.
- Cronómetro.

2.3 Modelo de dispersión de contaminantes en río

Los ríos, como otras fuentes de agua, presentan un comportamiento dinámico muchas veces impredecible. Sin embargo, según lo señalan Roffel y Rijnsdorp (1982), para encontrar un modelo matemático que explique satisfactoriamente su comportamiento, deben hacerse una serie de asunciones simplificadoras:

1. El río tiene en todas partes la misma área transversal y el mismo flujo. Es evidente que el nivel del agua en el río no es el mismo en todas partes, particularmente después de lluvias locales largas, pero se trabajará con un flujo promedio.

2. La mezcla sobre el área de la sección transversal es ideal, es decir, las emisiones de contaminantes sobre un lado del río se mezclarán idealmente con la corriente del lado opuesto.
3. La contaminación puede caracterizarse por una concentración, por ejemplo demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o demanda química de oxígeno (DQO).
4. La contaminación desaparece a través de una reacción de primer orden.
5. El mezclado axial puede caracterizarse por un coeficiente de dispersión constante D.

Se considera una sección de río con una longitud Δz . El balance de masa es expresado por la siguiente ecuación:

$$A \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = Q(c)_z - Q(c)_{z+\Delta z} - A \cdot D \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + A \cdot D \frac{\partial c}{\partial z} - K \cdot A \cdot \Delta z (c)_z \quad (1)$$

↓	↓	↓	↓
acumulación de materia	transporte por convección	transporte por difusión	transporte por reacción química

Donde:

A= área transversal del río (m²)

c= concentración del contaminante (kg/m³)

Q= caudal del río (m³/s)

D= coeficiente de dispersión axial del contaminante (m/s²)

k= constante de reacción de primer orden de desaparición del contaminante (1/s)

El primer término en la ecuación (1) es un término de acumulación, el segundo y el tercer término representan el transporte debido al flujo, los dos términos siguientes representan la dispersión, y el último término representa la desaparición del contaminante por reacción. Las hipótesis que dan lugar a este enfoque simplificado de modelo de ríos y estuarios son las siguientes:

1. Análisis unidimensional.
2. Condiciones de estado permanentes. Se considera que todos los parámetros del sistema y fuentes son constantes en el tiempo.
3. Parámetros espaciales constantes. Se considera que el flujo neto, los coeficientes de reacción, la geometría del sistema, y los coeficientes de dispersión, son constantes con la distancia a lo largo del cuerpo de agua.
4. Sólo se incluyen descargas de aguas residuales puntuales. El principio de superposición permite el análisis de fuentes múltiples de aguas residuales.

El modelo empleado parte de la ecuación (1), la cual es una ecuación diferencial de segundo orden no-homogénea (EDSOH). Dividiendo por Δz y calculando el límite del cociente incremental cuando $\Delta z \rightarrow 0$ se reduce la EDSOH (que permite describir una figura tridimensional) a una sección transversal de la figura. Luego se divide por el área y se reemplaza por $v = Q/A$ obteniendo:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial z} + D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - K \cdot A \cdot c \quad (2)$$

La ecuación (2) es convertida en una Ecuación Diferencial Ordinaria (EDO) a través de transformadores de Laplace. Estos transformadores permiten la suavización de la curva y que la longitud se mantenga constante en un intervalo $[z, s]$. Dicho transformador es utilizado para intervalos que pertenecen a $[0, \infty+]$ (lo cual es indicado en la fórmula con el símbolo 0^+). Se obtiene una ecuación que es función de una sola variable $C(t)$, con comportamiento similar a una $C(l)$:

$$D \frac{d^2 c}{dz^2} - v \frac{dc(z,s)}{dz} - (K+s) \cdot c(z,s) = -c(z,0^+) \quad (3)$$

El término $c(z,0^+)$ indica condición inicial.

La ecuación (3) es resuelta estableciendo:

$$DJ^2 - vJ - (K+s) = 0 \quad (4)$$

Denominando en la ecuación (4) a las derivadas como J se obtiene la ecuación característica. Dicha ecuación se resuelve a través del Wroskiano, obteniendo:

$$c(z,s) = A_1 \cdot e^{J_1 z} + A_2 \cdot e^{J_2 z} \quad \text{combinación lineal} \quad (5)$$

$$J_1 = \frac{v + \sqrt{v^2 + 4D(K+s)}}{2D} \quad (6)$$

$$J_2 = \frac{v - \sqrt{v^2 + 4D(K+s)}}{2D} \quad (7)$$

$$J_{1,2} = \frac{v \pm \sqrt{v^2 + 4D(K+s)}}{2D} \quad (8)$$

Se puede demostrar que:

$$J_1 > 0 \Rightarrow \frac{dc}{dz} > 0 \Rightarrow c(z,s) \text{ es creciente}$$

$$J_2 < 0 \Rightarrow \frac{dc}{dz} < 0 \Rightarrow c(z,s) \text{ es decreciente}$$

El contaminante es ingresado en $Z=0$, considerado a modo de pulso, lo cual indica que para $Z=0$ y $t=0$ la concentración presenta un valor infinito y tenderá a cero en cualquier otro punto. En nuestro sistema, el punto experimental $c(0,0)$ coincide con el punto medio del curso de agua (ya que es el punto en el cual el contaminante ingresa). De esta forma, la ecuación (5) queda:

$$c^+ = A_2 \cdot e^{J_2 z} \text{ para } 0^+ < z < \infty \quad (9)$$

$$c^- = A_1 \cdot e^{J_1 z} \text{ para } -\infty < z < 0^- \quad (10)$$

El fenómeno que ocurre en $c(0,0)$ es descripto por la función Delta (δ) (función candidata o función *Delta Dirac*), la cual se expresa como:

$$C(z, 0^+) = I\delta(z) \text{ por derecha}$$

$$C(z, 0^-) = I\delta(z) \text{ por izquierda}$$

Esta función indica que en $c(0,0)$ la concentración tiende a infinito, por lo cual se debe suavizar la curva y obtener un valor de c que permita obtener una curva continua en ese punto, es decir que $c(0^+, t) = c(0^-, t)$. Esto se logra mediante un operador de Laplace (en este caso el tiempo se va a mantener constante), obteniendo una ecuación en derivadas parciales que describe el balance de masa:

$$A\Delta z \frac{\partial c(0^+, t)}{\partial t} = Av c(0^-, t) - Av c(0^+, t) - AD \frac{\partial c(0^+, t)}{\partial z} + AD \frac{\partial c(0^-, t)}{\partial z} - KA\Delta z c(0^+, t) + AI I\delta(t) \quad (11)$$

indica la cantidad de contaminante agregado a intensidad (I) y área (A) determinada. Dividiendo por A, y como se trabaja en un intervalo cercano a $Z = 0$ (es decir $c(0^+, t) = c(0^-, t)$), se puede expresar la ecuación (11) como la EDO:

$$D \frac{dc(0^+, t)}{dz} - D \frac{dc(0^-, t)}{dz} = I \quad (12)$$

Dicha ecuación permite calcular el valor de I. Como $z \rightarrow 0$:

$$c^+ = A_2$$

$$c^- = A_1$$

Entonces:

$$A_1 = A_2 = \frac{I}{D(J_1 - J_2)} \quad (13)$$

$$c^+ = \frac{I}{D(J_1 - J_2)} \cdot e^{J_2 z} \quad (14)$$

$$c^- = \frac{I}{D(J_1 - J_2)} \cdot e^{J_1 z} \quad (15)$$

Las ecuaciones (14) y (15) son combinadas y luego sustituidas en (8), obteniéndose:

$$c^\pm = \frac{1}{\sqrt{v^2 + 4D(K+s)}} e^{vz/2D} e^{\pm \zeta/2D \sqrt{v^2 + 4D(K+s)}} \quad (16)$$

La ecuación (16) puede ser transformada desde el dominio s a un dominio s^* :

$$s^* = s + K + \frac{v^2}{4D}$$

La ecuación obtenida es fácilmente transformada al dominio tiempo a través de tablas de transformadores de Laplace. Luego se aplica la transformación inversa al dominio tiempo, obteniendo:

$$c^\pm(z, t) = I e^{-Kt} \cdot \frac{1}{\sigma z \sqrt{2\pi}} e^{-(z-vt)^2/2\sigma^2 z} \quad \text{en donde } \sigma z = \sqrt{2Dt} \quad (17)$$

El resultado es un pulso que tiene la forma de una función de densidad de probabilidad normal o gaussiana. El valor máximo se mueve en función del fluido, y la desviación estándar incrementa su valor en función de la raíz cuadrada del tiempo. La intensidad, que está representada por el área total del pulso, decrece exponencialmente con el tiempo.

2.4 Cálculo del caudal y velocidad media

Partimos de la Ecuación de continuidad:

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2 \quad (18)$$

La concentración C_2 cambiará con respecto al tiempo, entonces.

$$V_2 * C_2 = \int C_2 dV \quad (19)$$

Recordemos que $V = QT$, donde:

Q = Caudal (L/s), V =Volumen (L), T =Tiempo(s), C =Concentración (g/L)

$$V_1 * C_1 = \int C_2 * Q dT = Q \int C_2 dT \quad (20)$$

$$Q = \frac{V_1}{\int c_2 dT} \quad (21)$$

La integral de C_2 corresponde a la variación de la concentración de cloruros (Cl^{-1}) con respecto al tiempo. Mediante una aproximación numérica (regla de Simpson) se reescribe esta expresión como:

$$Q = \frac{V_1 * C_1}{\sum C \Delta t} \quad (22)$$

donde Δt =Intervalo de tiempo, V_1 =Volumen de la solución trazadora de cloruro de sodio en litros, C_1 =Concentración de cloruros en la solución trazadora, C =Concentración de cloruros en el tiempo t en el punto de muestreo.

Finalmente, mediante la ecuación (22) podemos calcular el caudal:

$$Q = \frac{V_1 * C_1}{\sum C \Delta t} = \frac{50 * 233760}{2376.92 * 30} = 163.910 \text{ l/seg}$$

donde la velocidad media viene dada por la siguiente expresión:

$$V_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{100}{60} = 1.6 \text{ m/seg}$$

3. Resultados

En la tabla 1 se observa la conductividad eléctrica, expresada en SDT (sólidos disueltos totales, mg/L), de las muestras tomadas con fecha 12/06/2015 con una frecuencia de 30 segundos.

Tabla 1. Conductividad eléctrica en su equivalencia a SDT (sólidos disueltos totales, en mg/L), de muestras tomadas cada 30 segundos.

Muestras	Tiempo (seg)	SDT (mg/L)	SDT-SDT (Inicial)
1	0	240.79	0.00
2	30	240.79	0.00
3	60	246.29	5.50
4	90	248.78	7.99
5	120	248.78	7.99
6	150	250.28	9.49
7	180	251.78	10.99
8	210	252.28	11.49
9	240	254.78	13.99
10	270	254.78	13.99
11	300	254.78	13.99
12	330	256.28	15.49
13	360	257.28	16.49
14	390	257.28	16.49
15	420	260.77	19.98
16	450	261.27	20.48
17	480	261.77	20.98
18	510	264.27	23.48
19	540	265.27	24.48
20	570	265.27	24.48
21	600	266.27	25.48
22	630	267.27	26.48
23	660	269.76	28.97
24	690	270.26	29.47
25	720	272.26	31.47
26	750	277.26	36.47

Muestras	Tiempo (seg)	SDT (mg/L)	SDT-SDT (Inicial)
27	780	277.76	36.97
28	810	279.76	38.97
29	840	282.25	41.46
30	870	284.25	43.46
31	900	285.75	44.96
32	930	289.25	48.46
33	960	289.75	48.96
34	990	289.75	48.96
35	1020	291.25	50.46
36	1050	295.24	54.45
37	1080	295.24	54.45
38	1110	296.24	55.45
39	1140	299.74	58.95
40	1170	300.74	59.95
41	1200	301.24	60.45
42	1230	301.74	60.95
43	1260	294.24	53.45
44	1290	293.74	52.95
45	1320	290.75	49.96
46	1350	289.75	48.96
47	1380	285.75	44.96
48	1410	285.75	44.96
49	1440	284.25	43.46
50	1470	281.75	40.96
51	1500	280.76	39.97
52	1530	278.26	37.47
53	1560	277.26	36.47
54	1590	275.76	34.97
55	1620	274.76	33.97
56	1650	274.26	33.47
57	1680	271.76	30.97
58	1710	272.26	31.47
59	1740	270.76	29.97
60	1770	269.76	28.97
61	1800	269.27	28.48
62	1830	268.27	27.48
63	1860	267.27	26.48
64	1890	265.77	24.98
65	1920	263.77	22.98
66	1950	263.27	22.48
67	1980	261.77	20.98
68	2010	261.27	20.48
69	2040	261.27	20.48
70	2070	260.77	19.98
71	2100	259.77	18.98
72	2130	258.27	17.48
73	2160	256.78	15.99
74	2190	255.78	14.99
75	2220	254.78	13.99
76	2250	253.28	12.49

Muestras	Tiempo (seg)	SDT (mg/L)	SDT-SDT (Inicial)
77	2280	252.78	11.99
78	2310	251.78	10.99
79	2340	250.78	9.99
80	2370	249.78	8.99
81	2400	248.28	7.49
82	2430	247.28	6.49
83	2460	246.78	5.99
84	2490	246.29	5.50
85	2520	240.79	0.00
86	2550	240.79	0.00
87	2580	240.79	0.00

La ecuación (17) puede ser utilizada como punto de partida para la determinación experimental de la dispersión D. Se pueden tomar muestras en un momento determinado y en lugares diferentes después de la introducción de un "trazador" para determinar el cambio de concentración, que sigue la forma de distribución normal. Sin embargo, es más fácil tomar muestras experimentalmente en un lugar fijo en diferentes momentos. Aquí el trazador es un material inerte, para el cual $k = 0$. Entonces, para una estación de medición en $z = L$, la ecuación (17) puede escribirse como:

$$C(l,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-(l-vt)^2/4Dt} \quad (23)$$

A partir de los datos recavados, teniendo la expresión analítica de la dispersión de contaminantes y los valores de caudal y velocidad media calculados (ecuación 22), se obtiene la siguiente gráfica de conductividad eléctrica medida en función del tiempo y su correspondiente ajuste polinómico:

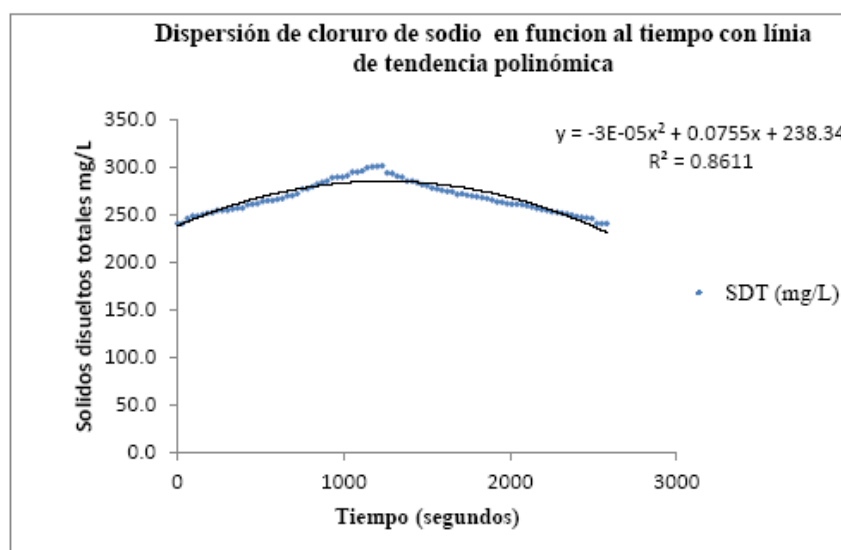


Figura 3. Conductividad eléctrica de las muestras tomadas cada 30 segundos en unidades de sólidos disueltos totales (mg/L) en función del tiempo, y ajuste polinómico.

La tabla 2 muestra los valores medidos y su respectiva probabilidad asociada de acuerdo con la ecuación 23. La figura 4 representa los valores de la tabla 2 y su correspondiente ajuste gaussiano.

Tabla 2. Conductividad eléctrica de las muestras, medida en SDT (sólidos disueltos totales, mg/L), con su respectiva probabilidad asociada de acuerdo con la expresión analítica del modelo de dispersión.

Valores obtenidos experimentalmente	Probabilidad Asociada
240,79	0,005822149
246,29	0,009544438
246,78	0,009922579
247,28	0,010314866
248,28	0,011117098
248,78	0,011526044
249,78	0,012356848
250,28	0,012777512
251,78	0,014052762
252,28	0,014479938
252,78	0,014906932
253,28	0,015332976
254,78	0,016597421
255,78	0,01742073
256,28	0,017823956
256,78	0,018220424
257,28	0,018609274
258,27	0,019353379
259,77	0,020402897
260,77	0,021040926
261,27	0,021339108
261,77	0,021622417
263,27	0,022376276
263,77	0,022593431
264,27	0,022792563
265,27	0,023134756
265,77	0,023276929
266,27	0,02339931
267,27	0,023583463
268,27	0,023685277
269,27	0,023703679
269,76	0,023682153
270,26	0,023639539
270,76	0,023576178
271,76	0,023387941
272,26	0,02326356
274,26	0,022572461
274,76	0,022353528
275,76	0,02186403
277,26	0,021010235

Valores obtenidos experimentalmente	Probabilidad Asociada
277,76	0,020696536
278,26	0,02036953
279,76	0,019316598
280,76	0,018562937
281,75	0,017783815
282,25	0,017379958
284,25	0,015714836
285,75	0,014437099
289,25	0,011484826
289,75	0,011076362
290,75	0,010275251
291,25	0,009883595
293,74	0,008038151
294,24	0,007691056
295,24	0,007022557
296,24	0,006389561
299,74	0,00446487
300,74	0,003998373
301,24	0,003778726
301,74	0,003567995

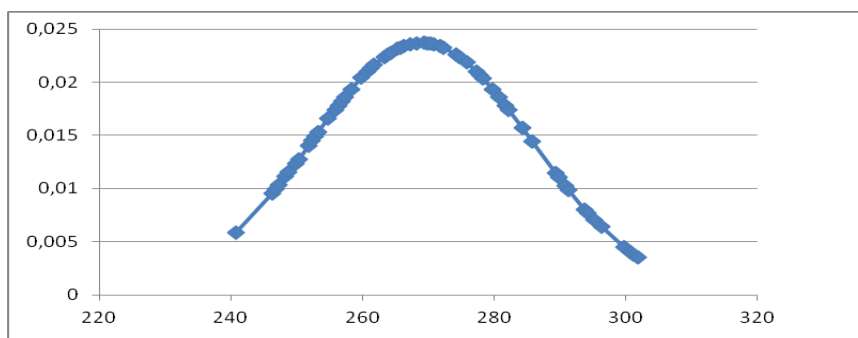


Figura 4. Ajuste gaussiano a la distribución de valores medidos de conductividad eléctrica en unidades de SDT (sólidos disueltos totales, mg/L) según lo calculado en la tabla 2.

Sería importante contar con un mayor número de datos experimentales para obtener mayor precisión en el ajuste, en los coeficientes de asimetría y kurtosis.

4. Conclusiones

En este estudio de dispersión de contaminantes en un tramo del río Chumbao, Perú, se ha evidenciado la utilidad del cloruro de sodio como trazador químico de bajo costo y alta eficiencia, ya que permite detectar en forma casi instantánea la dispersión de los contaminantes en el tramo seleccionado del río,

cuyo caudal es relativamente bajo. Sin embargo, pueden requerirse elevadas cantidades de cloruro de sodio en tramos con mayor caudal, y de hecho sería prácticamente inviable en grandes ríos.

Es importante que la frecuencia de muestreo sea la adecuada para obtener un perfil de concentración acorde con el modelo matemático. Por ejemplo, tomar un Δt muy pequeño impide visualizar el comportamiento gaussiano.

A velocidades bajas se observan grandes picos de concentración debido a la preponderancia de la difusión. Pero a mayores velocidades, la concentración no tiene un pico brusco y se mantiene constante en el tiempo, preponderando el transporte de materia por el flujo.

Finalmente y siguiendo las recomendaciones de Roffel y Rijnsdorp (1982), resulta necesario contar con mayor cantidad de mediciones para ajustar mejor el modelo de dispersión, por lo que en una segunda etapa de este proyecto se planea repetir esta experiencia controlada nuevamente y obtener así un nuevo conjunto de datos.

Referencias y bibliografía consultada

1. Domínguez, J. C., Borroto, J. P., Hernández, A. G., & Pérez, E. M. (2003). Empleo de trazadores en la obtención de modelos de calidad de agua en el Río Almendares. *Nucleus*, (34), 19-26.
2. Espinoza, R. L., Vinicio, A. M., & Zavaleta, R. L. (s.f. de 10 de 2013). Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta Río Suquiapa-Santa- Ana. Recuperado el 10 de 09 de 2015, de Repositorio Institucional de la Universidad de El Salvador.
3. Marón, D. D., & Rodríguez, O. H. (2007). Un modelo numérico del transporte de contaminantes en canales aplicando el método de los elementos finitos. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 28(3), 46-56.
4. Orsolini, H., Zimmerman, D., & Basile, P. (2000). *Hidrología procesos y métodos*. Argentina: UNR Editora.
5. Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. México: McGRAW-HILL S.A.
6. Roffel, B., & Rijnsdorp, J. E. (1982). *Process Dynamics Control and Protection*. Michigan EEUU: Ann Arbor Science.
7. Schnnor, J. L. (1997). *Environmental Modeling*. New York: Ed. John Wiley & Sons INC.
8. Valcárcel, L. R., Borroto, J. P., Alberro, N. M., Griffith, J. M., Derivet, M. Z., & Flores, P. J. (2010). Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. *Nucleus* (47), 16-23.