



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS

**ESTUDIO DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SAMALÁ
DEL TRAMO CANTEL – ZUNIL – EL PALMAR,
QUETZALTENANGO**

ING. FRANCISCO KHALIL DE LEÓN BARRIOS

ASESORADO POR MSC. ING. PEDRO CIPRIANO SARAVIA CELIS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SAMALÁ
DEL TRAMO CANTEL – ZUNIL – EL PALMAR,
QUETZALTENANGO**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL
DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS

ING. FRANCISCO KHALIL DE LEÓN BARRIOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO (*MAGÍSTER SCIENTIFICAE*) EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olimpo Paíz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE
INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS**

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL EXAMINADOR

EXAMINADOR	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de estudio especial titulado:

ESTUDIO DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SAMALÁ DEL TRAMO CANTEL – ZUNIL – EL PALMAR, QUETZALTENANGO.

Tema que fue aprobado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos con fecha 23 de agosto de 2004.

ING. FRANCISCO KHALIL DE LEÓN BARRIOS

DEDICATORIA

A Dios: por su amor, misericordia, fidelidad y provisión para concluir una nueva etapa de mi vida.

A mi hermano José Pablo de León Barrios: *in memoriam*, por su cariño y apoyo. Nunca olvidaré su agradable compañía en el penúltimo muestreo.

A mis padres Dr. José Adolfo de León Ochoa y Profa. Alma Violeta Barrios de De León: por su amor, consejos y aliento.

A mi hermana Anna Violeta de León Barrios: por su amor y apoyo.

A mis familiares: especialmente a la familia Musa Maldonado.

AGRADECIMIENTOS

A Dios: con el corazón te agradezco porque me brindaste inteligencia y fortaleza para alcanzar la maestría.

A mis padres y hermanos: en reconocimiento a su colaboración y por ser el mejor “equipo de muestreo”.

Al MSc. Ing. Pedro Saravia: por su contribución al asesorar el presente estudio especial, así como su apoyo como director de ERIS.

A la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS: en especial a los MSc. Ing. Marta Lidia Samayoa de Hernández, Guillermo García, Zenón Much, Elfego Orozco y Julián Duarte; Dra. Malvina de León, Licda. Alejandrina Flores de Cabrera, Frida Faggioly de Cáceres y Jeaneth Alegría de Mejía.

Al Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina": por haberme brindado todas las facilidades para desarrollar el presente trabajo, principalmente a los laboratoristas Moisés Dubón y Adolfo Dubón.

A la Profa. Any Herrera: por su cariño sincero.

A la Inga. Maritza García: por su ayuda y ánimo.

Al Lic. Noé Ventura: por sus consejos y solidaridad.

EPÍGRAFE

Salmo 104 (NVI): “¹¡Alaba, alma mía, al Señor! Señor mi Dios, tú eres grandioso; te has revestido de gloria y majestad.

²Te cubres de luz como con un manto; extiendes los cielos como un velo.

³Afirmas sobre las **aguas** tus altos aposentos y haces de las nubes tus carros de guerra. ¡Tú cabalgas en las alas del viento!

⁴Haces de los vientos tus mensajeros, y de las llamas de fuego tus servidores.

⁵Tú pusiste la tierra sobre sus cimientos, y de allí jamás se moverá; ⁶la revestiste con el **mar**, y las **aguas** se detuvieron sobre los montes.

⁷Pero a tu reprensión huyeron las **aguas**, ante el estruendo de tu voz se dieron a la fuga.

⁸Ascendieron a los montes descendieron a los valles, al lugar que tu les asignaste.

⁹Pusiste una frontera que ellas no pueden cruzar; ¡jamás volverán a cubrir la tierra!

¹⁰Tú haces que los **manantiales** viertan sus **aguas** en las cañadas, y que fluyan entre las montañas.

¹¹De ellas beben todas las bestias del campo; allí los asnos monteses calman su sed.

¹²Las aves del cielo anidan junto a las **aguas** y cantan entre el follaje.

¹³Desde tus altos aposentos riegas las montañas; la tierra se sacia con el fruto de tu trabajo...

²⁴¡Oh Señor, cuán numerosas son tus obras! ¡Todas ellas las hiciste con sabiduría! ¡Rebosa la tierra con todas tus criaturas!

²⁵Allí esta el **mar**, ancho e infinito, que abunda en animales grandes y pequeños, cuyo número es imposible conocer.

²⁶Allí navegan los barcos y se mece Leviatán, que tú creaste para jugar con él.”

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	XVII
OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y LIMITACIONES	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO TÉORICO	1
1.1 Descripción de la cuenca del río Samalá	1
1.2 Descripción del río Samalá	3
1.3 Calidad del agua	4
1.4 Parámetros de calidad del agua	4
1.4.1 Parámetros físicos	5
1.4.2 Parámetros químicos	6
1.5 Índices de calidad de agua	7
1.6 Índice simplificado de calidad del agua	8
1.7 Modelo matemático de oxígeno en los ríos	11
1.8 Constante de autodepuración “f” de Fair	14
2. METODOLOGÍA	15
2.1 Recursos	15
2.1.1 Ubicación	15
2.1.1.1 Muestreo	15
2.1.1.2 Análisis de muestras	16
2.1.2 Materiales	16

2.1.3	Equipo	17
2.2	Métodos	17
2.2.1	Toma de muestras	17
2.2.2	Análisis estadístico para determinar el número de muestras	18
2.2.3	Determinación de parámetros	19
2.2.4	Cálculo de coeficientes cinéticos	20
3.	RESULTADOS	23
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
4.1	Temperatura	45
4.2	Sólidos totales	46
4.3	Sólidos fijos	47
4.4	Sólidos volátiles	48
4.5	Sólidos suspendidos totales	49
4.6	Conductividad eléctrica	50
4.7	Demanda bioquímica de oxígeno	51
4.8	Demanda química de oxígeno	51
4.9	Potencial de hidrógeno	52
4.10	Oxígeno disuelto	53
4.11	Oxígeno consumido	54
4.12	Caudales	54
4.13	Relación de variables	55
4.14	Índices simplificados de calidad del agua	58
4.15	Coeficientes cinéticos	61
4.16	Constante de autodepuración "f" de Fair	64
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Coeficiente de temperatura	9
2	Coeficiente de oxígeno consumido	9
3	Coeficiente de sólidos totales en suspensión	9
4	Coeficiente de oxígeno disuelto	9
5	Coeficiente de conductividad eléctrica	10
6	Modelo de flujo en pistón	11
7	Curva de déficit de oxígeno	13
8	Número de muestras para diferentes niveles de confianza	19
9	Temperaturas del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	31
10	Sólidos totales del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	32
11	Sólidos fijos del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	33
12	Sólidos volátiles del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	34
13	Sólidos suspendidos totales del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	35
14	Conductividad eléctrica del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	36
15	Demanda bioquímica de oxígeno del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	37
16	Demanda química de oxígeno del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	38
17	Potencial de hidrógeno del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	39

18	Oxígeno disuelto del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	40
19	Oxígeno consumido del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	41
20	Caudales del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	42
21	Índices simplificados de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	43
22	Demanda bioquímica de oxígeno en la estación hidrológica El Túnel contra demanda bioquímica de oxígeno en la estación hidrológica Cantel	56
23	Oxígeno disuelto en la estación hidrológica El Túnel contra oxígeno disuelto en la estación hidrológica Cantel	57
24	Oxígeno disuelto en la finca El Recreo contra oxígeno disuelto en la estación hidrológica El Túnel	57
25	Mapa de localización de puntos de muestreo	75
26	Mapa de ubicación de puntos de muestreo	76

TABLAS

I	Rangos y categorías del índice simplificado de calidad del agua	10
II	Constante de autodepuración “f” de Fair	14
III	Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	24
IV	Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	25
V	Índices simplificados de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	26
VI	Coefficientes cinéticos del río Samalá	26

VII	Puntos de muestreo en el río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	27
VIII	Características del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar	27
IX	Datos para calcular los coeficientes cinéticos del río Samalá, tramo Cantel – Zunil	28
X	Datos para calcular los coeficientes cinéticos del río Samalá, tramo Zunil – El Palmar	29
XI	Datos para calcular los coeficientes cinéticos, con fórmulas de distintos autores, del río Samalá	30

LISTA DE SÍMBOLOS

CC	Carga contaminante
R	Coefficiente de correlación
K_1	Coefficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica
K_2	Coefficiente de reaireación
$OD_{(T,P)}$	Concentración de saturación de oxígeno
$OD_{(T,P_0)}$	Concentración de saturación de oxígeno al nivel del mar
L_o	Concentración inicial de demanda bioquímica de oxígeno en el río, aguas abajo del punto de descarga del efluente
DO_o	Concentración inicial de oxígeno disuelto en el río, aguas abajo del punto de descarga del efluente
DO_{crit}	Concentración crítica de oxígeno disuelto en el agua
CE	Conductividad eléctrica
F	Constante de autodepuración “f” de Fair
D	Déficit de oxígeno del río
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
ISCA	Índice simplificado de calidad del agua
kg/s	Kilogramos por segundo
m/s	Metros por segundo
m^3/s	Metros cúbicos por segundo
$\mu\text{ohm/cm}$	Microhmios por centímetro
mg/l	Miligramos por litro
mm	Milímetros
mm Hg	Milímetros de mercurio

OC	Oxígeno consumido
OD	Oxígeno disuelto
pH	Potencial de hidrógeno
P	Presión
P _o	Presión al nivel del mar (760 mm Hg)
SF	Sólidos fijos
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
T	Temperatura
t	Tiempo
t _{crit}	Tiempo crítico de viaje (momento cuando la partícula de agua llega al punto de menor concentración de oxígeno disuelto en la corriente)

GLOSARIO

Aerobia	Lo orgánico que vive únicamente en presencia de oxígeno.
Afluente	Arroyo o río secundario que desemboca o desagua en otro principal.
Anaerobia	Lo orgánico que vive únicamente en ausencia de oxígeno.
Antrópico	De origen humano, humanizado, opuesto a natural.
Autodepuración	Proceso por medio del cual un cuerpo de agua (río, lago, agua costera) puede llegar a recuperarse de los efectos o impacto de la contaminación natural o antrópica. Se le conoce también como autopurificación y autooxidación.
Bifurcación	Lugar donde un camino, río, etc., se divide en dos ramales o brazos.
Biótico	Relativo a la vida y a los organismos. Los factores bióticos constituyen influencias del ambiente que emanan de las actividades de los seres.
Capa béntica	Capa conformada por un conjunto de animales y plantas que viven, fijos o no, en el fondo o paredes laterales del mar y los lagos.

Efluente	Líquido de desecho de un proceso que fluye y es descargado en los cuerpos de agua o en los alcantarillados.
Fango	Lodo glutinoso que se forma generalmente con los sedimentos térreos en los sitios donde hay agua detenida.
Freático	Relativo a aguas acumuladas en el subsuelo, sobre una capa impermeable y que pueden ser aprovechadas por medio de pozos. Concerniente a la capa del subsuelo impregnada de agua, o manto acuífero.
Ignición	Acción y efecto de iniciarse una combustión.
Morfología	Estudio de la forma, la estructura y origen de los relieves geológicos sin considerar su función.
Prístino	Antiguo, primero, primitivo, original.
Replicabilidad	Dicho de un proceso: que puede realizarse de forma similar más de una vez.
Sedimentos	Depósito o capa de materia que se acumula en un sitio, o se ha acumulado en los tiempos geológicos.
Semidendrítica	Con forma de dendrita; que es aquella concreción mineral que, en forma de ramas de árbol, suele presentarse en las fisuras y juntas de las rocas.

Sinusoidal Onda plana cuya magnitud perturbada sigue la ley del seno de una variable.

RESUMEN

El presente estudio especial evalúa la calidad del agua del río Samalá, en el tramo de recorrido comprendido entre los municipios de Cantel, Zunil y El Palmar, del departamento de Quetzaltenango.

Para ello se realizó un plan de muestreo para determinar los parámetros siguientes: temperatura; sólidos totales, fijos, volátiles y suspendidos totales; conductividad eléctrica; demandas bioquímica y química de oxígeno; potencial de hidrógeno; oxígeno disuelto; así como, oxígeno consumido. Además, se calcularon los caudales, los índices simplificados de calidad del agua y los coeficientes cinéticos de descomposición bioquímica de materia orgánica y de reaireación, para estudiar el comportamiento del río en cuanto a su calidad, en el tramo bajo estudio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El río Samalá, en el tramo de recorrido comprendido entre los municipios de Cantel, Zunil y El Palmar del departamento de Quetzaltenango, recibe las aguas residuales de las poblaciones de Cantel, Almolonga y Zunil; sus aguas son utilizadas para los siguientes usos: domésticos, riego de cultivos, crianza de animales, hidroelectricidad, industrial, etc. El estudio de calidad del agua del río Samalá en el tramo citado permitirá conocer su comportamiento, esto lleva a plantearse la siguiente pregunta de investigación: ¿Se podrán obtener coeficientes cinéticos e índices de calidad del agua del río Samalá entre la estación hidrológica Cantel y la finca El Recreo?

JUSTIFICACIÓN

El agua es considerada como un recurso estratégico para la humanidad, y por ende para los países. Por lo cual, actualmente uno de los mayores retos es proveer de agua en la calidad y la cantidad necesaria para los distintos usos requeridos.

En el marco del Sistema de Naciones Unidas se está trabajando en implementar los objetivos de desarrollo del milenio; específicamente, el objetivo 7 indica: “Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.”, y la meta 10 para desarrollar tal objetivo es: “Reducir a la mitad para el año 2015 el porcentaje de personas que carezcan de acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento.” Al respecto, Guatemala como parte de dicho Sistema debe cumplir tanto el objetivo como la meta planteados; por ello, hay que tomar las acciones necesarias para conocer la calidad y la cantidad de la riqueza hídrica que posee.

Además, en la Declaración de Dublín sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible (emitida en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente, celebrada en Dublín, Irlanda, en 1992) se recomendaron principios rectores, entre los cuales es importante destacar el principio 1, que se presenta a continuación:

“El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente. Dado que el agua es indispensable para la vida, la gestión eficaz de los recursos hídricos requiere un enfoque integrado que concilie el desarrollo económico y social y la protección de los ecosistemas naturales. La gestión eficaz establece una relación entre el uso del suelo y el aprovechamiento del agua en la totalidad de una cuenca hidrológica o un acuífero.”

La cuenca del río Samalá abarca parcialmente los departamentos de Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Retalhuleu y Suchitepéquez, con un área superficial de 1 510 kilómetros cuadrados, siendo la longitud del cauce principal de 145 kilómetros.

Tal cuenca está habitada por una población de más de 750 000 personas. Presenta características contrastantes en sus componentes físicos, bióticos y socioeconómicos, delimitándose las regiones siguientes:

- a. parte alta, tierras altas volcánicas o altiplano occidental;
- b. parte media, pendiente volcánica reciente o boca costa; y,
- c. parte baja o llanura costera del Pacífico.

Es importante enfatizar la influencia que el río Samalá tiene en la economía guatemalteca, por lo siguiente:

- Mueve las hidroeléctricas Santa María de Jesús y El Canadá, que proporcionan la mayor cantidad de energía del occidente del país.
- Sus aguas se utilizan para irrigación de verduras y hortalizas en la parte alta y media de la cuenca, de plantaciones de café en la parte media, así como de caña de azúcar en la parte baja.
- La amenaza latente, en la parte baja de la cuenca, por el arrastre de sedimentos de origen volcánico a través de sus aguas, lo cual puede provocar innumerables daños, entre los que se encuentran: pérdida de vidas humanas; inundaciones en los centros poblados (principalmente San Felipe, San Sebastián y Retalhuleu; pérdidas en diversos sectores (educación, agrícola, ganadero, entre otros); impactos directos sobre la infraestructura básica (carretera Panamericana y puente Carlos Castillo Armas), etc.

En tal contexto, el presente estudio especial evalúa la calidad del agua del río Samalá determinando distintos parámetros y analizando tanto su comportamiento como sus interacciones, en el tramo de recorrido comprendido entre los municipios de Cantel, Zunil y El Palmar, del departamento de Quetzaltenango.

El tramo citado se escogió por las razones siguientes:

- a. por ser representativo de toda la cuenca del río Samalá, porque atraviesa la parte alta de dicha cuenca en Cantel, la parte media en Zunil y la parte baja en El Palmar; y,
- b. en sus márgenes se localizan las estaciones hidrológicas Cantel y El Túnel. En dicho tramo los usos que se dan a las aguas del río Samalá son, entre otros: domésticos, riego de diversos cultivos, crianza de animales, generación de energía en hidroeléctricas, industriales, etc. Asimismo, indicar que se reciben las descargas de aguas residuales de municipios como Cantel, Almolonga y Zunil, del departamento de Quetzaltenango.

Finalmente, es necesario resaltar que entre los beneficios que el estudio especial aporta se tienen:

- a. aproximación a la condición general de las aguas del río Samalá;
- b. línea de base para posteriores estudios al respecto;
- c. replicabilidad para otros ríos de Guatemala; y,
- d. obtención de los coeficientes cinéticos de descomposición bioquímica de materia orgánica y de reaireación del río Samalá, en el tramo estudiado.

OBJETIVOS

- **General**

Evaluar la calidad del agua del río Samalá, en el tramo de recorrido comprendido entre los municipios de Cantel, Zunil y El Palmar, del departamento de Quetzaltenango, desde octubre de 2004 hasta mayo de 2005.

- **Específicos**

1. Determinar parámetros de calidad del agua a muestras del río Samalá, del tramo Cantel – Zunil – El Palmar.
2. Relacionar los parámetros de calidad del agua y encontrar los coeficientes cinéticos de descomposición bioquímica de materia orgánica y de reaireación, que permitan conocer su comportamiento.

HIPÓTESIS

Es factible obtener coeficientes cinéticos y clasificar el río Samalá con base en un estudio de calidad del agua, el cual evaluará la condición del río mencionado por medio de la determinación de los parámetros siguientes: temperatura, sólidos totales, fijos, volátiles y suspendidos totales, conductividad eléctrica, demandas bioquímica y química de oxígeno, potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto y oxígeno consumido; así como la aplicación de los índices de calidad.

LIMITACIONES

1. El plan de muestreo se desarrollará durante 8 meses, en el período comprendido entre octubre de 2004 y mayo de 2005.
2. Debido a la prohibición de tomar muestras en la estación hidrológica Candelaria, por parte de los habitantes de una comunidad cercana, el lugar de muestreo del río Samalá correspondiente a El Palmar, Quetzaltenango será la finca El Recreo. En tanto que en Cantel y Zunil, Quetzaltenango será en las estaciones hidrológicas Cantel y El Túnel.

INTRODUCCIÓN

La situación del agua, como recurso indispensable para la vida, ha obligado a la humanidad a reflexionar respecto a la necesidad de proveerla en calidad y cantidad adecuadas.

En este sentido, el presente estudio especial evalúa, mediante parámetros, la calidad del agua del río Samalá y determina los coeficientes cinéticos, que permiten conocer su comportamiento, en el tramo Cantel - Zunil - El Palmar, del departamento de Quetzaltenango.

Al respecto, se comprueba la hipótesis planteada al obtener los coeficientes cinéticos del río Samalá y clasificarlo en cuanto a su calidad; además, se determina que el comportamiento de las concentraciones y las cargas contaminantes es variable hasta el muestreo 8, a partir del cual es más constante; asimismo, se establece que las concentraciones disminuyen a lo largo del tramo de estudio, pero las cargas contaminantes aumentan por los aportes externos que recibe, por lo tanto, se verifica en el río Samalá existe dilución no autodepuración.

También se define que la categoría del río Samalá es intermedia, de acuerdo con los índices simplificados de calidad del agua; y, se determinan los coeficientes cinéticos: a) para el tramo Cantel – Zunil, $K_1 = 0,603 \text{ día}^{-1}$ y $K_2 = 22,753 \text{ día}^{-1}$ y b) para el tramo Zunil – El Palmar, $K_1 = 1,693 \text{ día}^{-1}$ y $K_2 = 19,884 \text{ día}^{-1}$. Dichos coeficientes son validos para todo el año; sin embargo, sólo los resultados del tramo Cantel – Zunil son recomendables para su aplicación.

Finalmente, se indica que el contenido del estudio especial está organizado en cuatro capítulos que abordan el marco teórico, la metodología realizada, los resultados y la discusión de los mismos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Descripción de la cuenca del río Samalá

La cuenca del río Samalá abarca parcialmente los departamentos de Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Retalhuleu y Suchitepéquez, con un área superficial de 1 510 kilómetros cuadrados, con una longitud máxima de 100 kilómetros y un ancho máximo de 35 kilómetros. Tal cuenca está habitada por más de 750 000 personas.

En cuanto a su topografía es muy quebrada; entre los accidentes geográficos más sobresalientes se encuentran la cadena de montañas Sierra Madre, y la planicie costera; además se encuentran de manera parcial los volcanes Santa María, Zunil, Santiaguito y Cerro Quemado.

Entre sus características de conformación se tiene en la parte alta el escarpe Olintepeque, cuya erosión es bastante fuerte debido a que las capas superiores están cubiertas de cenizas volcánicas que son erosionadas por la esorrentía provocada por la precipitación intensa, dichas cenizas son depositadas tanto en el cauce del río Samalá como en su afluente el río Tumulá, tornándolo horizontal. Estos forman los valles de los llanos de Urbina, los llanos del Pinal, los llanos de Olintepeque y el valle del municipio de Cajolá; que constituyen una planicie en la cabecera de la cuenca por la depositación sedimentaria.

Arriba de Cantel, puede apreciarse la estructura de la falla del Samalá que forma el cañón entre los volcanes de Zunil y Santa María, con afloramiento de aguas termales y salidas de vapor de agua por medio de grietas o de diminutas cavernas (fumarolas), que evidencian la cercanía de las cámaras magmáticas de los volcanes. Esta parte presenta grandes cambios de pendiente del cauce; existiendo en ella cataratas de grandes diferencias de nivel, las cuales son aprovechadas para la generación de energía eléctrica, hasta llegar a la altura de San Felipe Retalhuleu, donde terminan las pendientes fuertes.

En las cercanías del océano Pacífico, el arrastre de sedimentos eleva el lecho del río Samalá, lo cual permite que la pendiente sea más llana en la parte baja de la cuenca y amenazando con desviar su cauce hacia otros drenes, que podrían afectar a poblaciones vulnerables provocando lo siguiente: muertes de personas y animales domésticos, inundaciones a las viviendas con agua y arena, daños a la agricultura, problemas en la infraestructura vial, entre otros.

En cuanto al uso de la tierra en la cuenca es primordialmente agrícola. La parte alta de la cuenca presenta los mayores problemas de abuso de la tierra, pues grandes áreas de bosque han sido eliminadas para dedicarlas a cultivos limpios, principalmente maíz y frijol, lo cual ha dejado los suelos expuestos a la erosión. Finalmente, es necesario aclarar que en la parte alta de la cuenca la densidad poblacional y el analfabetismo son mayores, si se compara con la parte baja.

1.2 Descripción del río Samalá

El río Samalá atraviesa los municipios de Salcajá, Quetzaltenango, San Carlos Sija, Sibilia, San Juan Ostuncalco, Cantel, Zunil y El Palmar, del departamento de Quetzaltenango; Nuevo Palmar, Retalhuleu, San Sebastián, Santa Cruz Muluá, San Martín Zapotitlán, San Felipe y San Andrés Villa Seca, del departamento de Retalhuleu; y, Totonicapán, San Francisco El Alto y San Cristóbal Totonicapán, en el departamento de Totonicapán. La extensión de su cauce principal es de 145 kilómetros.

En el municipio de San Carlos Sija, unos 2 kilómetros al oeste de la cabecera municipal, a la altura de la aldea El Rodeo, el río Chacap confluye con el río San José para formar el río Caquixá o Samalá. Con dirección oeste a este bordea la carretera departamental Quetzaltenango 17. Pasa al oeste de la cabecera municipal de San Carlos Sija, sigue a lo largo de la ruta nacional 9-N, para fluir en dirección sureste. Entre las aldeas El Progreso y Nueva Candelaria cambia al este.

En el municipio de San Francisco El Alto, al norte de la aldea Pachaj recibe el río Xolcatá. Continúa a lo largo de la carretera Interamericana CA-1, penetra al municipio de San Cristóbal Totonicapán donde aproximadamente un kilómetro al sur debajo del puente al lado este de la cabecera municipal, al este de la iglesia parroquial se une con el río Samalá que procede del municipio de Totonicapán. A partir de esa confluencia como río Samalá corre con rumbo sur. Desemboca en el océano Pacífico al lado oeste del paraje El Coco, en la barra San Luis, latitud 14°11'33", longitud 91°47'33", con longitud aproximada de 113 kilómetros desde el puente en la cabecera municipal de San Cristóbal Totonicapán.

El río Samalá que procede del municipio de Totonicapán se origina en jurisdicción de la aldea Panquix, con su curso de noreste a suroeste. Al norte del caserío Xepatuj cambia al noreste y en el caserío Nimasac al norte. Al lado sur de la cabecera recibe varios afluentes, como el río Chimoral y otros. Toma rumbo oeste, atraviesa la finca Molino La Providencia, recibe al río Xantún, cruza la ruta nacional 1 a San Cristóbal Totonicapán y corre al norte de la misma.

Le afluyen los ríos Juchanep y Paquí (que ha cambiado poco antes su nombre a río Nimapá a la altura del caserío del mismo nombre) y a partir de esta afluencia se le conoce localmente también como Pasutulté hasta que aproximadamente un kilómetro al sur del puente en la cabecera de San Cristóbal Totonicapán descarga en el río Caquixá o Samalá, para luego en dirección sur tomar ya el nombre genérico de Samalá, latitud 14°54'45", longitud 91°26'35", cuya longitud aproximada es 23 kilómetros.

1.3 Calidad del agua

Conjunto de características del agua en su estado natural o después de ser alterada por su uso. Se refiere a una condición o estado del agua como sustancia y, usualmente, se describe mediante parámetros o indicadores.

1.4 Parámetros de calidad del agua

Los parámetros son características o propiedades que el medio natural o antrópico puede comunicar al agua, definiendo de esta forma alteraciones o condiciones de uso. Los parámetros pueden agruparse en: físicos, químicos y biológicos.

1.4.1 Parámetros físicos

- **Temperatura:** parámetro que mide el calor en el agua; es muy importante porque afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos.
- **Sólidos totales:** son aquellos residuos de materia sólida, orgánica e inorgánica, contenida en el agua que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su posterior secado en estufa a temperatura definida (103-105 °C).
- **Sólidos fijos y volátiles:** los sólidos fijos son aquellos residuos de los sólidos totales, suspendidos o disueltos después de someterse a ignición durante un tiempo determinado y a una temperatura especificada (550 °C). La pérdida de peso por ignición se debe a los sólidos volátiles.
- **Sólidos suspendidos totales:** fracción de sólidos totales retenida sobre un filtro con un tamaño de poro específico medido después de que ha sido secado a una temperatura específica (103-105 °C).
- **Conductividad eléctrica:** la conductividad eléctrica del agua es la medida de la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Como la corriente eléctrica es transportada por iones en solución, el aumento en la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad. Por tanto, el valor de la medida de la conductividad eléctrica es usado como un parámetro sustituto de la concentración de sólidos disueltos totales.

1.4.2 Parámetros químicos

- **Demanda bioquímica de oxígeno:** se utiliza como una medida del oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica de las aguas. La demanda bioquímica de oxígeno, DBO, se considera una prueba empírica con procedimientos estandarizados de laboratorio para aguas residuales, efluentes y contaminadas; determinando el oxígeno utilizado durante un período de incubación especificado, para: a) la degradación bioquímica de la materia orgánica; b) oxidar la materia orgánica, como los sulfuros o el ion ferroso; y c) oxidar las formas reducidas de nitrógeno, a menos que se impida la reacción por medio de un inhibidor.
- **Demanda química de oxígeno:** se utiliza como una medida del equivalente de oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte.
- **Potencial de hidrógeno:** la expresión usual para medir la concentración del ion hidrógeno en una solución está en términos del potencial de hidrógeno, pH, el cual se mide como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno.
- **Oxígeno disuelto:** los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. Además, es función de la temperatura, la presión y la concentración salina; al respecto, existen en la literatura tablas que presentan valores de oxígeno disuelto a diferentes temperaturas y distintas concentraciones de cloruros.

- **Oxígeno consumido:** es una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar materiales inestables, en una muestra de agua, por medio de permanganato de potasio en una solución ácida.

La determinación del oxígeno consumido ha sido ampliamente reemplazada por la demanda bioquímica de oxígeno, porque no brinda resultados comparables con los obtenidos por procesos de oxidación biológica que ocurren de forma natural; sin embargo, tiene la ventaja que los resultados pueden obtenerse en alrededor de una hora mientras que la DBO requiere cinco días por lo menos. Por otro lado, debido a que el permanganato de potasio es selectivo al reaccionar y ataca a los compuestos carbonados y nitrogenados, los resultados serán diferentes a los obtenidos por la metodología de la DBO.

1.5 Índices de calidad de agua

Debido a la cantidad de parámetros que participan en el diagnóstico de la calidad del agua y a lo complejo que éste puede llegar a ser, se han diseñado índices como herramientas para sintetizar la información proporcionada por esos parámetros. Los índices permiten comparar, mediante categorías definidas, la calidad del agua en diferentes lugares y momentos, y facilitan la valoración de los vertidos contaminantes y de los procesos de autodepuración.

Categorización de la calidad del agua: en ésta se establecen los rangos de valores a las categorías de calidad del agua y representa un proceso crítico pero subjetivo, en cierto modo. Dicha categorización debe estar basada: a) en la mejor información disponible, b) en las opiniones de los expertos y c) en las expectativas del público en general.

1.6 Índice simplificado de calidad del agua

Es un índice fisicoquímico utilizado para establecer tramos clasificados de un río, atendiendo a su calidad. Los parámetros contemplados para calcular el dicho índice son: oxígeno disuelto, oxígeno consumido, temperatura, sólidos totales en suspensión y conductividad eléctrica.

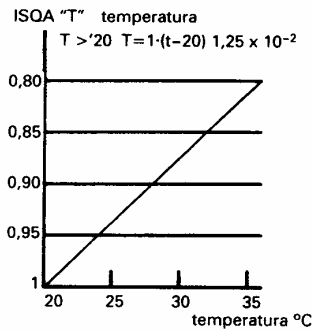
La metodología para determinar el índice simplificado de calidad del agua, ISCA, que se presenta es desarrollada ampliamente por Aurelio Hernández Muñoz¹; al respecto, el ISCA se caracteriza por ser fácil de usar y por proporcionar una idea rápida e intuitiva de la calidad; sin embargo, precisa ser complementado con otros índices para obtener una visión real de la situación. La fórmula para determinar el índice simplificado de calidad del agua es la siguiente:

$$\text{ISCA} = T \cdot (A + B + C + D)$$

Donde: T es el coeficiente de temperatura, se calcula de acuerdo a la figura 1 (pp. 9); A es el coeficiente de oxígeno consumido u oxidabilidad, se determina con la figura 2 (pp. 9); B es el coeficiente de sólidos totales en suspensión, se calcula con la figura 3 (pp. 9); C es el coeficiente de oxígeno disuelto, se determina con la figura 4 (pp. 9); D es el coeficiente de conductividad eléctrica, se calcula con la figura 5 (pp. 10).

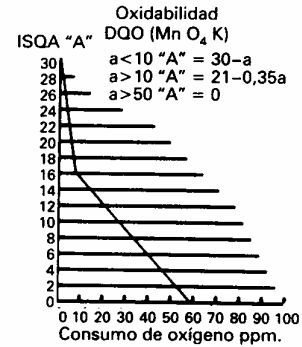
¹ HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 123-125.

Figura 1. Coeficiente de temperatura



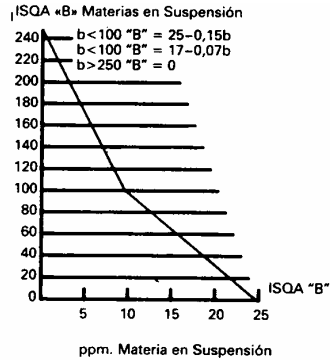
Fuente: HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 124.

Figura 2. Coeficiente de oxígeno consumido



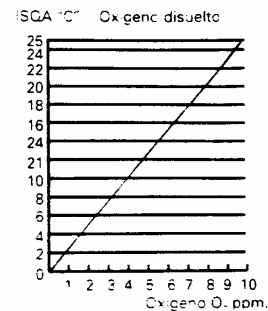
Fuente: HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 124.

Figura 3. Coeficiente de sólidos totales en suspensión



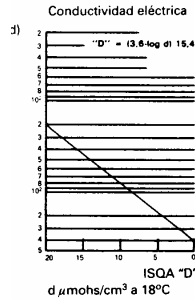
Fuente: HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 124.

Figura 4. Coeficiente de oxígeno disuelto



Fuente: HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 125.

Figura 5. Coeficiente de conductividad eléctrica



Fuente: HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 125.

Las categorías de calidad del agua determinadas con el ISCA se presentan en la tabla I.

Tabla I. Rangos y categorías del índice simplificado de calidad del agua

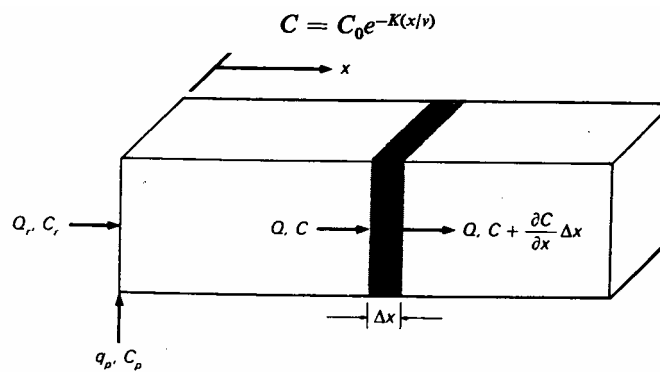
ISCA	Categoría	Descripción
90 – 100	Excelente	La calidad del agua esta protegida, dando por sentado una ausencia total de amenazas; las condiciones son cercanas a los niveles naturales o prístinos.
80 – 90	Buena	La calidad del agua esta protegida contra un menor grado de amenazas; las condiciones raramente se apartan de los niveles naturales o deseados.
70 – 80	Intermedia	La calidad del agua es ocasionalmente afectada; las condiciones a veces no cumplen con los niveles deseados.
60 – 70	Admisible	La calidad del agua es frecuentemente afectada; las condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados.
0 – 60	Inadmisible	La calidad del agua es continuamente afectada; las condiciones no cumplen con los niveles deseados.

Fuente: <http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/proyectos/aguas/etapa2/criterios.htm>

1.7 Modelo matemático de oxígeno en los ríos

En la mayoría de los estudios que se efectúan sobre ríos, se supone que los residuos están uniformemente distribuidos en la sección transversal del río. Esto puede estar lejos de la realidad en la inmediata proximidad de la salida, si bien la validez de esta suposición aumenta, casi siempre, conforme los residuos son arrastrados aguas abajo. Igualmente puede suponerse que no hay mezclado alguno a lo largo del eje del río, lo que es razonable en el caso de que el río no sea extremadamente turbulento. Por tanto, el modelo del río se reduce al de flujo en pistón. En la figura 6 se presenta la definición de un modelo de flujo en pistón empleado en el estudio de un río.

Figura 6. Modelo de flujo en pistón



Fuente: METCALF & EDDY. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. 2ª ed. Ed. Labor, S.A.: Barcelona, 1981. pp. 721.

A partir de un incremento de volumen se puede establecer un balance material suponiendo una tasa de descomposición de residuo que se esté estudiando y que no haya nuevas fuentes de elementos de contaminación.

Variación del
 contenido del río = flujo entrante - flujo saliente + fuentes - sumideros

$$V\Delta C = QC\Delta t - Q(C + \delta C/\delta x\Delta x) + 0 - VKC\Delta t$$

$$V\Delta C/\Delta t = -Q\delta C/\delta x\Delta x - KC$$

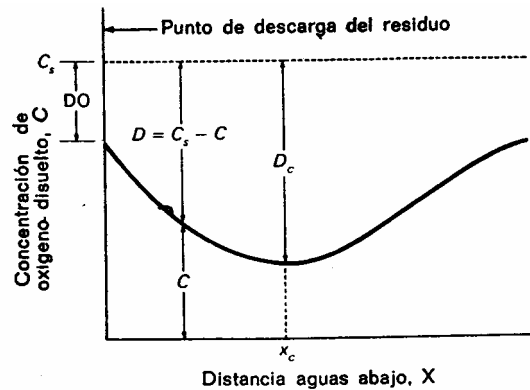
Por tanto, luego de una exhaustiva deducción matemática, se llega a la ecuación simplificada de Streeter y Phelps que se utiliza con frecuencia en el estudio de ríos:

$$D = [K_1L/(K_2 - K_1)][e^{-K_1(x/v)} - e^{-K_2(x/v)}] + D_0e^{-K_2(x/v)}$$

Donde, D es déficit de oxígeno disuelto, K_1 es la coeficiente de descomposición bioquímica de la materia orgánica o de la DBO, L la DBO final al inicio, K_2 es la coeficiente de reaireación, x la distancia, v la velocidad de flujo y D_0 es el déficit inicial de oxígeno.

La forma de la ecuación de Streeter y Phelps se muestra en la figura 7 (pp. 13) que ofrece la curva de déficit de oxígeno o de disminución de oxígeno disuelto en un río. La descomposición biológica activa comienza inmediatamente después del vertido. Puesto que la reaireación atmosférica es proporcional al déficit de oxígeno disuelto, su tasa aumentará a medida que el déficit sea mayor.

Figura 7. Curva de déficit de oxígeno



Fuente: METCALF & EDDY. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. 2ª ed. Ed. Labor, S.A.: Barcelona, 1981. pp. 723.

Por último, se alcanza un punto en el cual la tasa de oxígeno utilizado para la descomposición del residuo iguala a la tasa de reaireación atmosférica. Aguas abajo del punto x_c , que se puede observar en la figura 7, la tasa de reaireación es mayor que la de utilización y el oxígeno disuelto comienza a aumentar. Al cabo del tiempo, la corriente no mostrará efecto alguno por causa de los vertidos. Este fenómeno es conocido como el de purificación natural de las corriente o autodepuración.

El déficit crítico de oxígeno disuelto D_c en el punto x_c es importante desde el punto de vista técnico. El déficit crítico puede determinarse porque la tasa de utilización de oxígeno es igual a la de reaireación en dicho punto.

$$D_c = K_1 [L e^{-K_1(x_c/v)}] / K_2$$

El valor de x_c puede determinarse diferenciando la ecuación anterior con respecto a x y haciendo que dD/dx sea igual a cero:

$$x_c = [v / (K_2 - K_1)] \ln(K_2 / K_1) [1 - D_0(K_2 - K_1) / K_1 L]$$

y

$$t_c = x_c/v$$

Donde t_c es igual al tiempo requerido para alcanzar el punto crítico.

1.8 Constante de autodepuración “f” de Fair

Basado en la condición hidráulica de la corriente, Fair definió que la constante de autodepuración “f” es:

$$f = K_2/K_1$$

Donde K_2 es el coeficiente de reaireación y K_1 es el coeficiente de descomposición bioquímica de la materia orgánica.

En la tabla II se presentan los rangos respectivos.

Tabla II. Constante de autodepuración “f” de Fair

Tipo de corriente	Rango de “f”
Pequeños estanques	0,5 – 1
Corrientes remansadas, lagos	1 – 2
Corrientes lentas	1,5 – 2
Corrientes moderadas	2 – 3
Corrientes rápidas	3 – 5
Rápidos y cascadas	> 5

Fuente: HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 165.

2. METODOLOGÍA

2.1 Recursos

A continuación se describen los lugares donde se realizan las distintas actividades, los materiales y el equipo utilizado para la realización del presente estudio especial; así como la metodología para muestreo, determinación de parámetros y cálculo de coeficientes cinéticos.

2.1.1 Ubicación

Los lugares para la toma de muestras del río Samalá, así como los análisis de laboratorio correspondientes, se presentan en los siguientes numerales.

2.1.1.1 Muestreo

La toma de muestras se realiza en los siguientes puntos de muestreo:

- Cantel, Quetzaltenango: estación hidrológica Cantel, del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH; coordenadas: latitud N 14,80917° y longitud W 91,45083°; cota: 2 454 msnm.
- Zunil, Quetzaltenango: estación hidrológica El Túnel, del Instituto Nacional de Electrificación, INDE; coordenadas: latitud N 14,75728° y longitud W 91,50125°; cota: 1 824 msnm.
- El Palmar, Quetzaltenango: Finca El Recreo; coordenadas: latitud N 14,65593° y longitud W 91,56169°; cota: 818 msnm.

2.1.1.2 Análisis de muestras

Se realiza en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina", de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

2.1.2 Materiales

Los materiales que se utilizan en las etapas de campo y de laboratorio son:

- Envases de plástico
- Frascos de vidrio pyrex de boca estrecha y con tapón de vidrio
- Botellas de incubación
- Vasos de precipitados
- Frascos Erlenmeyer
- Balones aforados
- Placas de evaporación
- Buretas
- Pipetas
- Probetas
- Embudos
- Pissetas
- Goteros
- Perillas de succión
- Varillas de agitación
- Discos de filtrado de fibra de vidrio
- Pinzas
- Reactivos
- Guantes
- Batas
- Anteojos de laboratorio
- Hielera

2.1.3 Equipo

El equipo para las etapas de campo y de laboratorio del presente estudio especial es el siguiente:

- Termómetro
- Cronómetro
- Potenciómetro
- Espectrofotómetro
- Baño de vapor
- Horno de mufla
- Horno de secado
- Desecador
- Bomba de vacío
- Balanza de análisis
- Incubadora

2.2 Métodos

La metodología para el desarrollo del estudio especial se presenta a continuación:

2.2.1 Toma de muestras

Para efectos del presente estudio especial se realiza con el método de toma manual 1 060 B de los **métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**, de la Asociación Americana de Salud Pública (APHA, por sus siglas en inglés), la Asociación Americana de Obras de Agua (AWWA) y la Federación de Control de la Contaminación del Agua (WPCF; ahora Federación de Ambientes Acuáticos, WEF), correspondientes a la edición oficial en español de la decimoséptima edición en inglés.

En cada fecha de muestreo y en cada punto respectivo, se tomaron muestras simples de 115 cm³ a cada 5 minutos, hasta conformar una muestra compuesta de 1 380 cm³ luego de una hora. Lo antes mencionado, de acuerdo con el método 1 050 B de los **métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**.

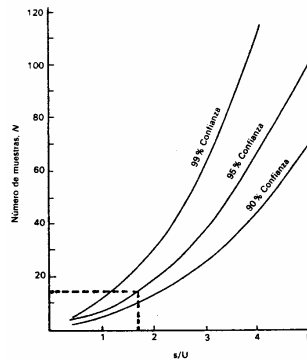
2.2.2 Análisis estadístico para determinar el número de muestras

Con el propósito de calcular el número de muestras a tomar en cada punto de muestreo, de conformidad con el método 1 060 B de los **métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**, se utilizaron las curvas de niveles de confianza establecidos a partir de la fórmula²: $N \geq (ts/U)^2$; donde, **N** es el número de muestras, **t** es la t de Student para un nivel de confianza determinado, **s** es la desviación estándar global y **U** es el nivel de confianza aceptable.

De los resultados experimentales se tiene que $s = 0,851$ y $U = 0,5$; entonces, $s/U = 1,702$. Con dicho resultado se procede, en la figura 8 (pp. 20), a interpolar en las curvas respectivas para un nivel de confianza del 95 %, y se obtiene que el número de muestras a recoger debe ser mayor o igual a 15. Finalmente, a partir del valor calculado, para los efectos del presente estudio el número de muestras es de **16**.

² **MÉTODOS normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 1992. pp. 1-41.

Figura 8. Número de muestras para diferentes niveles de confianza



Fuente: **MÉTODOS normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 1992. pp. 1-41.

2.2.3 Determinación de parámetros

Para determinar los parámetros, que se describen a continuación, se utilizaron los **métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales** siguientes:

- Temperatura: 2 550 B
- Sólidos totales, fijos y volátiles: 2 540 B
- Sólidos suspendidos totales: 2 540 D
- Conductividad eléctrica: 2 520 B
- Demanda bioquímica de oxígeno: 5 210 B
- Demanda química de oxígeno: 5 220 D
- Potencial de hidrógeno: 4 500-H+ B
- Oxígeno disuelto: 4 500-O B

Para determinar el oxígeno consumido se utilizó el método presentado en el ***Laboratory manual for chemical and bacterial analysis of water and sewage***, de Frank R. Theroux, Edward F. Eldridge y W. LeRoy Mallmann.

2.2.4 Cálculo de coeficientes cinéticos

Inicialmente, se correlacionan los resultados de demanda bioquímica de oxígeno entre cada uno de los puntos de muestreo; luego, se correlacionan los resultados de oxígeno disuelto; en ambos casos, se obtiene que los datos con mejor coeficiente de correlación son aquéllos medidos en las estaciones hidrológicas Cantel y El Túnel.

Se calcula el coeficiente cinético de descomposición bioquímica de materia orgánica, K_1 , en día⁻¹, a partir de los datos obtenidos de demanda bioquímica de oxígeno, con la fórmula: $K_1 = 1/t \cdot \ln(\text{DBO}_1/\text{DBO}_2)$ ³; donde, t es el tiempo de recorrido entre los dos puntos de toma de muestras (día) y DBO_1 y DBO_2 son la concentración de DBO en los puntos A y B de muestreo, (mg/l). Además, se procede a determinar K_1 para temperaturas diferentes a 20 °C, $K_{1(T)}$, con la fórmula $K_{(T)} = K_{(20\text{ °C})} F^{(T-20)}$ ⁴; donde, $K_{1(20\text{ °C})}$ es K_1 a 20 °C, F es la constante en este caso se utiliza la desarrollada por Streeter y Phelps, $F = 1,047$ ⁵, válida entre 10 y 37 °C; y, T es la temperatura (°C). Para concluir el cálculo, se promedian los resultados de $K_{1(T)}$ para obtener dicho coeficiente.

³ CURSO sobre evaluaciones de impacto ambiental. 2ª ed. Dirección General del Medio Ambiente: Madrid, 1984. pp. 307.

⁴ Ibídem. pp. 311.

⁵ Ibídem. pp. 311.

Luego, se calcula la concentración de saturación de oxígeno, $OD_{(T,P)}$, con los resultados de oxígeno disuelto y presión y la fórmula: $OD_{(T,P)} = OD_{(T,P_0)} * (P/P_0)^6$; donde, $OD_{(T,P_0)}$ corresponde al oxígeno disuelto a presión atmosférica (se determina a partir de los datos de la figura 12.3 y de la tabla correspondiente), P es la presión y P_0 la presión al nivel del mar. Con dicho resultado y las concentraciones de oxígeno disuelto medidas experimentales se determina el déficit de oxígeno, D , con la ecuación: $D = OD_{(T,P)} - OD^7$.

Después, utilizando el resultado de K_1 así como los resultados de déficit de oxígeno, se determina el coeficiente cinético de reaireación, K_2 , en día⁻¹, con la fórmula simplificada de Streeter y Phelps: $D_B = K_1 * L_A * (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) / (K_2 - K_1) + D_A e^{-K_2}$,⁸ donde, D_B es el déficit de oxígeno en un punto B (mg/l); t es el tiempo a partir de un instante $t_0 = 0$ (día); D_A es el déficit de oxígeno en el punto A (mg/l); y, L_A , es la DBO final en el punto A. Dicha determinación se realiza por iteraciones con el método de análisis numérico de Newton y, por último, se promedian los resultados obtenidos de K_2 para obtener el coeficiente de reaireación respectivo.

Finalmente, con los resultados de velocidad media y profundidad media del río Samalá, con el propósito de realizar comparaciones de K_2 a partir de fórmulas de la literatura, se calcula con las fórmulas de Streeter y Phelps, Churchill et al.⁹, O'Connor y Dobbins, Isaacs, Tennessee Valley y Owens¹⁰. Los resultados se encuentran en la tabla XI de la sección de resultados (pp. 30).

⁶ Ibidem. pp. 310.

⁷ JOLÁNKAI, Géza. *Basic river water quality models*. UNESCO: Paris, 1997. pp. 20.

⁸ HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. *Depuración de aguas residuales*. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 168.

⁹ JOLÁNKAI, Géza. *Hydrological, chemical and biological process of contamination, transformation and transport in river and lake system*. UNESCO: Paris, 1992. pp. 22.

¹⁰ HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. *Depuración de aguas residuales*. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp.141.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas y las figuras siguientes.

Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar

	Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
Lugar de muestreo	Fecha	2004-10-05	2004-10-12	2004-10-19	2004-10-26	2004-11-02	2004-11-09	2004-11-16	2004-11-23	2004-11-30	2004-12-07	2004-12-21	2005-01-04	2005-02-01	2005-03-01	2005-04-05	2005-05-03	Valor máximo	Valor mínimo	Valor promedio	Desviación estándar
Cantel	Temperatura [°C]	17,0	15,0	15,0	15,0	15,5	14,5	14,0	13,5	12,5	12,5	10,0	9,0	12,0	15,0	19,0	18,0	19,0	9,0	14,219	2,652
El Túnel		23,0	18,0	18,5	19,0	20,0	29,0	19,5	19,5	18,5	18,0	15,0	14,0	16,5	19,5	20,0	20,0	23,0	14,0	18,688	2,144
El Recreo		26,5	23,0	21,0	22,5	21,5	21,0	23,0	21,0	21,0	19,5	19,0	20,0	21,0	26,0	29,0	28,5	29,0	19,0	22,719	3,120
Cantel	Sólidos totales [mg/l]	418	682	444	321	349	223	151	132	358	302	288	265	396	514	337	385	682	132	347,813	134,548
El Túnel		384	798	447	392	454	465	174	211	263	426	433	456	535	509	648	340	798	174	433,438	154,026
El Recreo		223	293	252	479	381	372	213	229	240	348	334	421	715	497	321	436	715	213	359,625	131,521
Cantel	Sólidos fijos [mg/l]	273	333	205	134	230	66	74	61	158	142	85	70	137	215	165	181	333	61	158,063	79,307
El Túnel		239	454	259	111	218	311	96	122	119	293	288	200	333	365	358	233	454	96	249,938	103,603
El Recreo		152	105	13	38	172	215	76	42	171	192	193	144	487	271	114	247	487	13	164,500	113,968
Cantel	Sólidos volátiles [mg/l]	145	349	239	187	119	157	77	71	200	160	203	195	259	299	172	204	349	71	189,750	73,544
El Túnel		145	344	188	281	236	154	78	88	144	133	145	256	202	144	290	107	344	78	183,438	77,714
El Recreo		71	188	239	441	209	157	137	187	69	156	141	277	228	226	207	189	441	69	195,125	86,492
Cantel	Sólidos suspendidos totales [mg/l]	154	240	80	90	210	25	90	77	60	51	60	55	20	53	65	47	240	20	86,063	62,466
El Túnel		170	220	140	50	60	132	145	120	110	41	95	40	51	110	70	80	220	40	102,125	51,240
El Recreo		195	29	20	170	32	61	119	152	87	12	30	20	17	215	146	90	215	12	87,188	69,996
Cantel	Conductividad eléctrica [µohm/cm]	116,4	145,9	172,6	181,6	199,7	228,0	227,1	237,9	247,8	251,0	247,9	246,0	241,4	248,7	245,6	232,3	251,0	116,4	216,869	41,563
El Túnel		181,2	249,0	269,1	315,7	362,0	393,6	404,5	427,4	448,7	461,0	487,5	452,9	422,8	438,5	454,0	469,0	487,5	181,2	389,806	90,087
El Recreo		155,7	269,0	238,3	295,0	273,2	251,0	275,8	340,7	386,5	390,3	437,2	460,1	474,9	429,0	364,2	315,9	474,9	155,7	334,800	90,663
Cantel	Demanda bioquímica de oxígeno [mg/l]	20,0	20,0	4,2	8,5	18,0	19,7	8,8	11,5	8,4	21,0	24,5	46,9	21,6	17,7	16,0	19,5	46,9	4,2	17,894	9,717
El Túnel		11,3	16,9	8,5	17,5	21,6	49,9	35,0	27,2	24,6	29,0	24,1	40,0	39,3	28,0	26,4	19,0	49,9	8,5	26,144	10,926
El Recreo		6,8	9,0	6,0	7,9	2,2	2,5	2,3	2,0	4,3	6,0	4,5	5,2	11,0	6,1	4,0	3,7	11	2,0	5,219	2,581
Cantel	Demanda química de oxígeno [mg/l]	32	55	32	28	38	30	29	34	34	40	42	53	44	35	49	30	55	28	37,813	8,612
El Túnel		41	58	45	36	35	66	42	39	35	33	47	62	56	48	56	45	66	33	46,500	10,341
El Recreo		15	16	18	12	18	11	14	12	11	9	15	6	26	16	9	12	26	6	13,750	4,683
Cantel	Potencial de hidrógeno [unidades pH]	6,998	6,985	6,970	7,135	6,942	7,348	7,438	7,754	7,375	6,921	7,020	6,832	7,086	6,963	6,846	6,981	7,754	6,832	7,100	0,252
El Túnel		7,249	7,204	7,295	7,401	7,260	7,584	7,671	7,908	7,880	7,563	7,262	7,364	7,395	7,254	7,246	7,327	7,908	7,204	7,429	0,227
El Recreo		7,576	7,549	7,364	7,431	7,397	7,688	7,779	7,973	7,557	7,783	7,862	8,105	7,131	7,297	7,310	7,405	8,105	7,131	7,575	0,270
Cantel	Oxígeno disuelto [mg/l]	7,1	4,6	5,4	6,2	3,7	4,6	5,1	5,6	5,9	5,4	6,1	7,8	6,8	5,5	4,3	4,4	7,8	3,7	5,531	1,103
El Túnel		6,6	5,2	5,0	5,4	3,3	4,2	4,9	5,0	5,3	5,6	5,8	6,8	6,0	3,9	3,6	4,0	6,8	3,3	5,038	1,026
El Recreo		6,8	5,0	6,2	5,2	2,7	3,2	4,0	5,1	3,7	4,9	5,5	6,3	4,2	1,9	1,2	2,3	6,8	1,2	4,263	1,657
Cantel	Oxígeno consumido [mg/l]	5,9	6,3	6,1	3,3	2,8	3,0	2,4	2,7	2,5	2,9	3,4	6,6	4,6	3,8	4,0	3,2	6,6	2,4	3,969	1,463
El Túnel		9,4	11,2	10,3	3,0	3,4	5,8	4,9	5,2	4,7	5,5	5,6	6,1	5,9	4,9	5,6	5,3	11,2	3,0	6,050	2,290
El Recreo		2,5	3,9	3,0	2,3	2,0	3,2	2,6	3,1	2,6	3,1	3,3	3,8	4,0	3,5	3,4	3,7	4,0	2,0	3,125	0,595

Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar

	Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
Lugar de muestreo	Fecha	2004-10-05	2004-10-12	2004-10-19	2004-10-26	2004-11-02	2004-11-09	2004-11-16	2004-11-23	2004-11-30	2004-12-07	2004-12-21	2005-01-04	2005-02-01	2005-03-01	2005-04-05	2005-05-03	Valor máximo	Valor mínimo	Valor promedio	Desviación estándar
Cantel	Caudal [m ³ /s]	3,686	4,891	5,508	3,787	2,765	2,441	2,141	1,865	1,865	2,141	2,000	1,865	1,735	1,865	1,436	1,551	5,508	1,436	2,596	1,225
El Túnel		6,710	8,812	8,812	6,710	4,760	4,760	4,869	4,760	4,242	3,408	3,323	3,763	2,919	3,672	3,763	4,242	8,812	2,919	4,970	1,839
El Recreo		17,231	15,897	13,084	12,161	13,461	10,036	9,733	9,149	8,728	9,007	8,190	8,190	8,059	7,552	7,069	8,059	17,231	7,069	10,350	3,091
Cantel	Sólidos totales [kg/s]	1,541	3,336	2,446	1,216	0,965	0,544	0,323	0,246	0,668	0,647	0,576	0,494	0,687	0,958	0,484	0,597	3,336	0,246	0,983	0,829
El Túnel		2,576	7,032	3,939	2,630	2,161	2,213	0,847	1,004	1,116	1,452	1,439	1,716	1,562	1,869	2,438	1,442	7,032	0,847	2,215	1,498
El Recreo		3,843	4,658	3,297	5,825	5,129	3,733	2,073	2,095	2,095	3,134	2,735	3,448	5,762	3,753	2,269	3,514	5,825	2,073	3,585	1,236
Cantel	Sólidos fijos [kg/s]	1,006	1,629	1,129	0,507	0,636	0,161	0,158	0,114	0,295	0,304	0,170	0,131	0,238	0,401	0,237	0,281	1,629	0,114	0,462	0,434
El Túnel		1,604	4,001	2,282	0,745	1,038	1,480	0,467	0,581	0,505	0,998	0,957	0,753	0,972	1,340	1,347	0,988	4,001	0,467	1,254	0,867
El Recreo		2,619	1,669	0,170	0,462	2,315	2,158	0,740	0,384	1,492	1,729	1,581	1,179	3,925	2,047	0,806	1,991	3,925	0,170	1,579	0,966
Cantel	Sólidos volátiles [kg/s]	0,534	1,707	1,317	0,708	0,329	0,383	0,165	0,132	0,373	0,343	0,406	0,364	0,449	0,557	0,247	0,316	1,707	0,132	0,521	0,418
El Túnel		0,973	3,031	1,657	1,885	1,123	0,733	0,380	0,419	0,611	0,453	0,482	0,963	0,590	0,529	1,091	0,454	3,031	0,380	0,961	0,709
El Recreo		1,223	2,989	3,127	5,363	2,813	1,576	1,333	1,711	0,602	1,405	1,155	2,269	1,837	1,707	1,463	1,523	5,363	0,602	2,006	1,133
Cantel	Sólidos suspendidos [kg/s]	0,568	1,174	0,441	0,341	0,581	0,061	0,193	0,144	0,112	0,109	0,120	0,103	0,035	0,099	0,093	0,073	1,174	0,035	0,265	0,301
El Túnel		1,141	1,939	1,234	0,335	0,286	0,628	0,706	0,571	0,467	0,140	0,316	0,151	0,149	0,404	0,263	0,339	1,939	0,140	0,567	0,489
El Recreo		3,360	0,461	0,262	2,067	0,431	0,612	1,158	1,391	0,759	0,108	0,246	0,164	0,137	1,624	1,032	0,725	3,360	0,108	0,909	0,872
Cantel	Demanda bioquímica de oxígeno [kg/s]	0,074	0,098	0,023	0,032	0,050	0,048	0,019	0,021	0,016	0,045	0,049	0,087	0,037	0,033	0,023	0,030	0,098	0,016	0,043	0,025
El Túnel		0,076	0,149	0,075	0,117	0,103	0,238	0,170	0,129	0,104	0,099	0,080	0,151	0,115	0,103	0,099	0,081	0,238	0,075	0,118	0,042
El Recreo		0,117	0,143	0,079	0,096	0,030	0,025	0,022	0,018	0,038	0,054	0,037	0,043	0,089	0,046	0,028	0,030	0,143	0,018	0,056	0,038
Cantel	Demanda química de oxígeno [kg/s]	0,118	0,269	0,176	0,106	0,105	0,073	0,062	0,063	0,063	0,086	0,084	0,099	0,076	0,065	0,070	0,047	0,269	0,047	0,098	0,055
El Túnel		0,275	0,511	0,397	0,242	0,167	0,314	0,204	0,186	0,148	0,112	0,156	0,233	0,163	0,176	0,211	0,191	0,511	0,112	0,230	0,103
El Recreo		0,258	0,254	0,236	0,146	0,242	0,110	0,136	0,110	0,096	0,081	0,123	0,049	0,210	0,121	0,064	0,097	0,258	0,049	0,146	0,071
Cantel	Oxígeno disuelto [kg/s]	0,026	0,022	0,030	0,023	0,010	0,011	0,011	0,010	0,011	0,012	0,012	0,015	0,012	0,010	0,006	0,007	0,030	0,006	0,014	0,007
El Túnel		0,044	0,046	0,044	0,036	0,016	0,020	0,024	0,024	0,022	0,019	0,019	0,026	0,018	0,014	0,014	0,017	0,046	0,014	0,025	0,011
El Recreo		0,117	0,079	0,081	0,063	0,036	0,032	0,039	0,047	0,032	0,044	0,045	0,052	0,034	0,014	0,008	0,019	0,117	0,008	0,046	0,028
Cantel	Oxígeno consumido [kg/s]	0,022	0,031	0,034	0,012	0,008	0,007	0,005	0,005	0,005	0,006	0,007	0,012	0,008	0,007	0,006	0,005	0,034	0,005	0,011	0,009
El Túnel		0,063	0,099	0,091	0,020	0,016	0,028	0,024	0,025	0,020	0,019	0,019	0,023	0,017	0,018	0,021	0,022	0,099	0,016	0,033	0,027
El Recreo		0,043	0,062	0,039	0,028	0,027	0,032	0,025	0,028	0,023	0,028	0,027	0,031	0,032	0,026	0,024	0,030	0,062	0,023	0,032	0,010

Tabla V. Índices simplificados de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar

Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Valor máximo	Valor mínimo	Valor promedio	Desviación estándar	Categoría
Lugar de muestreo	2004-10-05	2004-10-12	2004-10-19	2004-10-26	2004-11-02	2004-11-09	2004-11-16	2004-11-23	2004-11-30	2004-12-07	2004-12-21	2005-01-04	2005-02-01	2005-03-01	2005-04-05	2005-05-03	94,960	62,228	83,829	9,764	Buena
Cantel	74,850	67,483	86,476	79,103	62,228	90,927	87,080	90,385	94,960	94,538	86,027	89,145	91,900	90,893	74,551	80,722	94,960	62,228	83,829	9,764	Buena
El Túnel	60,796	62,298	66,862	86,028	67,236	62,346	68,922	71,268	73,808	83,813	78,301	80,465	74,573	59,322	59,621	62,004	86,028	59,322	69,854	8,831	Admisible
El Recreo	64,247	78,532	82,398	70,917	71,752	69,851	61,528	71,546	64,750	85,802	86,795	78,534	74,231	44,234	44,682	53,998	86,795	44,234	68,987	12,993	Admisible
Promedio	66,631	69,438	78,579	78,683	67,072	74,375	72,510	77,733	77,840	88,051	83,708	82,715	80,235	64,816	59,618	65,574			74,223		Intermedia
Categoría	Admisible	Admisible	Intermedia	Intermedia	Admisible	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Buena	Buena	Buena	Buena	Admisible	Inadmisible	Admisible					

Tabla VI. Coeficientes cinéticos del río Samalá

Coefficientes cinéticos	Tramo	Resultados
Coeficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica, K_1 [día ⁻¹]	Cantel – Zunil	0,603
	Zunil – El Palmar	1,693
Coeficiente de reaireación, K_2 [día ⁻¹]	Cantel – Zunil	22,753
	Zunil – El Palmar	19,884

Tabla VII. Puntos de muestreo en el río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar

Punto de muestreo	Lugar	Latitud	Longitud	Elevación [msnm]	Distancia [km]		Diferencia de nivel [m]	
1	Estación hidrológica Cantel	N 14,80917°	W 91,45083°	2 454	1 – 2	8	1 – 2	630
2	Estación hidrológica El Túnel	N 14,75728°	W 91,50125°	1 824	2 – 3	13	2 – 3	1 006
3	Finca El Recreo	N 14,65593°	W 91,56169°	818	Total	21		

Tabla VIII. Características del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar

Lugar de muestreo	Muestreo	Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Promedio	Desviación estándar
			2004-10-05	2004-10-12	2004-10-19	2004-10-26	2004-11-02	2004-11-09	2004-11-16	2004-11-23	2004-11-30	2004-12-07	2004-12-21	2005-01-04	2005-02-01	2005-03-01	2005-04-05	2005-05-03		
Cantel	Área [m ²]		4,912	5,965	6,505	5,000	4,107	3,823	3,561	3,320	3,320	3,561	3,438	3,320	3,206	3,320	2,945	3,046	3,959	1,071
El Túnel			8,725	10,482	10,482	8,725	7,097	7,097	7,188	7,097	6,664	5,968	5,897	6,264	5,559	6,188	6,264	6,664	7,273	1,536
El Recreo			18,274	17,211	14,972	14,237	15,272	12,544	12,303	11,838	11,503	11,725	11,074	11,074	10,970	10,566	10,182	10,970	12,795	2,462
Cantel	Profundidad media [m]		0,44	0,51	0,54	0,45	0,39	0,37	0,35	0,33	0,33	0,35	0,34	0,33	0,33	0,33	0,31	0,31	0,380	0,070
El Túnel			0,87	0,98	0,98	0,87	0,76	0,76	0,76	0,76	0,73	0,68	0,67	0,70	0,65	0,69	0,70	0,73	0,770	0,103
El Recreo			1,12	1,20	1,29	1,30	1,28	1,29	1,29	1,27	1,26	1,27	1,24	1,24	1,24	1,22	1,19	1,24	1,250	0,047
Cantel	Velocidad media [m/s]		0,750	0,820	0,847	0,757	0,673	0,638	0,601	0,562	0,562	0,601	0,582	0,562	0,541	0,562	0,488	0,509	0,628	0,110
El Túnel			0,769	0,841	0,841	0,769	0,671	0,671	0,677	0,671	0,636	0,571	0,564	0,601	0,525	0,593	0,601	0,636	0,665	0,096
El Recreo			0,943	0,924	0,874	0,854	0,881	0,800	0,791	0,773	0,759	0,768	0,740	0,740	0,735	0,715	0,694	0,735	0,795	0,077
Cantel	Temperatura ambiente [°C]		15	13	15	13	10	16	16	10	10	8	7	10	13	11	16	12,063	2,955	
El Túnel			21	20	18,5	16,5	15	19	21	15	17	16	13	11	15	18	17	20	17,063	2,857
El Recreo			28	23	21	24	23	24	24	22	23	22	21	26	30	29	34,5	30	25,281	3,916
Cantel	Presión atmosférica [mm Hg]		596,6	592,1	596,8	597,3	597,2	597,3	597,4	597,2	594,2	597,2	596,9	597,5	597,7	597,2	597,2	597,1	596,687	1,466
El Túnel			624,9	621,8	624,6	625,1	624,5	625,2	624,6	625,3	624,8	625	624,5	625,1	625	625	624,8	624,3	624,656	0,812
El Recreo			669,2	669,1	669,0	669,4	668,8	669,8	668,9	670,0	672,0	669,5	669,6	669,0	670,4	669,4	668,9	668,6	669,466	0,838

Tabla IX. Datos para calcular los coeficientes cinéticos del río Samalá, tramo Cantel – Zunil¹¹

Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Valor máximo	Valor mínimo	Valor promedio	Desviación estándar
Fecha	2004-10-05	2004-10-12	2004-10-19	2004-10-26	2004-11-02	2004-11-09	2004-11-16	2004-11-23	2004-11-30	2004-12-07	2004-12-14	2005-01-04	2005-02-01	2005-03-01	2005-04-05	2005-05-03	4,2	46,9	17,894	9,717
DBO [mg/l]	20	20	4,2	8,5	18	19,7	8,8	11,5	8,4	21	24,5	46,9	21,6	17,7	16	19,5	8,5	49,9	26,144	10,926
K ₁ [día ⁻¹]			0,705	0,722	0,182	0,929	1,381	0,861	1,075	0,323			0,599	0,459	0,501		0,182	1,381	0,703	0,347
Temperatura [°C]	17	15	15	15	15,5	14,5	14	13,5	12,5	12,5	10	9	12	15	19	18	9	19	14,219	2,652
	23	18	18,5	19	20	20	19,5	19,5	18,5	18	15	14	16,5	19,5	20	20	14	23	18,688	2,144
	20	16,5	16,75	17	17,75	17,25	16,75	16,5	15,5	15,25	12,5	11,5	14,25	17,25	19,5	19	11,5	20	16,453	2,297
K _{1T} [día ⁻¹] ¹²			0,607	0,629	0,164	0,819	1,189	0,733	0,874	0,260			0,460	0,404	0,489		0,164	1,189	0,603	0,294
L _a [mg/L] ¹¹	220	220	204,2	208,5	218	219,7	208,8	211,5	208,4	221	224,5	246,9	221,6	217,7	216	219,5	204,2	246,9	217,894	9,717
OD _(T,Po) [mg/l]	9,7	10,2	10,2	10,2	10,1	10,3	10,4	10,5	10,7	10,5	11,3	11,6	10,8	10,2	9,4	9,5	11,6	9,4	10,350	0,580
	8,7	9,5	9,45	9,4	9,2	9,2	9,45	10,5	9,45	9,5	10,2	10,4	10	9,3	9,2	9,2	10,5	8,7	9,541	0,489
Presión [mm Hg]	596,6	592,1	596,8	597,3	597,2	597,3	597,4	597,2	594,2	597,2	596,9	597,5	597,7	597,2	597,2	597,1	597,7	592,1	596,687	1,466
	624,9	621,8	624,6	625,1	624,5	625,2	624,6	625,3	624,8	625	624,5	625,1	625	625	624,8	624,3	625,3	621,8	624,656	0,812
OD _(T,P) [mg/l]	7,614	7,946	8,010	8,017	7,937	8,095	8,175	8,251	8,366	8,251	8,875	9,120	8,494	8,015	7,387	7,464	9,120	7,387	8,126	0,457
	7,153	7,773	7,766	7,732	7,560	7,568	7,766	8,639	7,769	7,813	8,381	8,554	8,224	7,648	7,563	7,557	8,639	7,153	7,842	0,403
OD [mg/l]	7,1	4,6	5,4	6,2	3,7	4,6	5,1	5,6	5,9	5,4	6,1	7,8	6,8	5,5	4,3	4,4	3,7	7,8	5,531	1,103
	6,6	5,2	5	5,4	3,3	4,2	4,9	5	5,3	5,6	5,8	6,8	6	3,9	3,6	4	3,3	6,8	5,038	1,026
D _a [mg/l] ¹²	0,514	3,346	2,610	1,817	4,237	3,495	3,075	2,651	2,466	2,851	2,775	1,320	1,694	2,515	3,087	3,064	4,237	0,514	2,595	0,904
D _b [mg/l] ¹³	0,553	2,573	2,766	2,332	4,260	3,368	2,866	3,639	2,469	2,213	2,581	1,754	2,224	3,748	3,963	3,557	4,260	0,553	2,804	0,939
K ₂ [día ⁻¹]			25,029	30,611	7,286	24,372	27,568	21,182	31,657	20,280			29,394	16,071	16,833		31,657	7,286	22,753	7,373
F			41,219	48,652	44,313	29,754	23,183	28,896	36,226	78,148			63,954	39,758	34,395		78,148	23,183	42,591	16,146

¹¹ A partir de la ecuación simplificada de Streeter y Phelps: $D_a = K_1 L_0 / (K_2 - K_1) [e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}] + D_b e^{-K_2 t}$. HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 169.

¹² Coeficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica a temperatura diferente a 20 °C

¹¹ DBO final

¹² Déficit de oxígeno en el punto de muestreo 1: estación hidrológica Cantel

¹³ Déficit de oxígeno en el punto de muestreo 2: estación hidrológica El Túnel

Tabla X. Datos para calcular los coeficientes cinéticos del río Samalá, tramo Zunil – El Palmar¹⁴

Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Valor máximo	Valor mínimo	Valor promedio	Desviación estándar
Fecha	2004-10-05	2004-10-12	2004-10-19	2004-10-26	2004-11-02	2004-11-09	2004-11-16	2004-11-23	2004-11-30	2004-12-07	2004-12-21	2005-01-04	2005-02-01	2005-03-01	2005-04-05	2005-05-03	49,9	8,5	26,144	10,926
DBO [mg/l]	11,3	16,9	8,5	17,5	21,6	49,9	35,0	27,2	24,6	29,0	24,1	40,0	39,3	28,0	26,4	19,0	49,9	8,5	26,144	10,926
	6,8	9,0	6,0	7,9	2,2	2,5	2,3	2,0	4,3	6,0	4,5	5,2	11,0	6,1	4,0	3,7	11	2,0	5,219	2,581
K ₁ [día ⁻¹]	0,508	0,630	0,348	0,795	2,284	2,994	2,722	2,610	1,744	1,576	1,678	2,040	1,273	1,524	1,887	1,636	2,994	0,348	1,641	0,793
Temperatura [°C]	23,0	18,0	18,5	19,0	20,0	29,0	19,5	19,5	18,5	18,0	15,0	14,0	16,5	19,5	20,0	20,0	23,0	14,0	18,688	2,144
	26,5	23,0	21,0	22,5	21,5	21,0	23,0	21,0	21,0	19,5	19,0	20,0	21,0	26,0	29,0	28,5	29,0	19,0	22,719	3,120
	24,8	20,5	19,8	20,8	20,8	20,5	21,3	20,3	19,8	18,8	17,0	17,0	18,8	22,8	24,5	24,3	24,8	17,0	20,7	2,381
K _{1T} [día ⁻¹] ¹⁵	0,632	0,645	0,344	0,823	2,364	3,063	2,883	2,640	1,724	1,488	1,462	1,778	1,202	1,729	2,320	1,989	3,063	0,344	1,693	0,827
L _a [mg/L] ¹⁶	211,3	216,9	208,5	217,5	221,6	249,9	235	227,2	224,6	229	224,1	240	239,3	228	226,4	219	249,9	208,5	226,144	10,926
OD _(T,Po) [mg/l]	6,6	5,2	5,0	5,4	3,3	4,2	4,9	5,0	5,3	5,6	5,8	6,8	6,0	3,9	3,6	4,0	6,8	3,3	5,038	1,026
	6,8	5,0	6,2	5,2	2,7	3,2	4,0	5,1	3,7	4,9	5,5	6,3	4,2	1,9	1,2	2,3	6,8	1,2	4,263	1,657
Presión [mm Hg]	624,9	621,8	624,6	625,1	624,5	625,2	624,6	625,3	624,8	625	624,5	625,1	625	625	624,8	624,3	625,3	621,8	624,656	0,812
	669,2	669,1	669	669,4	668,8	669,8	668,9	670	67	669,5	669,6	669	670,4	669,4	668,9	668,6	672	668,6	669,466	0,838
OD _(T,P) [mg/l]	7,153	7,773	7,766	7,732	7,560	7,568	7,766	8,639	7,769	7,813	8,381	8,554	8,224	7,648	7,563	7,557	8,639	7,153	7,842	0,403
	7,176	7,659	7,922	7,707	7,832	7,932	7,657	7,934	7,958	8,193	8,282	8,098	7,939	7,222	6,865	6,906	8,282	6,865	7,705	0,438
OD [mg/l]	6,6	5,2	5,0	5,4	3,3	4,2	4,9	5,0	5,3	5,6	5,8	6,8	6,0	3,9	3,6	4,0	6,8	3,3	5,038	1,026
	6,8	5,0	6,2	5,2	2,7	3,2	4,0	5,1	3,7	4,9	5,5	6,3	4,2	1,9	1,2	2,3	6,8	1,2	4,263	1,657
D _a [mg/l] ¹⁷	0,553	2,573	2,766	2,332	4,260	3,368	2,866	3,639	2,469	2,213	2,581	1,754	2,224	3,748	3,963	3,557	4,260	0,553	2,804	0,939
D _b [mg/l] ¹⁸	0,376	2,659	1,722	2,507	5,132	4,732	3,657	2,834	4,258	3,293	2,782	1,798	3,739	5,322	5,665	4,606	5,665	0,376	3,443	1,473
K ₂ [día ⁻¹]	62,896	21,774	20,175	24,449	10,621	9,471	11,362	14,274	15,252	19,968	22,193	28,895	20,068	13,214	10,389	13,150	62,896	9,471	19,884	12,808
f	99,567	33,772	58,593	29,699	4,492	3,092	3,941	5,407	8,846	13,423	15,178	16,255	16,691	7,642	4,478	6,612	99,567	3,092	20,480	25,673

¹⁴ A partir de la ecuación simplificada de Streeter y Phelps: $D_a = K_1 L_o / (K_2 - K_1) [e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}] + D_b e^{-K_2 t}$. HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 169.

¹⁵ Coeficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica a temperatura diferente a 20 °C

¹⁶ DBO final

¹⁷ Déficit de oxígeno en el punto de muestreo 1: estación hidrológica Cantel

¹⁸ Déficit de oxígeno en el punto de muestreo 2: estación hidrológica El Túnel

Tabla XI. Datos para calcular los coeficientes de cinéticos, con fórmulas de distintos autores, del río Samalá

	Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Lugar de muestreo	Fecha	2004-10-05	2004-10-12	2004-10-19	2004-10-26	2004-11-02	2004-11-09	2004-11-16	2004-11-23	2004-11-30	2004-12-07	2004-12-21	2005-01-04	2005-02-01	2005-03-01	2005-04-05	2005-05-03	Promedio	Desviación estándar
Cantel	Velocidad media [m/s]	0,750	0,820	0,847	0,757	0,673	0,638	0,601	0,562	0,562	0,601	0,582	0,562	0,541	0,562	0,488	0,509	0,488	0,847
Cantel		0,750	0,820	0,847	0,757	0,673	0,638	0,601	0,562	0,562	0,601	0,582	0,562	0,541	0,562	0,488	0,509	0,488	0,847
El Túnel		0,769	0,841	0,841	0,769	0,671	0,671	0,677	0,671	0,636	0,571	0,564	0,601	0,525	0,593	0,601	0,636	0,525	0,841
El Recreo		0,943	0,924	0,874	0,854	0,881	0,800	0,791	0,773	0,759	0,768	0,740	0,740	0,735	0,715	0,694	0,735	0,694	0,943
Cantel	Profundidad media [m]	0,441	0,507	0,539	0,447	0,388	0,369	0,351	0,334	0,334	0,351	0,342	0,334	0,326	0,334	0,307	0,314	0,307	0,539
El Túnel		0,867	0,977	0,977	0,867	0,758	0,758	0,764	0,758	0,728	0,677	0,672	0,699	0,646	0,693	0,699	0,728	0,646	0,977
El Recreo		1,121	1,196	1,290	1,301	1,282	1,291	1,285	1,272	1,260	1,268	1,241	1,241	1,236	1,215	1,193	1,236	1,121	1,301
Velocidad promedio [m/s]		0,760	0,830	0,844	0,763	0,672	0,655	0,639	0,616	0,599	0,586	0,573	0,581	0,533	0,578	0,544	0,573	0,533	0,844
Profundidad promedio [m/s]	0,654	0,742	0,758	0,657	0,573	0,564	0,558	0,546	0,531	0,514	0,507	0,516	0,486	0,514	0,503	0,521	0,486	0,758	
K_1 [día ⁻¹] ¹⁹ Eckenfelder	Rango	0,35	0,64					K_{1T} [día ⁻¹]	Rango	0,327	0,600								
K_1 [día ⁻¹] ²⁰	Rango	0,1	0,8	Valor nominal	0,25	K_{1T} [día ⁻¹]	Rango	0,0935	0,748	Valor nominal	0,234								
K_2 [día ⁻¹] ²¹ Phelps	Streeter y Phelps	11,535	9,800	9,539	11,489	13,292	13,394	13,363	13,439	13,827	14,421	14,479	14,172	14,666	14,235	13,999	13,732	13,086	1,616
K_2 [día ⁻¹] ²² Churchill	Churchill	7,830	6,913	6,774	7,809	8,674	8,700	8,655	8,654	8,830	9,119	9,122	8,978	9,134	9,003	8,809	8,727	8,483	0,750
K_2 [día ⁻¹] ²³ O'Connor y Dobbins	O'Connor y Dobbins	6,476	5,605	5,470	6,449	7,427	7,519	7,550	7,652	7,872	8,169	8,242	8,080	8,472	8,120	8,139	7,920	7,448	0,939
K_2 [día ⁻¹] ²⁴ Isaacs	Isaacs	6,823	6,173	6,074	6,810	7,359	7,353	7,297	7,261	7,366	7,560	7,539	7,446	7,477	7,459	7,257	7,246	7,156	0,457
K_2 [día ⁻¹] ²⁵ Tennessee Valley	Tennessee Valley	18,066	16,000	15,686	18,019	19,930	19,970	19,853	19,827	20,210	20,856	20,847	20,527	20,824	20,582	20,098	19,947	19,453	1,640
K_2 [día ⁻¹] ²⁶ Owens	Owens	9,713	8,166	7,933	9,665	11,426	11,584	11,629	11,801	12,203	12,757	12,882	12,581	13,275	12,653	12,649	12,264	11,449	1,674

¹⁹ Valores de K_1 a 20 °C. Válida para aguas urbanas sin tratar. **CURSO sobre evaluaciones de impacto ambiental**. 2ª ed. Dirección General del Medio Ambiente: Madrid, 1984. pp. 309.

²⁰ Valores de K_1 a 20 °C. HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 149.

²¹ $K_2 = 6,5 \cdot V \cdot H^{-2}$, donde V es la velocidad media del río y H es la profundidad media del río, desarrollada por Streeter y Phelps. JOLÁNKAI, Géza. **Hydrological, chemical and biological process of contamination, transformation and transport in river and lake system**. UNESCO: Paris, 1992. pp. 22.

²² $K_2 = 5,026 \cdot V^{0,969} \cdot H^{-1,673}$, donde V es la velocidad media del río y H es la profundidad media del río, desarrollada por Churchill et al. *Ibidem*. pp. 22.

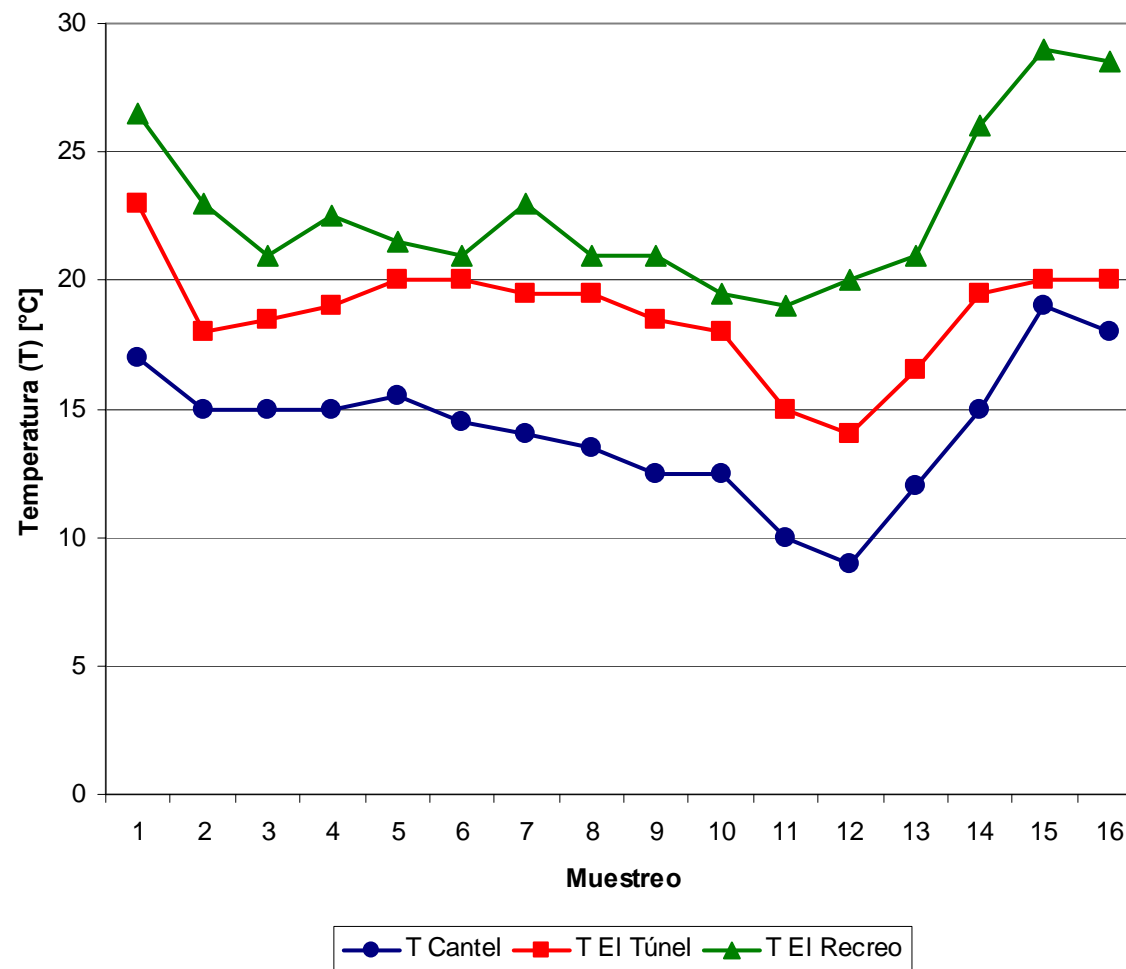
²³ $K_2 = 3,932 \cdot V^{0,5} \cdot H^{-1,5}$, donde V es la velocidad media del río y H es la profundidad media del río, desarrollada por O'Connor y Dobbins. HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 141.

²⁴ $K_2 = 4,753 \cdot V \cdot H^{-1,5}$, donde V es la velocidad media del río y H es la profundidad media del río, desarrollada por Isaacs. *Ibidem*. pp. 141.

²⁵ $K_2 = 11,71 \cdot V \cdot H^{-1,67}$, donde V es la velocidad media del río y H es la profundidad media del río, desarrollada para Tennessee Valley. Válida para profundidades de 0,6 a 3,4 m y velocidades medias del río entre 0,5 y 1,5 m/s. *Ibidem*. 141.

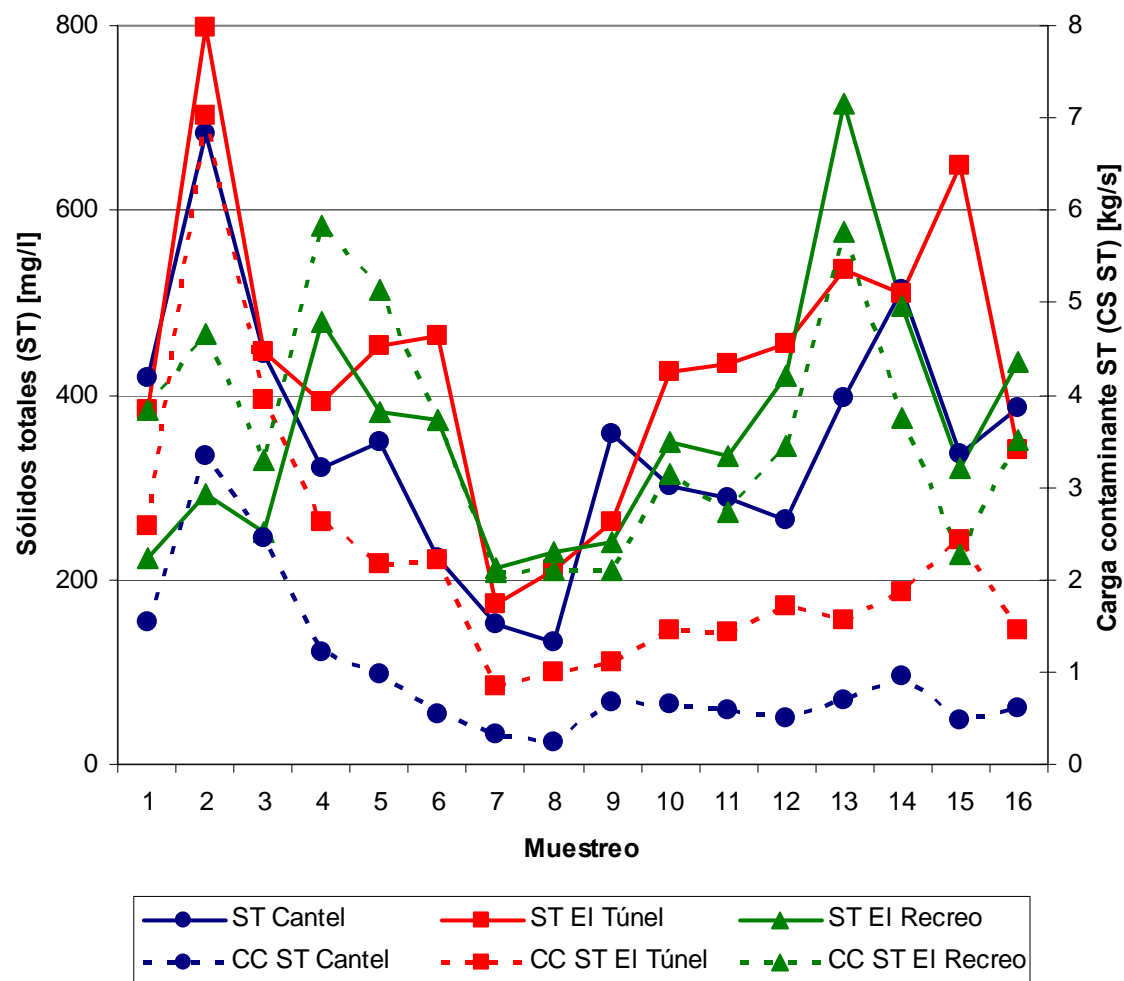
²⁶ $K_2 = 5,327 \cdot V^{0,67} \cdot H^{-1,85}$, donde V es la velocidad media del río y H es la profundidad media del río, desarrollada por Owens. Válida para velocidad media entre 0,3 y 1,5 m/s y profundidad entre 0,12 y 3,5 m. *Ibidem*. pp. 141.

Figura 9. Temperatura del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



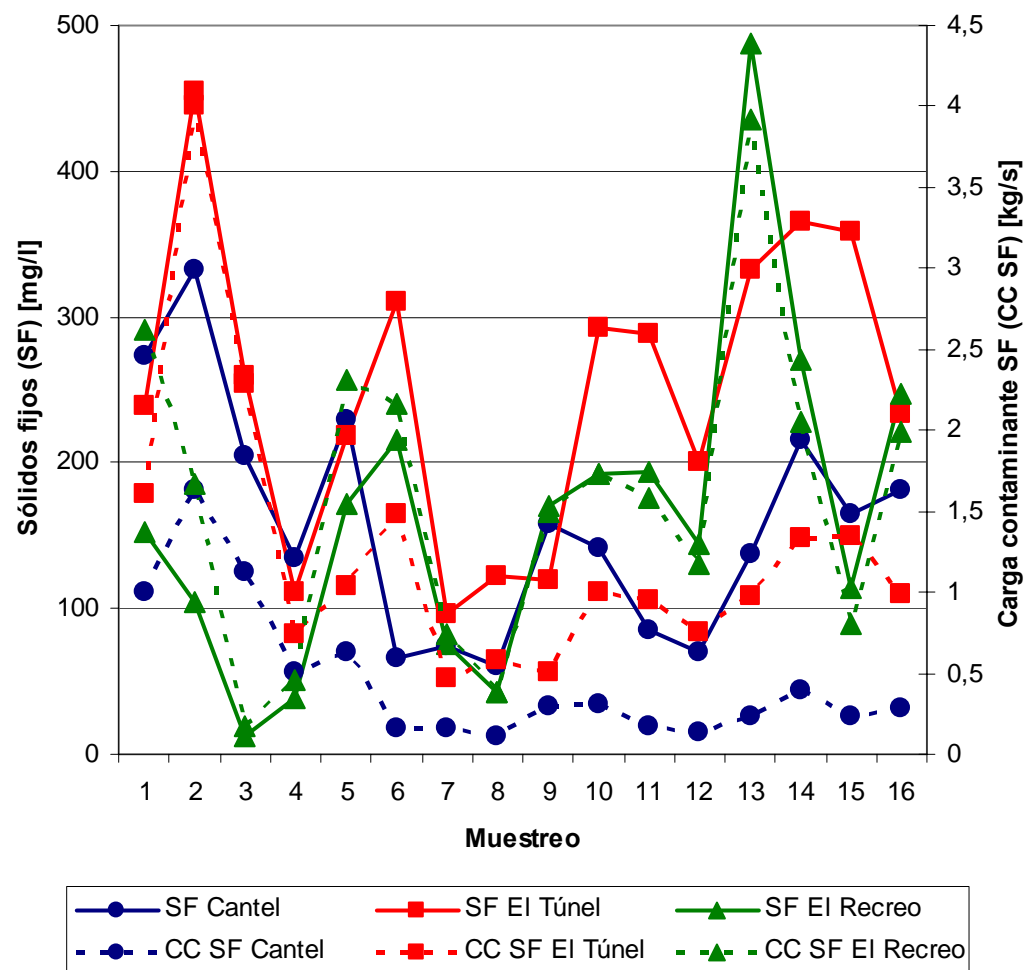
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 10. Sólidos totales, en concentración y carga contaminante, del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



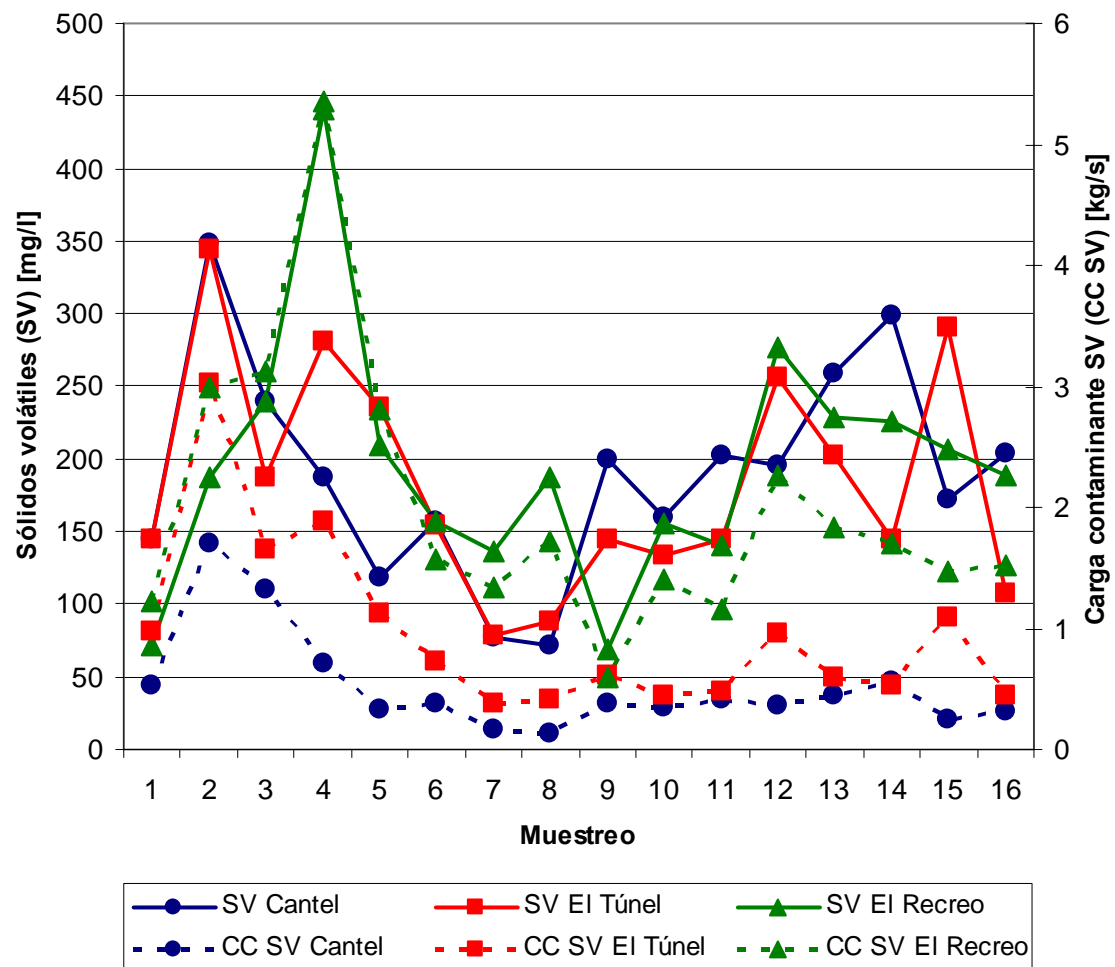
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar. Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 11. Sólidos fijos, en concentración y carga contaminante, del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



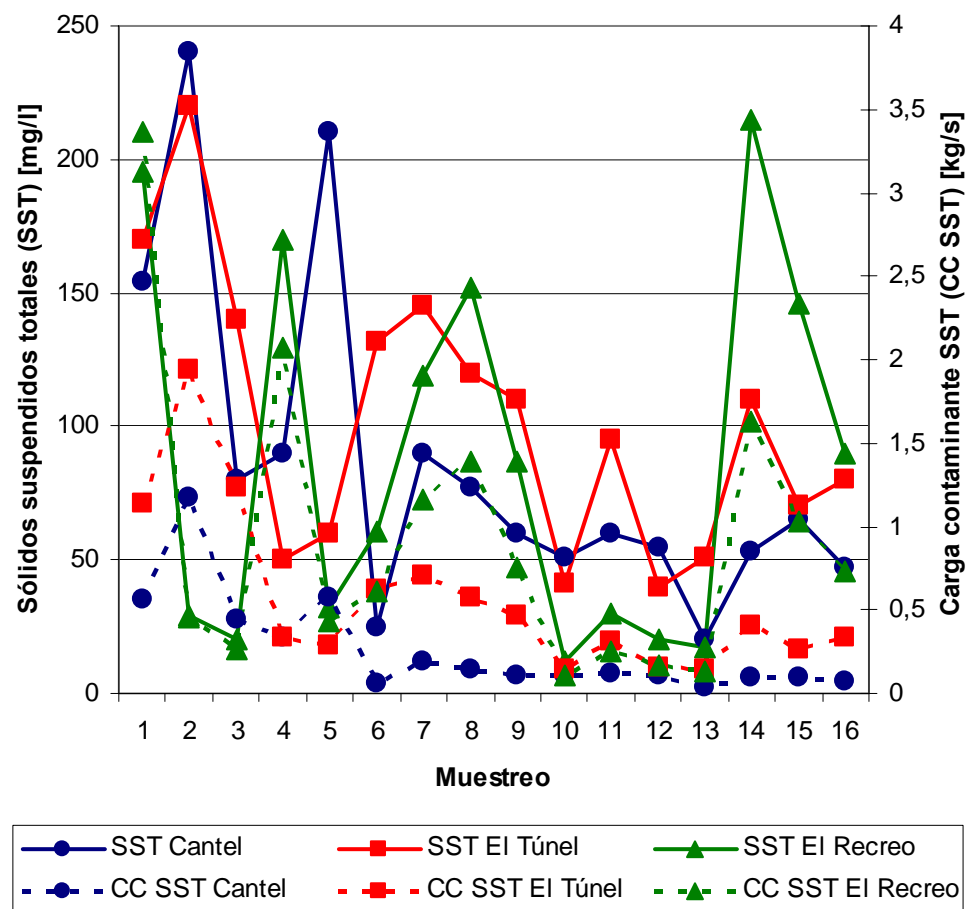
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar. Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 12. Sólidos volátiles, en concentración y carga contaminante, del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



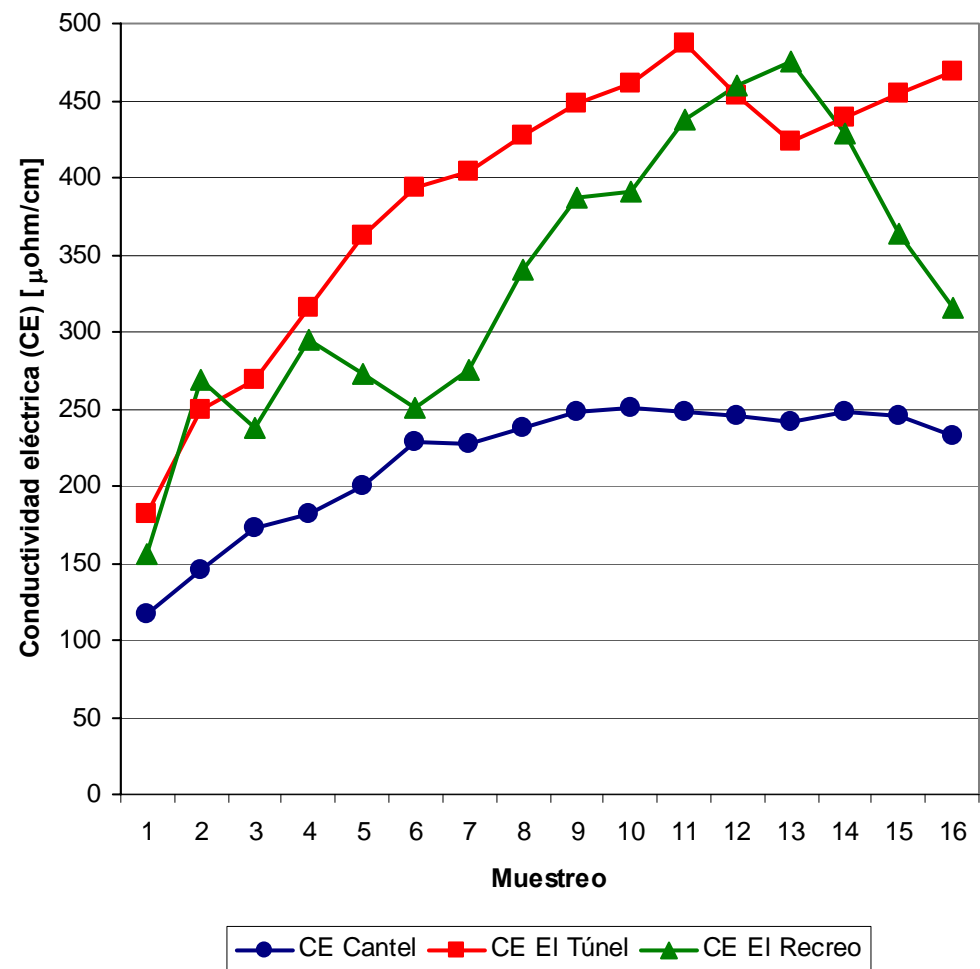
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar. Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 13. Sólidos suspendidos totales, en concentración y carga contaminante, del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



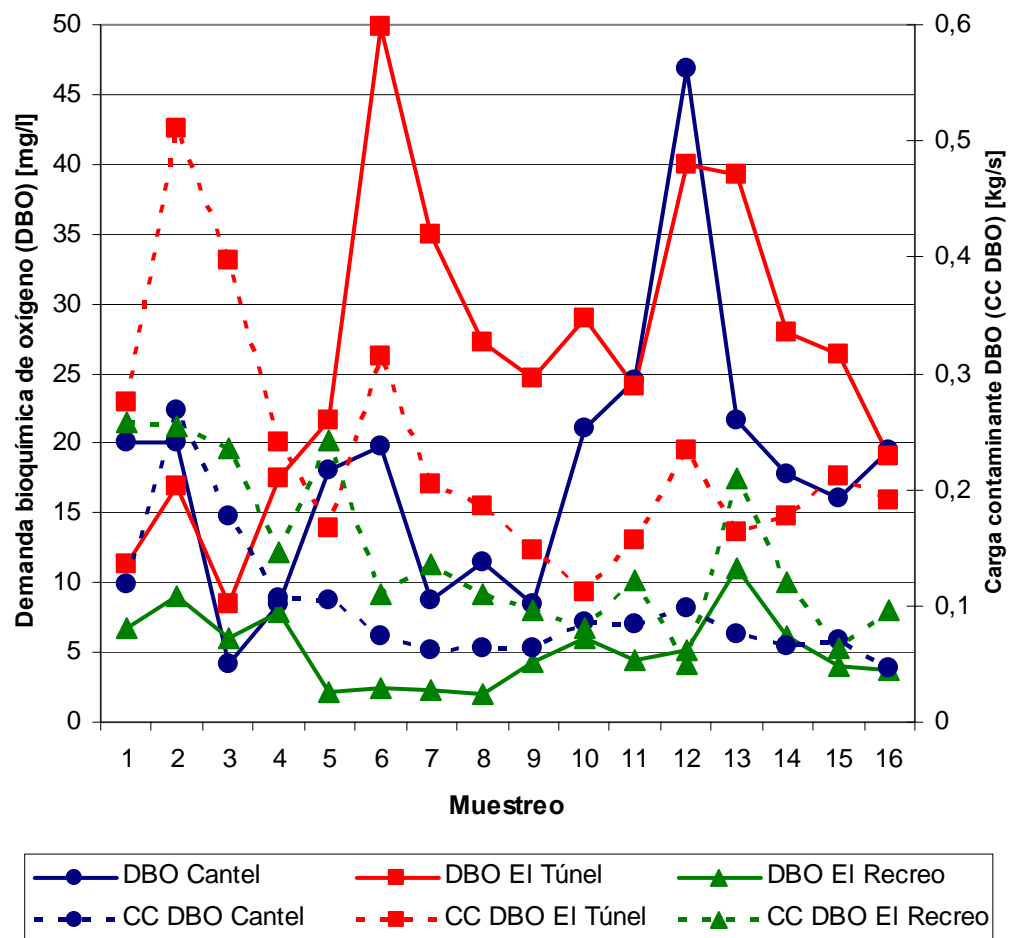
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar. Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 14. Conductividad eléctrica del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



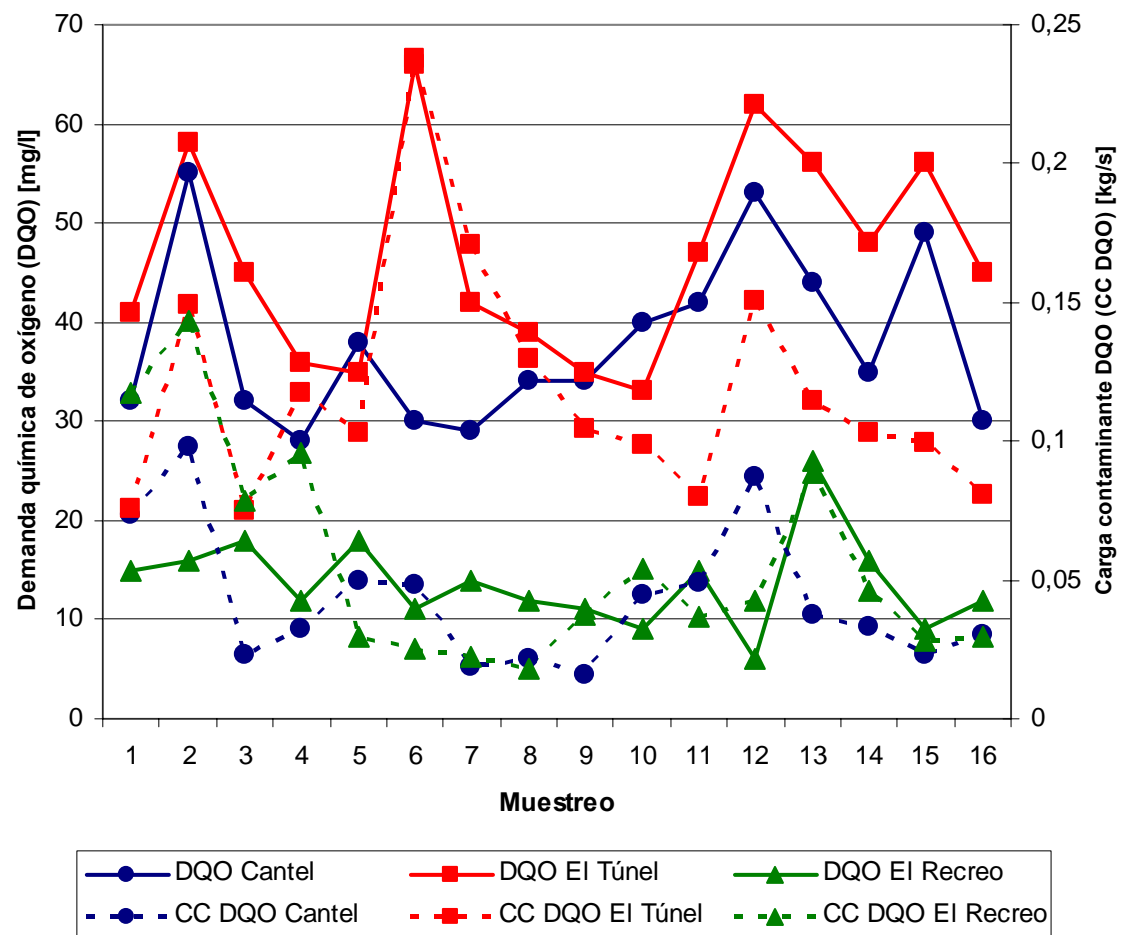
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 15. Demanda bioquímica de oxígeno, en concentración y carga contaminante, del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



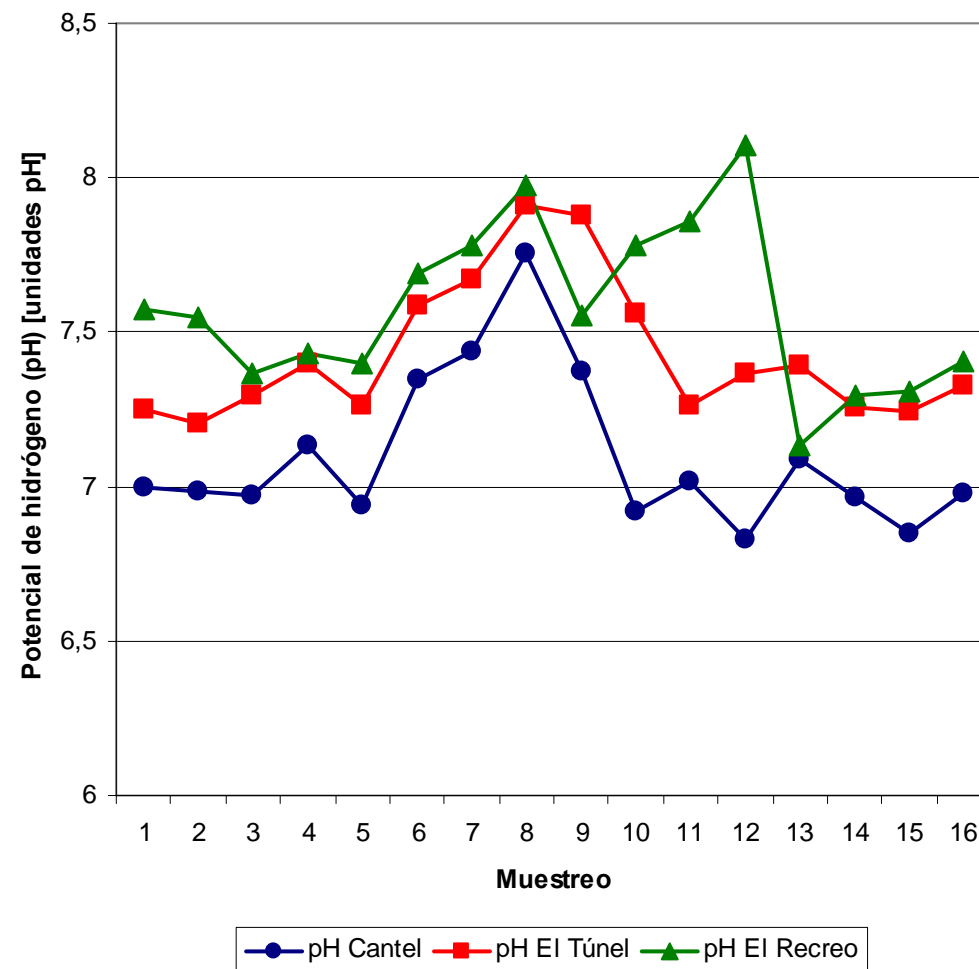
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar. Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 16. Demanda química de oxígeno, en concentración y carga contaminante, del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



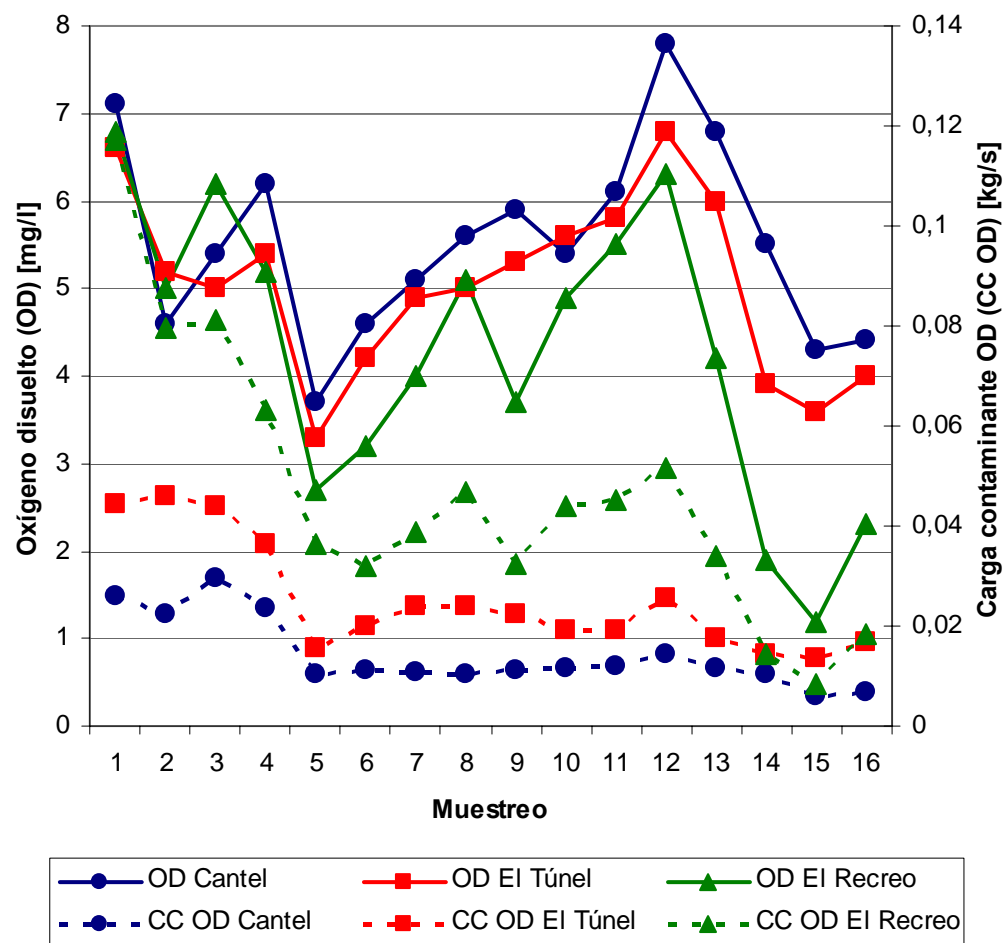
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar. Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 17. Potencial de hidrógeno del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



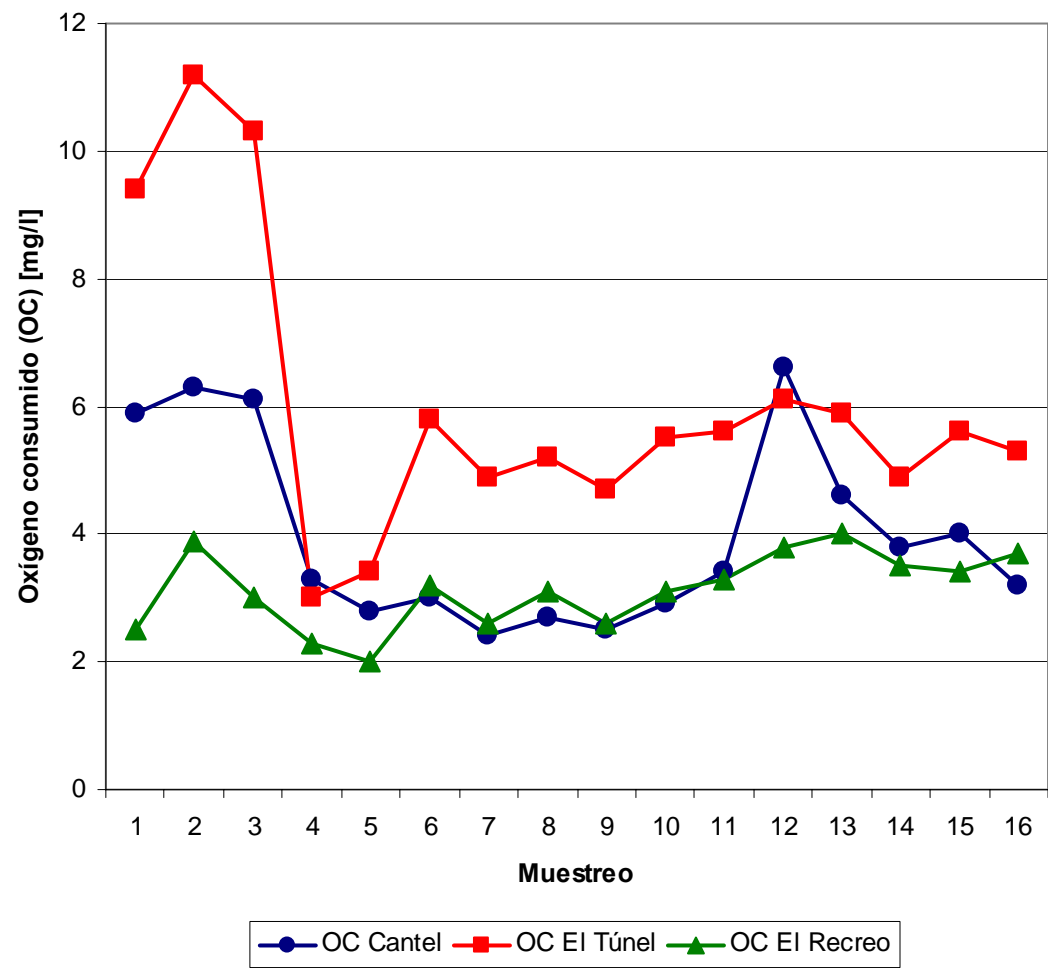
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 18. Oxígeno disuelto, en concentración y carga contaminante, del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



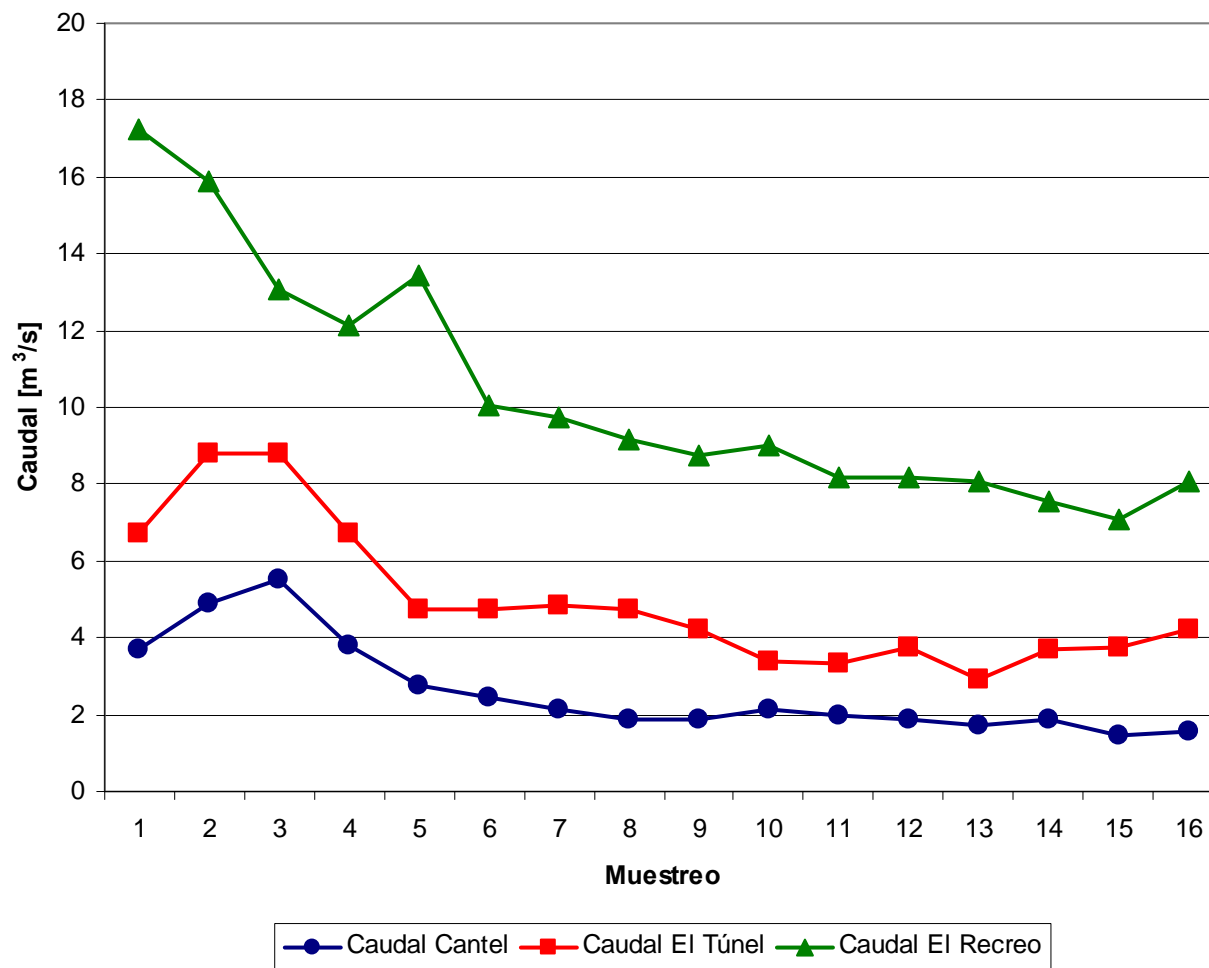
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar. Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 19. Oxígeno consumido del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



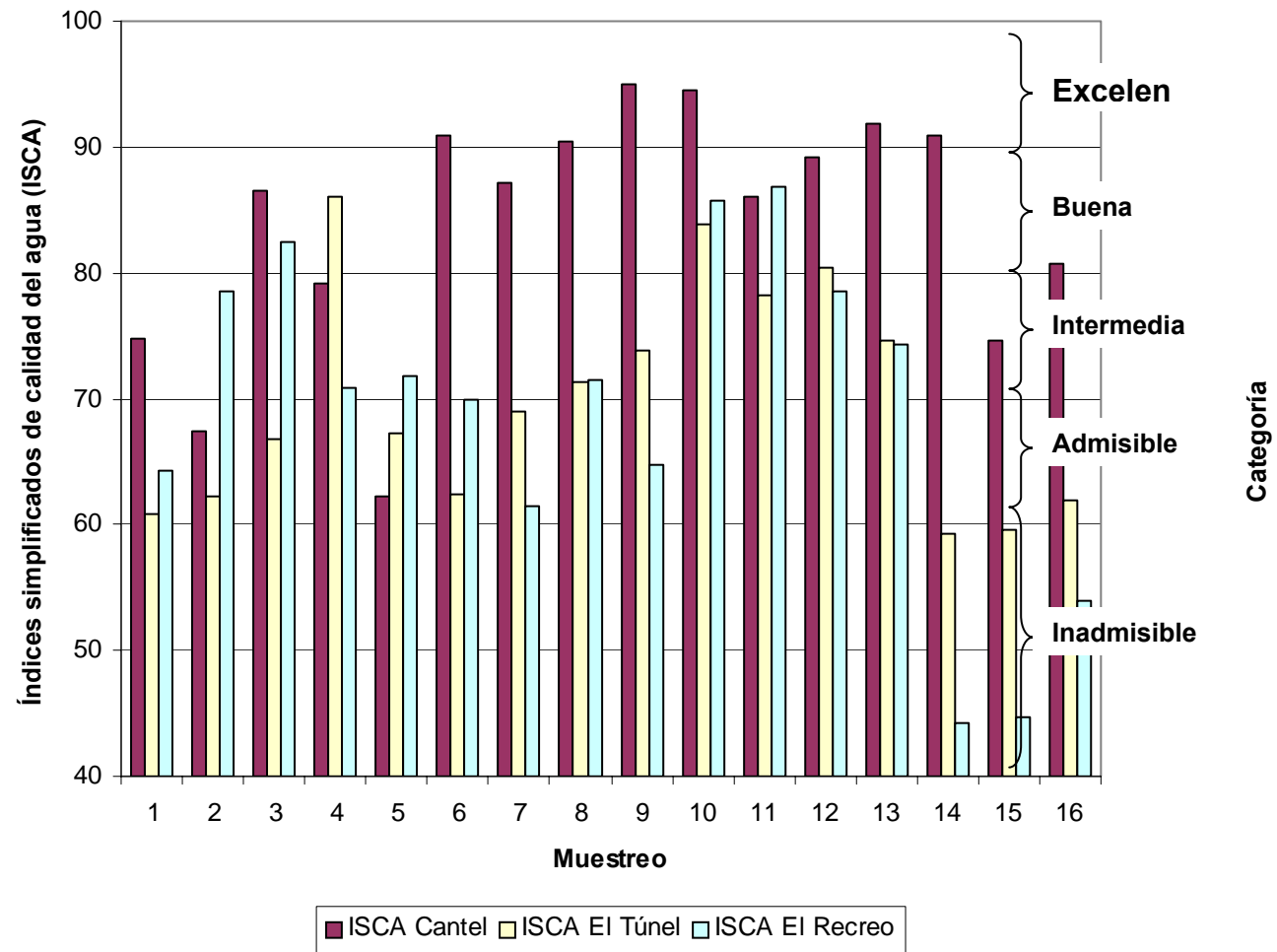
Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 20. Caudales del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



Fuente: Tabla IV. Caudales y cargas contaminantes del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 21. Índices simplificados de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar



Fuente: Tabla V. Índices simplificados de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Temperatura

En la figura 9 de la sección de resultados (pp. 31) puede observarse que las mayores temperaturas medidas en el río Samalá corresponden al punto de muestreo ubicado en la finca El Recreo, las temperaturas intermedias al punto de muestreo en la estación hidrológica El Túnel y las menores al punto en la estación hidrológica Cantel.

Al respecto, la tendencia mencionada está justificada en la diferencia de altura de cada uno de los puntos mencionados, es decir, a mayor altura, en la estación hidrológica Cantel, menor temperatura; a altura intermedia, en la estación hidrológica El Túnel, temperatura intermedia; y, a menor altura, en la finca El Recreo, mayor temperatura. Los resultados respectivos se presentan en la tabla III de la sección de resultados (pp. 24).

Además, es importante hacer notar que la temperatura más alta (29 °C) fue determinada en el punto de muestreo de la finca El Recreo, el 5 de abril de 2005 (muestreo 15); y la temperatura más baja (9 °C) en el punto de muestreo de la estación hidrológica Cantel, el 4 de enero de 2005 (muestreo 12).

4.2 Sólidos totales

En la figura 10 (pp. 32), con relación a la concentración de sólidos totales, puede observarse la tendencia de mayores valores en la estación hidrológica El Túnel, valores intermedios en la finca El Recreo y los valores menores en la estación hidrológica Cantel.

El valor más alto de sólidos totales (798 mg/l) fue determinado el 12 de octubre de 2004 (muestreo 2) en la estación hidrológica El Túnel y el más bajo (132 mg/l) fue medido el 23 de noviembre de 2004 (muestreo 8) en la estación hidrológica Cantel.

En cuanto a la carga contaminante de sólidos totales, la tendencia de mayor carga contaminante corresponde a los resultados del punto de muestreo de la finca El Recreo, la tendencia de carga contaminante intermedia corresponde a la estación hidrológica El Túnel y la tendencia de menor carga contaminante es de la estación hidrológica Cantel.

En general, los valores más altos para la estación hidrológica El Túnel y la finca El Recreo, comparados con los valores de la estación hidrológica Cantel, se justifican porque recibe, antes de los puntos de muestreo mencionados, entre aportes, las descargas de las aguas residuales de las poblaciones de Almolonga y Zunil, Quetzaltenango. Los agricultores extraen agua del río Samalá, específicamente, en la estación hidrológica El Túnel se localizan sembradíos de hortalizas.

Además, se puede observar en dicha figura que, para todos los puntos de muestreo, el comportamiento de la carga contaminante es de valores más altos hasta que alcanzan el menor valor determinado, para la estación hidrológica Cantel en el muestreo 6 y para la estación hidrológica El Túnel y la finca El Recreo en el muestreo 7. A partir de tales muestreos se tiene un comportamiento más estable, pero con tendencia a aumentar.

Es importante observar, en la figura 20 (pp. 42), que para todos los puntos de muestreo los caudales disminuyen paulatinamente a medida que transcurre el tiempo; el comportamiento mencionado para los caudales no es consistente con el comportamiento de la carga contaminante de sólidos totales. De lo anterior puede deducirse que las descargas de aguas residuales vertidas al río Samalá son las que provocan el aumento en la carga contaminante.

En el caso específico de la finca El Recreo se observa que la tendencia de la concentración de sólidos totales es semejante a aquella presentada por su carga contaminante. Dicha tendencia no la presentan los otros resultados.

4.3 Sólidos fijos

Respecto a la concentración de sólidos fijos, en la figura 9 (pp. 31), puede notarse la tendencia de mayores valores en la estación hidrológica El Túnel, de valores intermedios en la estación hidrológica Cantel, así como la tendencia de valores menores en la finca El Recreo. Además, es necesario enfatizar en que la tendencia de valores más altos en la estación hidrológica El Túnel es semejante a la observada en las determinaciones de sólidos totales.

El valor más alto de sólidos fijos (487 mg/l) fue determinado el 1 de febrero de 2005 (muestreo 13) en la finca El Recreo y el más bajo (13 mg/l) fue medido el 19 de octubre de 2004 (muestreo 3), también en dicha finca.

Los resultados de la carga contaminante de sólidos fijos en el río Samalá, en tramo Cantel – El Túnel – El Recreo se presentan también en la figura 11 y en la tabla IV (pp. 25). La tendencia de mayor carga contaminante la presenta la finca El Recreo, en tanto que las tendencias intermedia y menor la presentan las estaciones hidrológicas El Túnel y Cantel, respectivamente. Las tendencias mencionadas coinciden con las presentadas para la carga contaminante de sólidos totales discutida en la sección 4.2. También, se puede observar que el comportamiento de la carga contaminante es variable, por las descargas que se efectúan al río Samalá.

Finalmente, se observa que las tendencias de los resultados para los sólidos fijos, tanto de concentración como de carga contaminante, para los 3 puntos de muestreo es semejante; es decir, cuando aumenta la concentración aumenta la carga contaminante y viceversa.

4.4 Sólidos volátiles

En la figura 12 (pp. 34) se presenta que los mayores valores para la concentración de sólidos volátiles corresponden a la estación hidrológica Cantel, los valores intermedios a la finca El Recreo y los valores menores a la estación hidrológica El Túnel. También, es importante mencionar que la tendencia de valores intermedios en la finca El Recreo es similar a la registrada en la concentración de sólidos totales.

El valor más alto de sólidos volátiles (441 mg/l) fue determinado el 26 de octubre de 2004 (muestreo 4) en la finca El Recreo y el más bajo (69 mg/l) fue medido el 30 de noviembre de 2004 (muestreo 9) en la finca mencionada.

La carga contaminante de sólidos volátiles del río Samalá se puede observar en la figura 12, también. La tendencia de mayor carga contaminante la presenta la finca El Recreo, en tanto que la tendencia intermedia la estación hidrológica El Túnel y la tendencia menor la estación hidrológica Cantel. Dichas tendencias concuerdan con las encontradas para las cargas contaminantes de sólidos totales y fijos.

4.5 Sólidos suspendidos totales

Como puede observarse en la figura 13 (pp. 35), los mayores valores para la concentración de sólidos suspendidos totales corresponden a la estación hidrológica El Túnel; los valores intermedios, a la finca El Recreo; y, los valores menores a la estación hidrológica Cantel. Es importante destacar que las tendencias mencionadas para los sólidos suspendidos totales son las mismas que las observadas en las determinaciones de sólidos fijos.

El valor más alto de sólidos suspendidos totales (240 mg/l) fue determinado el 12 de octubre de 2004 (muestreo 2) en la estación hidrológica Cantel y el más bajo (12 mg/l) fue medido el 7 de diciembre de 2004 (muestreo 10) en la finca El Recreo.

Además, la tendencia de mayor carga contaminante la presenta la finca El Recreo, en tanto que la tendencia de carga contaminante intermedia la estación hidrológica El Túnel y la tendencia menor la estación hidrológica Cantel. Las anteriores tendencias concuerdan con las encontradas para las cargas contaminantes de sólidos totales, fijos y volátiles.

También, en dicha figura se puede observar que el comportamiento de la carga contaminante es de magnitudes mayores hasta el muestreo 9, a partir del cual se tiene un comportamiento más uniforme.

4.6 Conductividad eléctrica

Con relación a la conductividad eléctrica en la figura 14 (pp. 36) se presenta que la tendencia de mayores valores corresponden a la estación hidrológica El Túnel; la de valores intermedios a la finca El Recreo; así como, la tendencia de valores menores a la estación hidrológica Cantel. Respecto a las tendencias mencionadas es importante notar que son similares a las observadas en los sólidos fijos y suspendidos totales.

El mayor valor de conductividad eléctrica (487,5 $\mu\text{ohm/cm}$) fue medido el 21 de diciembre de 2004 (muestreo 11) en la estación hidrológica El Túnel, en tanto, que el menor valor (116,4 $\mu\text{ohm/cm}$) fue determinado en la estación hidrológica Cantel el 5 de octubre de 2004 (muestreo 1).

4.7 Demanda bioquímica de oxígeno

Con relación a la concentración de demanda bioquímica de oxígeno, de acuerdo con la figura 15 (pp. 37), puede comentarse que los mayores valores determinados son de la estación hidrológica El Túnel; los valores intermedios son de la estación hidrológica Cantel; y, los valores menores son de la finca El Recreo. El valor más alto (49,9 mg/l) fue medido el 9 de noviembre de 2004 en la estación hidrológica El Túnel (muestreo 6) y el más bajo (2 mg/l) fue medido, en la finca El Recreo, el 23 de noviembre de 2004 (muestreo 8).

También, en dicha figura se representan los resultados de la carga contaminante de DBO; al respecto, se tiene que los mayores valores los presenta la estación hidrológica El Túnel, los valores menores la estación hidrológica Cantel y los valores intermedios la finca El Recreo. Los resultados son fluctuantes debido a que el río Samalá recibe descargas de aguas residuales como las domésticas de las poblaciones de Almolonga y Zunil, del departamento de Quetzaltenango, así como aguas contaminadas por biocidas.

4.8 Demanda química de oxígeno

Al examinar la figura 16 (pp. 38) y compararla con la figura 15 (pp. 37) se puede comprobar que los valores de la concentración de la demanda química de oxígeno son mayores que aquéllos correspondientes a la demanda bioquímica de oxígeno. Lo anterior debido a que es mayor la cantidad de la materia orgánica que se oxida químicamente que aquélla que se oxida biológicamente.

Al respecto, la tendencia presentada por la DQO es similar a la de la DBO, porque los mayores valores corresponden a la estación hidrológica El Túnel; los intermedios a la estación hidrológica Cantel y los menores a la finca El Recreo. El valor más alto (66 mg/l) fue medido el 9 de noviembre de 2004 (muestreo 6) en la estación hidrológica El Túnel y el más bajo (6 mg/l) fue determinado el 4 de enero de 2005 (muestreo 12) en la finca El Recreo.

Por otro lado, se tiene que la carga contaminante de DQO se comporta de forma similar a la carga contaminante de la DBO, es decir, los mayores valores los presenta la estación hidrológica El Túnel, los valores menores la estación hidrológica Cantel y los valores intermedios la finca El Recreo; sin embargo, el comportamiento es más uniforme a partir del décimo muestreo.

4.9 Potencial de hidrógeno

En la figura 17 (pp. 39) se nota que los resultados de las determinaciones de potencial de hidrógeno, pH, son mayores en el punto de muestreo de la finca El Recreo, intermedios en la estación hidrológica El Túnel y menores en la estación hidrológica Cantel. Las tendencias citadas son idénticas a las observadas en las mediciones de temperatura mencionadas.

Tanto el mayor valor del potencial del hidrógeno (8,105 unidades de pH) como el menor valor (6,832 unidades de pH) fueron medidos, durante el muestreo 12, el 4 de enero de 2005 en la finca El Recreo y la estación hidrológica Cantel, respectivamente.

4.10 Oxígeno disuelto

En la figura 18 (pp. 40) puede percibirse que las concentraciones mayores de oxígeno disuelto corresponden a la estación hidrológica Cantel, las intermedias a la estación hidrológica El Túnel y las menores a la finca El Recreo. La tendencias mencionadas del oxígeno disuelto están justificadas en la relación entre la solubilidad del oxígeno en el agua con su temperatura, que es inversamente proporcional, es decir, a menor temperatura mayor cantidad de oxígeno disuelto y viceversa.

El valor más alto (7,8 mg/l) fue medido en la estación hidrológica Cantel el 4 de enero de 2005 (muestreo 12), fecha en que se midió la menor temperatura, y el más bajo (1,2 mg/l) fue medido en la finca El Recreo el 5 de abril de 2005 (muestreo 15), fecha en que se determinó la mayor temperatura.

De acuerdo con la figura 18 (pp. 40), la finca El Recreo presenta las mayores cargas contaminantes de oxígeno disuelto, la estación hidrológica El Túnel las cargas intermedias y la estación hidrológica Cantel las cargas menores. Las tendencias mencionadas concuerdan con las observadas para las cargas contaminantes de sólidos totales, fijos, volátiles y suspendidos totales, antes discutidas; así como con las tendencias del caudal del río Samalá presentadas en la figura 20 (pp. 42).

Finalmente, para las estaciones hidrológica Cantel y El Túnel los valores se comportan más estables a partir del muestreo 5.

4.11 Oxígeno consumido

En cuanto a la concentración del oxígeno consumido se presentan valores mayores en la estación hidrológica El Túnel, valores intermedios en la estación hidrológica Cantel y valores menores en la finca El Recreo. Dichos valores se muestran en la figura 19 (pp. 41). El valor más alto de oxígeno consumido u oxidabilidad (11,2 mg/l) fue medido el 12 de octubre de 2004 (muestreo 2) en la estación hidrológica El Túnel y el más bajo (2 mg/l) fue medido el 2 de noviembre de 2004 (muestreo 5) en la finca El Recreo.

4.12 Caudales

En cuanto a los caudales del río Samalá determinados en cada uno de los puntos de muestreo, de acuerdo con la figura 20 (pp. 42), presentan la tendencia de mayores caudales en la finca El Recreo, caudales intermedios en la estación hidrológica El Túnel y caudales menores en la estación hidrológica Cantel.

El caudal mayor (17,231 m³/s) corresponde al 5 de octubre de 2004 (muestreo 1) en la finca El Recreo, en tanto que el caudal menor (1,436 m³/s) es del 5 de abril de 2005 (muestreo 12) en la estación hidrológica Cantel.

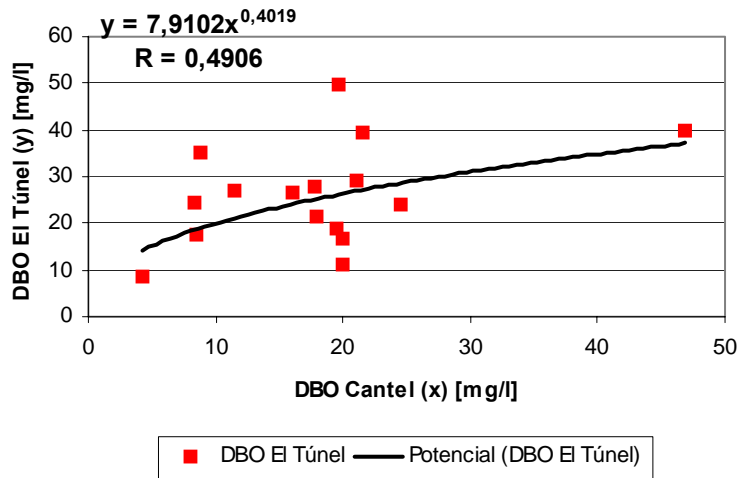
4.13 Relación de variables

Con el propósito de encontrar correlaciones entre las distintas variables consideradas en el estudio especial, se grafican unas variables en función de otras, para los distintos puntos de muestreo considerados; no obstante, los resultados obtenidos para los mejores coeficientes de correlación, son valores entre 0,0361 (para OD contra pH en la estación hidrológica Cantel) hasta 0,9047 (para ST contra SF en la estación hidrológica El Túnel).

Además, se relacionaron las variables específicas para la determinación de los coeficientes cinéticos, es decir, DBO y OD, entre los distintos puntos de muestreo, para determinar los valores más apropiados para realizar los cálculos respectivos.

Respecto a los coeficientes de correlación, R, para las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno lo que se obtuvo es lo siguiente: DBO El Túnel contra DBO Cantel, $R = 0,4906$; DBO El Recreo contra DBO Cantel, $R = 0,1575$; DBO El Recreo contra DBO El Túnel, $R = 0,3022$. De los resultados mencionados el mayor coeficiente de correlación se obtiene al relacionar las concentraciones de la DBO en la estación hidrológica El Túnel en función de las concentraciones de la DBO en la estación hidrológica Cantel; en la figura 22 (pp. 56) se presenta el anterior resultado.

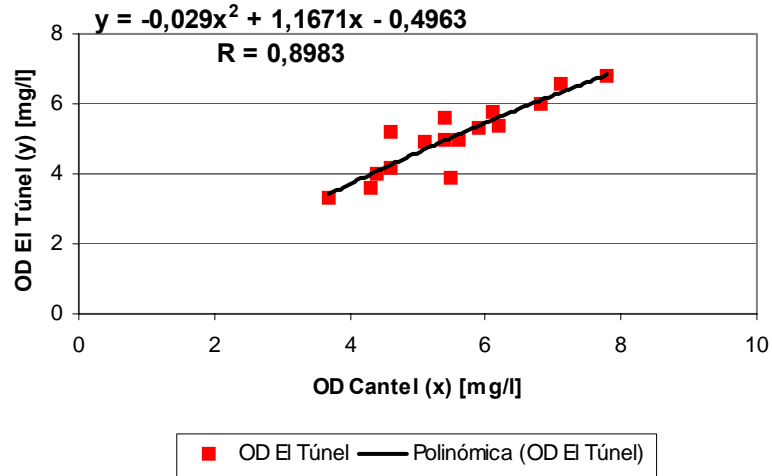
Figura 22. Demanda bioquímica de oxígeno en la estación hidrológica El Túnel contra demanda bioquímica de oxígeno en la estación hidrológica Cantel



Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

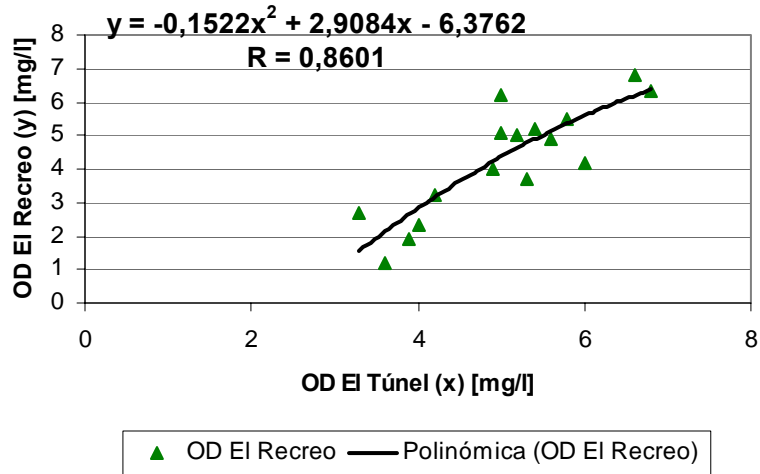
Al respecto el resultado en las concentraciones de oxígeno disuelto es: OD El Túnel contra OD Cantel, $R = 0,8983$; OD El Recreo contra OD Cantel, $R = 0,6864$; OD El Recreo contra OD El Túnel, $R = 0,8601$. De los resultados citados el mayor coeficiente de correlación corresponde a la relación entre las concentraciones de OD en la estación hidrológica El Túnel en función de la concentraciones de OD en la estación hidrológica Cantel. En las figuras 23 y 24 (pp. 57), se presentan las relaciones de variables con los mayores coeficientes determinados.

Figura 23. Oxígeno disuelto en la estación hidrológica El Túnel contra oxígeno disuelto en la estación hidrológica Cantel



Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

Figura 24. Oxígeno disuelto en la finca El Recreo contra oxígeno disuelto en la estación hidrológica El Túnel



Fuente: Tabla III. Parámetros de calidad del agua del río Samalá, tramo Cantel – Zunil – El Palmar.

De lo discutido se tiene que los resultados que mejor se relacionan entre sí, especialmente respecto a las concentraciones de DBO y de OD, son los correspondientes a la estaciones hidrológicas Cantel y El Túnel.

4.14 Índices simplificados de calidad del agua

El índice simplificado de calidad del agua, ISCA, se seleccionó por ser un indicador global, sencillo y aproximado. Entre sus ventajas se tienen las siguientes:

- a. fácil determinación pues intervienen pocos parámetros;
- b. cálculo sencillo;
- c. simplicidad que permite replicarlo en el tiempo; y,
- d. bajo costo por los parámetros que se miden.

Sin embargo, presenta algunas desventajas como:

- a. no contempla nutrientes;
- b. no contempla tóxicos; y
- c. el aumento natural del contenido de sólidos empeora los valores notablemente.

Los índices simplificados de calidad del agua de los distintos puntos de muestreo del río Samalá en que se realiza el presente estudio especial, se calculan con los parámetros siguientes: temperatura, oxígeno consumido, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica. Al respecto, los rangos y las categorías para interpretación de resultados, se presentan en la tabla I (pp. 10), siendo los siguientes: entre 90 y 100, categoría: excelente; entre 80 y 90: buena; entre 70 y 80: intermedia; entre 60 y 70: admisible; entre 0 y 60: inadmisibile.

En la figura 21 (pp. 43) se presenta el consolidado de los índices de calidad de agua calculados de los muestreos respectivos. Dichos índices se encuentran en la tabla V (pp. 26), en la sección de resultados.

Como puede observarse en la figura 21, en la estación hidrológica Cantel se tiene calidad del agua excelente para seis distintas fechas de toma de muestras: 9, 23 y 30 de noviembre, así como 7 de diciembre de 2004; 1 de febrero y 1 de marzo de 2005. Además, se tiene buena calidad de agua para las cuatro fechas siguientes: 19 de octubre y 21 de diciembre de 2004, 4 de enero y 3 de mayo de 2005. También, calidad de agua intermedia para el 5 y 26 de octubre de 2004 y 5 de abril de 2005. Asimismo, calidad de agua admisible para las siguientes fechas: 12 de octubre, 2 y 16 de noviembre de 2004.

Al promediar los dieciséis índices simplificados de calidad del agua correspondientes a la estación hidrológica Cantel se tiene un valor de **83,829**, lo que se significa que la calidad del agua del río Samalá, en el lugar y las fechas antes descritas, en promedio es **buena**.

Para la estación hidrológica El Túnel se determina buena calidad del agua para los muestreos correspondientes a: 26 de octubre y 7 de diciembre de 2004, y 4 de enero de 2005. Del mismo modo, calidad de agua intermedia para los muestreos realizados: 23 y 30 de noviembre, así como 21 de diciembre de 2004, y 1 de febrero de 2005. Calidad de agua admisible para los siete muestreos realizados en los días: 5, 12 y 19 de octubre; 2, 9 y 16 de noviembre de 2004; así como, 3 de mayo de 2005. Sin embargo, se tiene calidad de agua inadmisibles para los dos muestreos realizados en las fechas: 1 de marzo y 5 de abril de 2005.

Al respecto y de acuerdo con los resultados presentados, al realizar el promedio de tales resultados se tiene un valor de **69,854**, es decir, que la calidad de agua del río Samalá para la estación hidrológica El Túnel, en las fechas descritas, es **admisible**; lo anterior también coincide con la moda estadística, pues se tiene calidad admisible para siete de los dieciséis muestreos realizados en tal lugar.

En el punto de muestreo de la finca El Recreo se tiene una buena calidad de agua para cuatro fechas: 19 de octubre, 7 y 21 de diciembre de 2004, y 4 de enero de 2005. También, se determina calidad de agua intermedia para seis fechas: 12 y 26 de octubre, 2 y 23 de noviembre de 2004; 4 de enero y 1 de febrero de 2005. Calidad de agua admisible para las cuatro muestreos: 5 de octubre, 9, 16 y 23 de noviembre de 2004. No obstante lo mencionado, se calcula calidad de agua inadmisibles para tres muestreos: 1 de marzo, 5 de abril y 3 de mayo de 2005.

Al promediar los índices de calidad del agua del río Samalá, del punto de muestreo de la finca El Recreo en las fechas presentadas, se obtiene un valor de **69,987**; por lo cual, se interpreta que la calidad del agua es **admisible**.

De lo discutido se puede concluir que a medida que el río Samalá avanza en su recorrido se deteriora la calidad de sus aguas; pues la estación hidrológica Cantel es la que presenta mejores índices, la estación hidrológica El Túnel, índices intermedios y la finca El Recreo, los peores índices.

Además, el presente estudio demuestra lo siguiente: a) el cambio de pendiente que se tiene a lo largo del recorrido del río, en el tramo de estudio, no contribuye al mejoramiento de la calidad de sus aguas; y, b) los valores de las concentraciones de los parámetros disminuyen a lo largo del tramo Cantel – Zunil – El Palmar, pero las cargas contaminantes aumentan, como se discutió desde la sección 4.1 hasta la 4.11, y, por lo tanto, lo que sucede en el río Samalá es dilución y no autodepuración.

Finalmente, al calcular el promedio de los índices de calidad del agua de cada punto de muestreo, se obtiene un valor de **74,223**; por lo cual, conforme el análisis estadístico de los índices simplificados de calidad del agua determinados, se concluye que la calidad del agua del río Samalá, en el tramo Cantel – Zunil – El Palmar, es **intermedia**.

4.15 Coeficientes cinéticos

La determinación de los coeficientes cinéticos es ventajosa para desarrollar un modelo de comportamiento de la calidad del agua del río Samalá, en el tramo de estudio; específicamente, en este caso, de la demanda bioquímica de oxígeno y del oxígeno consumido. Los coeficientes cinéticos determinados, con base en los resultados de los muestreos, son el coeficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica y el coeficiente de reaeración. Al respecto, el coeficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica o de la DBO, K_1 , está relacionado con el tipo de materia orgánica presente en el agua, la clase y la cantidad de microorganismos, etc.

Luego del proceso de cálculo, a partir de las concentraciones de DBO determinadas para cada uno de los muestreos realizados y con la corrección por la variación de temperatura correspondiente, se tiene para el tramo de recorrido del río Samalá entre los municipios de Cantel y Zunil, Quetzaltenango, que K_1 es **0,603 día⁻¹** y para el tramo de recorrido entre los municipios de Zunil y El Palmar, Quetzaltenango, K_1 es **1,693 día⁻¹**. Dichos resultados pueden observarse en la sección de resultados en la tabla VI (pp. 26).

Con relación a los valores de K_1 , la literatura presenta los valores calculados por Eckenfelder²⁹: para “Aguas urbanas sin tratar; 0,35-0,64.” Con la corrección por cambio de temperatura se tiene el rango [0,327, 0,600] (tabla XI, pp. 30).

Además, Aurelio Hernández Muñoz³⁰ indica lo siguiente: “a 20 °C, varía desde 0,1 a 0,8 (día⁻¹), siendo un valor nominal $K_1 = 0,25$ día⁻¹.” Luego, de hacer la corrección por el cambio de temperatura se tiene el siguiente rango: [0,0935, 0,748] y el valor nominal de 0,234 día⁻¹ (tabla XI, pp. 30).

Al respecto y de acuerdo a lo antes presentado, se concluye que el valor determinado en el presente estudio para el coeficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica o de la DBO ($K_1 = 0,603$ día⁻¹) para el tramo Cantel – Zunil se encuentra en los rangos expuestos.

²⁹ CURSO sobre evaluaciones de impacto ambiental. 2ª ed. Dirección General del Medio Ambiente: Madrid, 1984. pp. 309.

³⁰ HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. **Depuración de aguas residuales**. 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 149.

El resultado $K_1 = 1,693 \text{ día}^{-1}$, para el tramo Zunil – El Palmar, está fuera de dichos rangos, lo cual es debido a que los resultados de la DBO para dicho tramo tienen un coeficiente de correlación bajo, $R = 0,3022$; de acuerdo con lo discutido en la sección 4.13.

El coeficiente de reaireación, K_2 , se refiere a la velocidad a la cual el oxígeno gaseoso de la atmósfera ingresa al agua. Dicho coeficiente depende de las propiedades hidráulicas de la corriente del río (velocidad, profundidad, turbulencia, etc.) Por ello, y para los efectos del presente estudio, su cálculo se realiza con los resultados de las concentraciones de DBO y OD, para el tramo de recorrido del río Samalá entre los municipios de Cantel y Zunil, Quetzaltenango, que K_2 es $22,753 \text{ día}^{-1}$ y para el tramo de recorrido entre los municipios de Zunil y El Palmar, Quetzaltenango, K_2 es $19,884 \text{ día}^{-1}$. Dicho coeficientes de reaireación pueden observarse en la sección de resultados.

Además, a partir de las fórmulas experimentales desarrolladas por distintos investigadores para los coeficientes de reaireación se obtienen los siguientes resultados: Streeter y Phelps, $K_2 = 13,086 \text{ día}^{-1}$; O'Connor y Dobbins, $K_2 = 7,448 \text{ día}^{-1}$; Isaacs, $K_2 = 7,156 \text{ día}^{-1}$; Tennessee Valley, $K_2 = 19,453 \text{ día}^{-1}$; y, Owens, $K_2 = 11,449 \text{ día}^{-1}$ (tabla XI, pp. 30).

Los resultados calculados para K_2 con la fórmula de Tennessee Valley son similares a los obtenidos experimentalmente.

Finalmente, con base en lo antes discutido, es importante indicar que para efectos prácticos solamente se recomienda utilizar los resultados obtenidos para el tramo Cantel – Zunil.

4.16 Constante de autodepuración “f” de Fair

Los resultados de la constante f determinados experimentalmente, para el tramo Cantel – Zunil, se presentan en la tabla IX (pp. 28), y van desde 23,183 hasta 78,148, siendo el promedio de 42,591 con una desviación estándar de 16,146. Además, al dividir $K_2/K_1 = 22,753/0,603$, se tiene un valor de $f = 37,733$.

Respecto al tramo Zunil – El Palmar, los resultados para la constante de autodepuración “f” de Fair se presentan en la tabla X (pp. 29), y van desde 3,092 hasta 99,567; el promedio es de 20,480 con una desviación estándar de 25,673. Finalmente, al dividir $K_2/K_1 = 19,884/1,693$, se tiene un valor de $f = 11,745$.

De acuerdo con la tabla II (pp. 14), los valores de f mayores a 5 corresponden a rápidos y cascadas. Por lo tanto, de conformidad con los resultados de velocidades y caudales determinados en el río Samalá, en el tramo de estudio, se tienen constantes de autodepuración “f” de Fair correspondientes a rápidos y cascadas, tanto para el tramo Cantel – Zunil como para el tramo Zunil – El Palmar.

CONCLUSIONES

1. Se comprueba la hipótesis planteada en el presente estudio especial, porque se obtuvieron los coeficientes cinéticos del río Samalá y se logró clasificar dicho río en cuanto a su calidad.
2. El comportamiento de las concentraciones y las cargas contaminantes es variable hasta el muestreo 8, a partir de éste es más estable.
3. Las concentraciones de los parámetros determinados disminuyen a lo largo del tramo Cantel – Zunil – El Palmar del río Samalá, pero las cargas contaminantes aumentan, lo cual se debe a los aportes externos que el río recibe en dicho tramo; por lo tanto, lo que existe es dilución no autodepuración.
4. Las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno así como las de oxígeno disuelto determinadas en las muestras de agua de las estaciones hidrológicas Cantel y El Túnel, se correlacionan adecuadamente, con coeficientes entre 0,4906 y 0,8983.
5. El río Samalá tiene categoría intermedia, en el tramo estudiado, de acuerdo al análisis estadístico de los índices simplificados de calidad del agua calculados en el presente estudio.

6. Los coeficientes cinéticos de descomposición bioquímica de materia orgánica y de reaireación del río Samalá determinados experimentalmente y que aplican para todo el año son: a) $K_1 = 0,603 \text{ día}^{-1}$ y $K_2 = 22,753 \text{ día}^{-1}$, para el tramo Cantel – Zunil y b) $K_1 = 1,693 \text{ día}^{-1}$ y $K_2 = 19,884 \text{ día}^{-1}$, para el tramo Zunil – El Palmar; siendo la constante de Fair de 37,733 y 11,745, respectivamente. No obstante, sólo los resultados del tramo Cantel – Zunil son recomendables para su aplicación.

RECOMENDACIONES

1. Concienciar a los tomadores de decisión de las instituciones, que realizan tomas de muestras para determinar calidad del agua, sobre la importancia de divulgar los resultados de sus investigaciones.
2. Promover como Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos la realización de estudios sobre calidad del agua de los ríos de Guatemala, con una metodología semejante a la del presente estudio especial.
3. Desarrollar una investigación sobre el río Samalá tomando en consideración variables tales como: aportes, sustracciones, usos, aprovechamientos, etc.
4. Utilizar los resultados del presente estudio especial como una línea de base para futuras investigaciones sobre calidad del agua en el río Samalá.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos de revistas

1. OROZCO, Elfego. "Análisis de crecidas en la cuenca del río Samalá, a la altura del puente en la CA2". **Revista Agua, saneamiento & ambiente**. (Guatemala) (2/1): pp. 19-27.

Enciclopedias

2. CRITES, Ron y George Tchobanoglous. **Sistemas de manejo de Aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados**. Tr. Miller Camargo y otros. (T. 1) Bogota: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 2000. pp. 33-49, 58-69.
3. **DICCIONARIO Geográfico Nacional de Guatemala**. 2ª ed. (T. 3) Guatemala: Tipografía Nacional de Guatemala, 1983. pp. 177, 178.

Folletos

4. **CALIDAD del agua en el río Dulce y lago de Izabal**. Guatemala: Dirección General de Investigación y Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. pp. 3-6.
5. **EL futuro del agua en el río Motagua**. Guatemala: Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. pp. 2, 6-7.
6. **RÍOS de Guatemala**. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2004. pp. 3-6.

Informes técnicos

7. **BOLETÍN # 5. Calidad del agua de los ríos de la República de Guatemala.** Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2002. pp. 21, 23, 27, 28,31, 54.
8. **BOLETÍN # 6. Calidad del agua de los ríos de la República de Guatemala.** Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2003. pp. 21, 23, 25, 27, 28,31, 54, 61.
9. **BOLETÍN hidrológico No. 18. Información 1996-2001.** Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2002. pp. 35-38.
10. **INFORME hidrológico y deposito sedimentario del río Samalá.** Guatemala: Dirección General de Caminos, 2001. pp. 1-10.
11. **RECURSOS hídricos superficiales disponibles en la República de Guatemala.** Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2001. pp. 5, 11-13.
12. **ZONIFICACIÓN de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián, Retalhuleu, Guatemala, Centro América.** Guatemala: Programa de Acción Regional para Centro América, 2003. pp. 1-11, 19-29.

Libros

13. **CURSO sobre evaluaciones de impacto ambiental.** 2ª ed. Dirección General del Medio Ambiente: Madrid, 1984. pp. 305-311.
14. **HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. Depuración de aguas residuales.** 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, 1998. pp. 99-171, 197.

15. JOLÁNKAI, Géza. **Basic river water quality models**. UNESCO: Paris, 1997. pp. 3-25.
16. JOLÁNKAI, Géza. **Hydrological, chemical and biological process of contamination, transformation and transport in river and lake system**. UNESCO: Paris, 1992. pp. 20-25.
17. MATA, Alfonso y Franklin Quevedo. **Diccionario didáctico de ecología**. Editorial de la Universidad de Costa Rica: San José, 1998. pp. 7, 24, 30, 35, 45, 119, 157, 215, 290.
18. **METCALF & EDDY. Tratamiento y depuración de las aguas residuales**. 2ª ed. Tr. Juan de Dios Trillo Montsoriu y Luis Virto Albert. Ed. Labor, S.A.: Barcelona, 1981. pp. 711-726.
19. **MÉTODOS normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 1992. pp. 1-1 a 1-47, 2-67 a 2-71, 2-78 a 2-80, 2-88 a 2-89, 4-106 a 4-115, 4-168, 5-2 a 5-21, 6-12 a 6-13.
20. SARAVIA Celis, Pedro. **Contaminación del agua**. Guatemala: ERIS, 2004. pp. 24-28, 31-32.
21. **STANDARD methods for the examination of water & wastewater**. 18ª ed. Maryland: Victor Graphics, Inc., 1992. pp. 1-21.
22. THEROUX, Frank R., Edward F. Eldridge y W. LeRoy Mallmann. **Laboratory manual for chemical and bacterial analysis of water and sewage**. 3ra. ed. E.E.U.U.: McGraw-Hill Book Company, 1943. pp. 60, 61, 173, 174.

Normas

23. Norma COGUANOR NGO 4 010. Sistema internacional de unidades (SI). Guatemala: diciembre de 1986.

Tesis

24. ACAJABÓN Mendoza, Arturo David. Estudio hidrológico básico de la cuenca del río Samalá. Tesis de ingeniería civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1973.
25. TEMPLETON, Sharon. *Hydrothermal systems at Volcan Santa Maria, Guatemala*. Tesis de maestría de ciencias. *Northern Illinois University, Department of Geology and Environmental Geosciences*, 1999.

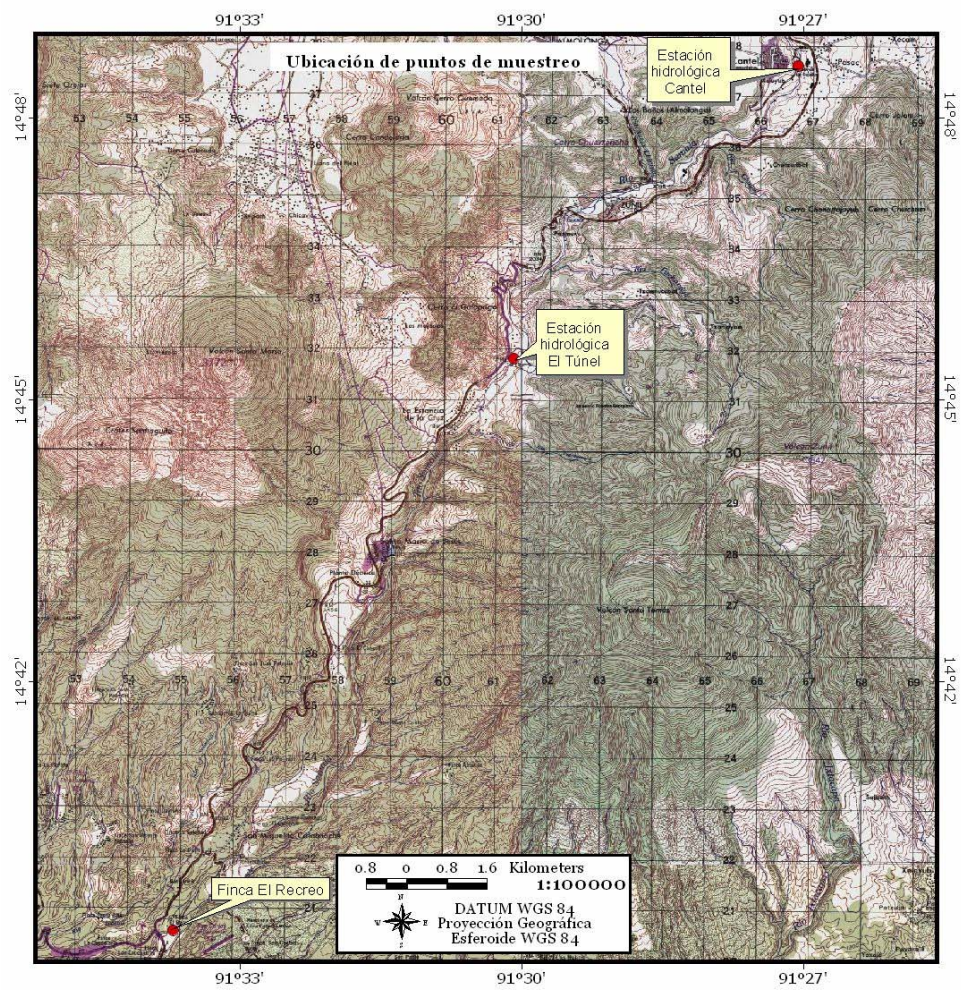
Páginas de Internet

26. <http://daccessdds.un.org/doc/UNDOC/GEN/N00/559/51/PDF/N0055951.pdf?OpenElement>. Consultado el 1 de julio de 2005.
27. <http://daccessdds.un.org/doc/UNDOC/GEN/N01/526/07/PDF/N0152607.pdf?OpenElement>. Consultado el 1 de julio de 2005.
28. http://millenniumindicators.un.org/unsd/mispa/mi_goals.aspx. Consultado el 1 de julio de 2005.
29. <http://platea.pntic.mec.es/~cmarti3/2000/sesion/aguas.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
30. <http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/proyectos/aguas/etapa2/criterios.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
31. http://www.ccme.ca/assets/pdf/wqi_techrprtftsht_e.pdf. Consultado el 1 de julio de 2005.
32. http://www.conred.org/proyectos/santiaguito_samala/acerca.php. Consultado el 1 de julio de 2005.
33. http://www.conred.org/proyectos/santiaguito_samala/cuenca.php. Consultado el 1 de julio de 2005.

34. <http://www.deg.state.or.us/lab/wqm/wqi/wqindex.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
35. <http://www.ecy.wa.gov/pubs/0203052.pdf>. Consultado el 1 de julio de 2005.
36. <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/QUETZALTENANGO/LABOR%20OVALLE%20Presion%20atmos%20QUETZALTENANGO.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
37. <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/Retalhuleu/Retalhuleu/Presion%20atmos%20RETALHULEU.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
38. <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Pagina%20Casos%20de%20estudio.html>. Consultado el 1 de julio de 2005.
39. <http://www.lcra.org/water/state.html>. Consultado el 1 de julio de 2005.
40. <http://www.rae.es/>. Consultado el 1 de julio de 2005.
41. <http://www.segeplan.gob.gt/ine/content/monograf/deptos/reu.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
42. <http://www.segeplan.gob.gt/ine/content/monograf/deptos/solola.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
43. <http://www.segeplan.gob.gt/ine/content/monograf/deptos/suchi.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
44. <http://www.segeplan.gob.gt/ine/content/monograf/deptos/toto.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
45. <http://www.segeplan.gob.gt/ine/content/monograf/deptos/xela.htm>. Consultado el 1 de julio de 2005.
46. <http://www.wmo.ch/web/homs/documents/espanol/icwedecs.html>. Consultado el 1 de julio de 2005.

APÉNDICE

Figura 25. Mapa de localización de puntos de muestreo



Leyenda

● Puntos de muestreo

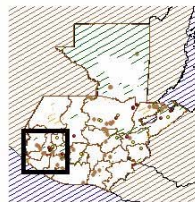
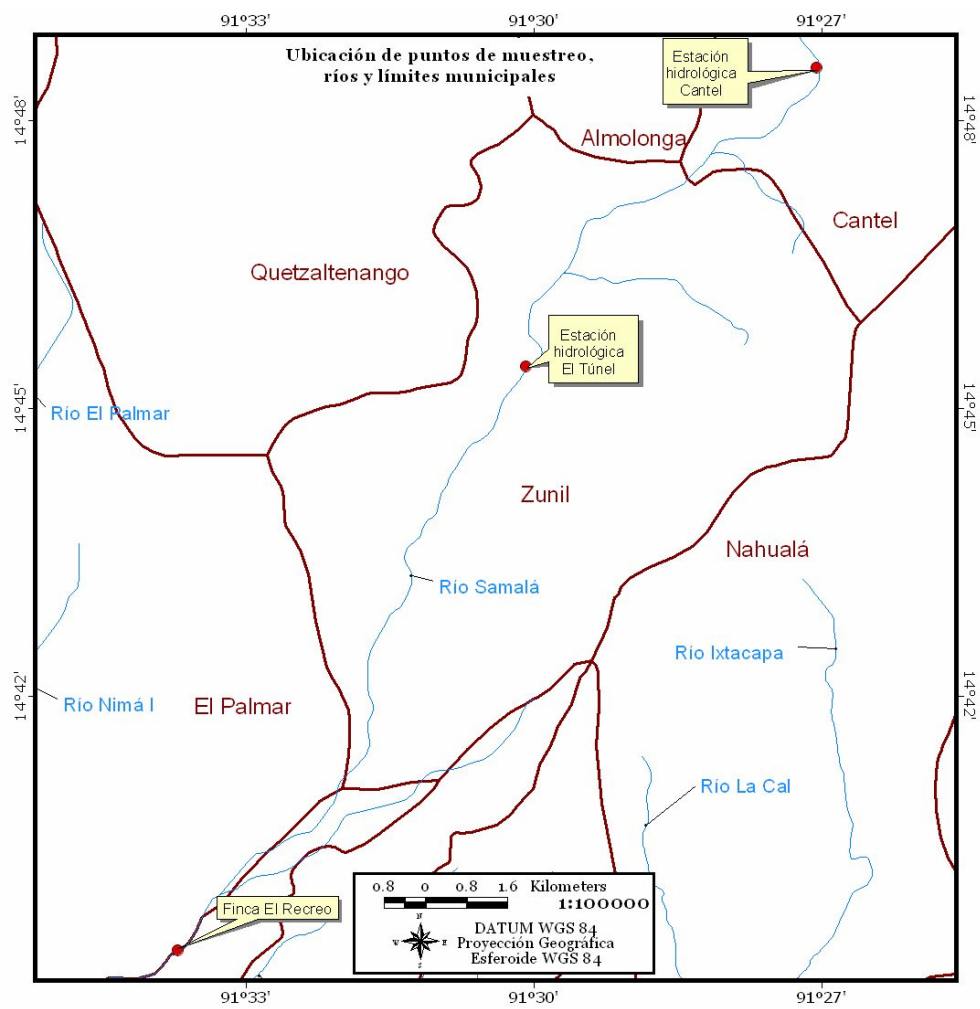


Figura 26. Mapa de ubicación de puntos de muestreo



Leyenda

- Puntos de muestreo
- Ríos
- Límite municipal

