



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias de la Ingeniería para la Gestión
de los Recursos Hídricos, Primera Cohorte

Determinación de las cargas de contaminación en aliviaderos de la red de alcantarillado combinado de la ciudad de Cuenca - Ecuador

Tesis previa a la obtención del título de “Master en Ciencias
de la Ingeniería para la Gestión de Recursos Hídricos”

Autor: Ing. César Augusto Montalvo Cedillo

C.I.: 010529589-3

Correo electrónico: cesarmontalvoc@hotmail.com

Director: Ing. Rubén Fernando Jerves Cobo, PhD

C.I.: 010201702-7

Co Director: Ing. Luis Elvin Dominguez Granda, PhD

C.I.: 091737379-7

Cuenca, Ecuador

30-enero-2020



Resumen

El desbordamiento de alcantarillado combinado (DAC) es una de las principales causas de contaminación en cuerpos receptores durante el periodo de lluvias. En Ecuador no existe aún una legislación relacionada netamente con los procesos de DAC. El objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento de tres descargas de alcantarillado combinado del río Tomebamba en la ciudad de Cuenca - Ecuador. Se ha realizado el registro de 18 eventos DAC en las descargas El Vado, Multifamiliares y Coliseo, analizando los parámetros: conductividad, turbiedad, DBO₅, DQO, coliformes fecales y totales, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, orto fosfato disuelto y fósforo total. Los resultados muestran que las DACs contribuyen al deterioro de la calidad del agua del río Tomebamba durante la temporada de lluvias. Existe gran variación en la tipología del agua. La descarga Coliseo no cumple con la normativa nacional en relación a los parámetros para descarga de efluentes en cuerpos receptores. Se estudió también la relación lluvia – características del DAC a través del análisis de correlación canónica CCA y regresión por mínimos cuadrados parciales PLSR. El resultado es un modelo de predicción de contaminantes en función de parámetros de precipitación. Con el análisis se determinó que: (i) el caudal máximo de descarga de un DAC depende principalmente de la Intensidad máxima de lluvia, (ii) la intensidad de lluvia máxima y promedio, tienen influencia en los valores registrados de turbiedad promedio, (iii) la DQO promedio se relaciona con la duración de la temporada seca previa al evento de precipitación.

Palabras Claves: Desbordamiento de alcantarillado combinado. Aguas residuales. Análisis de correlación canónica. Regresión por mínimos cuadrados parciales.



Abstract

The combined sewer overflow (CSO) is one of the main causes of contamination in the receiving bodies during the rainy period. Ecuador does not have yet legislation related to the CSO processes. The objective of this research is to evaluate the behavior of three combined sewage discharges of the Tomebamba river in the city of Cuenca - Ecuador. For this, the registration of 18 CSO events has been carried out in the CSO El Vado, Multifamiliares and Coliseo. The following water quality parameters have been analyzed: conductivity, turbidity, BOD₅, COD, fecal and total coliforms, nitrates, nitrites, ammoniacal nitrogen, ortho phosphate dissolved and total phosphorus. The results show that CSOs contribute to the deterioration of the water quality of the Tomebamba River during the rainy season. There is great variation in the typology of water. The Coliseo discharge does not comply with the national regulations regarding the parameters for effluent discharge in receiving water bodies. The relationship between rain and characteristics of the CSO was also analyzed through the canonical correlation analysis CCA and partial least squares regression PLSR. The result is a prediction model of pollutants based on precipitation parameters. The analysis determined that: (i) the maximum discharge rate of a CSO depends mainly on the maximum rainfall intensity (ii) the maximum rainfall intensity and average rainfall intensity, have an influence on the recorded average turbidity values (iii) The mean value of COD is related to the duration of the dry season prior to the precipitation event.

Keywords: Combined sewer overflow. Sewage water. Canonical correlation analysis. Partial least squares regression.



Contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Lista de tablas.....	5
Lista de figuras	6
Lista de símbolos	7
1 Introducción	11
1.1 Antecedentes	13
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 <i>Objetivo general.....</i>	<i>14</i>
1.3.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>14</i>
2 Materiales y métodos	15
2.1 Zona de estudio	15
2.2 Recolección de datos en las DACs.	17
2.2.1 <i>Registro de caudales en las DACs.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Recolección de muestras en las DACs</i>	<i>19</i>
2.1 Datos de lluvia	21
2.2 Dinámica de los contaminantes durante el DAC	21
2.3 Modelo de predicción de contaminantes.....	22
2.3.1 <i>Análisis de correlación canónica</i>	<i>24</i>
2.3.2 <i>Regresión por mínimos cuadrados parciales PLSR.....</i>	<i>26</i>
3 Resultados y Discusión	29
3.1 Caracterización de la carga contaminante	29
3.1.1 <i>Relación DBO₅/DQO.....</i>	<i>32</i>
3.1.2 <i>Norma de calidad ambiental y descarga de efluente.</i>	<i>32</i>
3.2 Dinámica de los contaminantes durante el DAC	33
3.3 Construcción de modelos de predicción de contaminantes a partir de los datos de precipitación	37
3.3.1 <i>Análisis de correlación canónica CCA.....</i>	<i>37</i>
3.3.2 <i>Regresión por mínimos cuadrados parciales PLSR.....</i>	<i>41</i>
4 Conclusiones	47
Referencias	48
5 ANEXO A. Calendario de muestreo	53



Lista de tablas

Tabla 2.1 Datos de las descargas analizadas	17
Tabla 2.2 Calendario de ensayos	18
Tabla 2.3 Eventos de DAC para el análisis de variabilidad temporal con criterio (i) valores cercanos a la media en relación a los parámetros conductividad, turbiedad, DBO5 y DQO	22
Tabla 2.4 Eventos de DAC para el análisis de variabilidad temporal con criterio (ii) el evento que registra mayores valores en relación a los parámetros conductividad, turbiedad, DBO ₅ y DQO	22
Tabla 2.5 Variables dependientes e independientes para el análisis de correlación canónica CCA y la elaboración del modelo de relación lluvia - DAC	24
Tabla 3.1 Relación DBO ₅ /DQO para las muestras tomadas en todo el periodo de estudio, 21 de marzo de 2017 a 09 de mayo de 2018.....	32
Tabla 3.2 Matriz de correlación entre las variables de lluvia y DAC en la descarga El Vado	37
Tabla 3.3 Correlaciones canónicas – El Vado	38
Tabla 3.4 Correlaciones (cargas canónicas ρ) entre (a) variables explicativas de lluvia y (b) variables respuesta, con las variables canónicas significativas L(1) y L(3) - descarga El Vado.....	38
Tabla 3.5 Matriz de correlación entre las variables de lluvia y DAC en la descarga Multifamiliares....	39
Tabla 3.6 Matriz de correlación entre las variables de lluvia y DAC en la descarga Coliseo.....	39
Tabla 3.7 Porcentajes de variabilidad de los parámetros de lluvia (X) explicada por cada componente del modelo PLSR, para la predicción de la DQO _{med} en la descarga El Vado	42
Tabla 5.1 Número de muestras analizadas en las descargas EL Vado, Multifamiliares y Coliseo.	53



Lista de figuras

Figura 2.1 Ubicación de las descargas. Georreferencia UTM-WGS 84	17
Figura 2.2 Esquema de registro de datos automático en el tramo de descarga.....	19
Figura 2.3 Sonda de muestreo ISCO 6712	20
Figura 2.4 (a) Turbidímetro Tur555, (b) Sonda multiparamétrica YSI-probe 600R.....	21
Figura 3.1 Análisis de las muestras tomadas en las tres descargas en todo el periodo de estudio 2017-2018 (a) conductividad, (b) demanda química de oxígeno, (c) turbiedad, (d) demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días, (e) coliformes fecales, (f) coliformes totales.	30
Figura 3.2 Análisis de las muestras tomadas en la descarga El Vado. (a) Nitrito, (b) nitrito, (c) nitrógeno amoniacal, (d) orto fosfato disuelto (e) fósforo total.	31
Figura 3.3 Comparación de los resultados de DBO ₅ y DQO con la normativa ambiental	33
Figura 3.4 Variación de los parámetros de calidad de agua en la descarga El Vado.	34
Figura 3.5 Variación de los parámetros de calidad de agua en la descarga Multifamiliares.	35
Figura 3.6 Variación de los parámetros de calidad de agua en la descarga Coliseo.	36
Figura 3.7 Correlación entre las variables de lluvia y DAC – Descarga El Vado.....	38
Figura 3.8 Correlación entre las variables de lluvia y DAC – Descarga Multifamiliares	39
Figura 3.9 Correlación entre las variables de lluvia y DAC – Descarga Coliseo	40
Figura 3.10 Error cuadrático medio de predicción en función del número de componentes para el modelo PLSR de predicción de DQO _{med} en la descarga El Vado.....	42
Figura 3.11 Validación del modelo PLS, valores medidos y predicciones – Descarga El Vado.....	42
Figura 3.12 Triplot que representa en una misma gráfica los casos, las variables respuesta y las variables predictoras para los datos de la descarga El Vado.	43
Figura 3.13 Triplot que representa en una misma gráfica los casos, las variables respuesta y las variables predictoras para los datos de la descarga Multifamiliares.....	44
Figura 3.14 Triplot que representa en una misma gráfica los casos, las variables respuesta y las variables predictoras para los datos de la descarga Coliseo.....	45



Lista de símbolos

DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (mg/l)
DQO	Demanda química de oxígeno (mg/l)
DQO _{med}	Demanda química de oxígeno promedio durante el DAC (mg/l)
C _{med}	Conductividad promedio durante el DAC (mg/l)
Tur	Turbiedad (NTU)
Tur _{med}	Turbiedad promedio durante el DAC (NTU)
C _F	Coliformes fecales (NMP/100ml)
C _T	Coliformes totales (NMP/100ml)
P _t	Precipitación total (mm)
Q _{max}	Caudal máximo de precipitación durante el DAC (l/s)
I _{max}	Intensidad máxima de precipitación en un periodo de 5 minutos (mm/h)
I _{med}	Intensidad promedio de precipitación (mm/h)
D _{ll}	Duración de lluvia (minutos)
D _s	Duración de la temporada seca antecedente a la lluvia (horas)
NO ₂	Nitritos (ug/l)
NO ₃	Nitratos (mg/l)
NH ₃ – N	Nitrógeno amoniacal (mg/l)
PO ₄	Orto fosfato (mg/l)
P	Fósforo total (mg/l)
L	Variables canónicas
R	Correlación canónica
λ	Estadístico lambda asociado a un p-valor
gl	Grados de libertad en la relación canónica
p – valor	Valor de significancia estadística
ρ	Cargas canónicas
CV	Validación cruzada ordinaria
adjCV	Validación cruzada corregida por sesgo
KCL	Cloruro de potasio

Acrónimos

RAC	Red de alcantarillado combinado
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PTAR – U	Planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba
DAC	Desbordamiento de alcantarillado combinado
ETAPA	Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento de Cuenca
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
MAE	Ministerio del Ambiente
PROMAS	Programa para el Manejo del Agua y del Suelo
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
NMP	Número más probable de microorganismos coliformes
TSS	Sólidos suspendidos totales
CCA	Canonical correlation analysis (Análisis de correlación canónica)
PLSR	Partial least squares regression (Regresión por mínimos cuadrados parciales)



PCR

Principal component regression (Regresión por componentes principales)

Universidad de Cuenca

Cláusula de Propiedad Intelectual

César Augusto Montalvo Cedillo, autor del trabajo de titulación “Determinación de las cargas de contaminación en aliviaderos de la red de alcantarillado combinado de la ciudad de Cuenca - Ecuador”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 30 de enero de 2020.

César Augusto Montalvo Cedillo

C.I: 0105295893



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

César Augusto Montalvo Cedillo en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Determinación de las cargas de contaminación en aliviaderos de la red de alcantarillado combinado de la ciudad de Cuenca - Ecuador”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 30 de enero de 2020.

César Augusto Montalvo Cedillo

C.I: 0105295893



Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a mi familia que ha sido mi apoyo a lo largo de toda mi vida, en especial a mi esposa Natalia y a mi hija Emilia quienes fueron mi mayor motivación para culminar este proyecto.

A mis padres y hermanos que contribuyeron en la formación de mi persona.

Agradecimientos

A todos mis amigos, en especial a aquellos con los que compartimos el aula desde hace varios años.

Al Programa para el Manejo del Agua y Suelo, por haberme acogido en sus instalaciones y contribuido con mi crecimiento profesional.

A todos los docentes que fueron parte de este trabajo, en especial al ingeniero Rubén Jérvés Cobo, PhD por su contribución y apoyo en la realización de este proyecto.

Esta investigación se ejecutó en el marco del Programa VLIR-UOS UIC-Universidad de Cuenca y del proyecto VLIR Ecuador Biodiversity Network.



Capítulo 1

Introducción

En varias ciudades del mundo las aguas residuales y las aguas lluvias son transportadas mediante una misma red de alcantarillado denominada Red de Alcantarillado Combinado (RAC). En general la RAC conduce el caudal hacia una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para luego ser restituida hacia un cuerpo receptor. Durante los eventos de precipitaciones fuertes, los caudales en la RAC pueden superar por mucho la capacidad de la PTAR por lo que se construyen estructuras que permiten el vertido de las aguas sin ningún tratamiento directamente en el cuerpo receptor (Morgan, Xiao, & McNabola, 2017). Este proceso se denomina Desbordamiento de Alcantarillado Combinado (DAC).

El agua residual urbana está compuesta principalmente de materia orgánica proveniente en su mayoría de los excrementos y orina humana, esta contaminación provoca la reducción de los niveles de oxígeno debido al proceso de biodegradación. Este tipo de agua también contiene gran cantidad de grasas y detergentes, muchos de los cuales no son fácilmente descompuestos por la acción bacteriana, por lo que son contaminantes persistentes que afectan tanto la vida vegetal como animal de los ecosistemas acuáticos. Adicionalmente esta agua contiene una carga importante de microorganismos, gran parte de ellos patógenos responsables de transmitir enfermedades hídricas (Valdez & Vásquez, 2003).

Las aguas de escorrentía por su parte pueden contener sólidos suspendidos, microorganismos, materia orgánica, pesticidas, metales pesados, dependiendo de su tipología. La carga contaminante depende en gran medida de las características del evento de precipitación, tales como: la lámina de precipitación, la intensidad y la duración (Mailhot, Talbot, & Lavallée, 2015; Sandoval, Torres, Pawlowsky-Reusing, Riechel, & Caradot, 2013). La mayor contaminación se produce con las primeras aguas que lavan las áreas de aporte y arrastran una gama extensa de contaminantes hacia el sistema de alcantarillado (Passerat, Ouattara, Mouchel, Vincent Rocher, & Servais, 2011). La calidad del agua que rebosa durante el evento de una DAC varía dentro de un mismo evento de tormenta y entre tormentas (Gómez, 2000).

El impacto de un evento DAC en el ecosistema acuático es variado en términos de los tipos de contaminantes, sus concentraciones y la dinámica en el tiempo y espacio (Passerat et al., 2011). Algunas consecuencias son: (i) la reducción del oxígeno debido a la biodegradación de la materia orgánica proveniente de las aguas no tratadas, (ii) el aumento de turbidez que afecta el proceso de fotosíntesis, (iii) el incremento de la concentración de algunos microcontaminantes orgánicos, (iv) el



aumento en la concentración de metales (Mulliss, Revitt, & Shutes, 1997). La frecuencia con la que ocurren los eventos DAC influye también en el impacto generado en el cuerpo receptor (Lau, Butler, & Schütze, 2002).

Existen varias investigaciones en las que se evalúa el efecto de los procesos de DAC en los cuerpos receptores a través del análisis de parámetros y características físicas químicas y biológicas. Algunos estudios examinan parámetros puntuales como el oxígeno disuelto (Hvitved-Jacobsen, 1982; Kreutzberger, Race, Meinholz, Harper, & Ibach, 1980), otros autores en cambio, analizan un conjunto mayor de parámetros químicos tales como: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), conductividad, PH, amonio, nitratos, nitritos (Brzezińska, Zawilski, & Sakson, 2016; Riechel et al., 2016; Suárez & Puertas, 2005; Weyrauch et al., 2010). Los parámetros microbiológicos son igualmente analizados con el objetivo de determinar la calidad del agua durante el DAC. En este sentido los parámetros más empleados suelen ser: Coliformes totales, E. Coli y Enterococos intestinales (Al Aukidy & Verlicchi, 2017; Madoux-Humery et al., 2016; Passerat et al., 2011; Weyrauch et al., 2010).

Comprender el origen y la dinámica de los contaminantes es otro aspecto fundamental dentro del estudio de los DACs. Passerat (2011) evaluó la principal estructura de DAC en el río Sena a través del monitoreo continuo de los parámetros durante todo el proceso. El estudio determinó que alrededor del 89% del caudal vertido al río provino de la escorrentía superficial y un 75% del total de material suspendido descargado corresponde a material de re-suspensión.

Algunos autores estudian la relación entre los eventos de precipitación y las características de los DACs. Yu, Kojima, An, & Furumai, (2013) investigaron la relación entre las características de los DACs como la frecuencia, la duración, el volumen total descargado, el tiempo de respuesta promedio y los parámetros de las lluvias como la altura de precipitación, la intensidad máxima horaria y la duración. Mailhot et al., (2015) en su investigación evaluó 4285 estructuras de descarga de alcantarillado combinado, y desarrolló un enfoque para estimar el número promedio de DAC en un año cualesquiera, además desarrolló un modelo de predicción de la ocurrencia de días con DAC a partir de una serie de datos de precipitaciones.

Pocos autores estudian la relación existente entre las variables de precipitación y las características de calidad del agua de los DACs (Gooré Bi, Monette, & Gasperi, 2015; Ruan, 1999; Sandoval et al., 2013). Por ejemplo Sandoval et al., (2013) investigó la principal DAC en Berlín (Alemania) a través del uso de métodos estadísticos multivariados y mediciones en línea. Como resultado se determinó que las intensidades de lluvia máximas y promedio son las variables más influyentes para describir la cantidad de agua y las cargas contaminantes de las DACs, mientras que la duración del evento de lluvia y la profundidad de la lluvia parecen ser las variables más influyentes para describir las concentraciones de contaminantes.



1.1 Antecedentes

El sistema de alcantarillado que sirve actualmente a la ciudad de Cuenca, se construyó bajo criterios establecidos en Planes Maestros de 1968 y 1985 que contemplan un sistema separado; sin embargo, se detectó un gran número de conexiones ilícitas y de descargas sanitarias que se vertían a colectores pluviales y viceversa (ETAPA EP, 2019). En la actualidad un 85% del sistema de alcantarillado de la ciudad es drenada por una red de tipo combinado, en la que las aguas sanitarias se mezclan con el agua de escorrentía urbana durante la temporada de lluvias.

Desde el año 1984 la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA EP ha implementado varios proyectos con el objetivo de mejorar las condiciones de calidad de agua de los ríos que atraviesan la ciudad. Entre estas obras destacan la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba (PTAR-U), la ampliación de la red de alcantarillado combinado y la construcción de la red de interceptores (ETAPA-EP, 2007).

En el año de 1997 ETAPA-EP emprende el “Programa de Monitoreo Biológico de los ríos en Cuenca”, con el uso de invertebrados bénticos como indicadores de la calidad ecológica de los ríos. En el año de 2006, se realizó el estudio de “Determinación de categorías de calidad ambiental en los ríos de Cuenca” (Carrasco, 2006). La investigación determinó que el funcionamiento de los interceptores marginales logró registrar una recuperación de las condiciones biológicas del río Tomebamba en los tramos ubicados dentro del casco urbano de la ciudad de Cuenca.

1.2 Justificación

Pese a la contribución de los interceptores y la PTAR-U en la mejora de la calidad de agua de los ríos de Cuenca, no se puede evitar el vertido de una gran cantidad de carga contaminante durante los eventos de precipitaciones fuertes. Sin embargo, el estudio de dichos contaminantes, así como de los factores que intervienen en la degradación de los ríos durante el DAC, confiere un mejor entendimiento de los procesos y direcciona el conocimiento a la búsqueda de soluciones. Una evaluación acertada permite definir estrategias para mitigar el efecto que tiene el aporte de los contaminantes en el cuerpo receptor (García et al., 2017).

El crecimiento poblacional y la expansión del territorio urbano agravan el problema de los DAC debido al aumento de los caudales de agua residuales que se descargan en el cuerpo receptor. La principal causa de contaminación en el río Tomebamba durante la temporada de lluvia se relaciona con las descargas de alcantarillado que vierten directamente en el río sin ningún tratamiento previo (Jerves-Cobo et al., 2018). En muchas ocasiones, los logros conseguidos mediante la construcción de depuradoras y el tratamiento de las aguas en tiempo seco quedan anulados por este tipo de



descargas (Temprano-Gonzales, Gabriel-Cervigni, Suárez-Lopez, & Tejero-Monzón, 1996).

En el Ecuador no existe aún una Legislación relacionada netamente con los procesos de DAC. Únicamente existen restricciones para la descarga de contaminantes en cuerpos receptores, las cuales sólo limitan las concentraciones de los vertidos (MAE, 2017). Es necesario determinar un límite también para el aporte total de carga contaminante a través de la caracterización de otros parámetros relacionados al DAC. La normativa en Canadá por ejemplo requiere que los Municipios demuestren que el desarrollo del territorio no incrementa la frecuencia de los DAC. En este sentido, los Planes de Ordenamiento Territorial de estos Municipios, están integrados a proyectos que buscan limitar la escorrentía superficial (Jean, Duchesne, Pelletier, & Pleau, 2018; Mailhot et al., 2015). A diferencia de las fuentes puntuales donde el tratamiento es el método más efectivo de control de contaminación, la reducción de la carga difusa se centra en prácticas de manejo de suelo y escorrentía.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el proceso de desbordamiento de alcantarillado combinado de tres descargas en el río Tomebamba en la Ciudad de Cuenca – Ecuador.

1.3.2 Objetivos específicos

- Muestreo de calidad de agua en los tres puntos de descarga.
- Caracterizar la carga contaminante de cada uno de los desbordamientos.
- Determinar el impacto de los desbordamientos de alcantarillado combinado (DAC) en las aguas superficiales receptoras.
- Construcción de modelos de predicción de contaminantes a partir de los datos de precipitación.



Capítulo 2

Materiales y métodos

La metodología para la investigación planteada en el presente documento es de tipo cuantitativa, esta involucra la medición precisa de las variables observadas (parámetros de calidad de agua y datos de precipitación) y el empleo de medios matemáticos y estadísticos para evaluar los resultados de manera objetiva.

Una primera parte del proceso metodológico comprende el trabajo de campo, este incluye la instalación de los equipos y accesorios que posibilitan la toma de muestras y su traslado. La siguiente parte, comprende el análisis de las muestras en el laboratorio y la determinación de los parámetros de calidad de agua para cada una de ellas. En la etapa siguiente se organiza la información, se realiza el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. En una última parte se construyen los modelos matemáticos (ecuaciones) para estimar los parámetros de calidad de agua de cada una de las estructuras de DAC a partir de los parámetros de precipitación.

2.1 Zona de estudio

La zona de estudio comprende tres microcuencas urbanas dentro de la ciudad de Cuenca, capital de la provincia del Azuay – Ecuador. Cuenca se localiza en la parte meridional de la Cordillera Andina, dentro de la zona geomorfológica catalogada como valle interandino. Esta zona está comprendida entre los 2300 a 2900 msnm. La temperatura promedio anual varía de acuerdo con la altitud, entre 13 y 19 °C (GAD Municipal de Cuenca, 2011).

Se distingue la presencia de dos estaciones durante el año, la temporada lluviosa va desde mediados de febrero hasta inicios de julio y desde la segunda mitad de septiembre hasta las primeras semanas de noviembre. El resto del año corresponde a temporada seca (Jerves-Cobo et al., 2018). La precipitación promedio en Cuenca es de 879 mm por año (Aeropuerto-Mariscal-Lamar, 2012).

La población en la zona urbana de Cuenca para el 2020 se proyecta en 407000 habitantes aproximadamente (INEC, 2010). La ciudad está atravesada por cuatro ríos: el Tomebamba, Yanuncay, Tarqui y el río Machángara. La principal contaminación en los ríos Tomebamba y Yanuncay es debido a la urbanización. En el río Machángara en cambio se debe además de la urbanización a las descargas industriales. En el río Tarqui la contaminación se debe tanto a la urbanización como a las actividades ganaderas desarrolladas en sus valles (Jerves-Cobo et al., 2018).

La calidad de agua en los ríos se ve afectada por diferentes fuentes de contaminación que incluyen descargas puntuales de redes de alcantarillado e industrias, los



desbordamientos de aguas pluviales de la red de alcantarillado (DAC), así como las descargas de aguas superficiales (Jerves-Cobo et al., 2018).

Los eventos DAC influyen considerablemente en la degradación de la calidad del agua de los cuerpos receptores durante la temporada húmeda (Al Aukidy & Verlicchi, 2017; Hvitved-Jacobsen, 1982; Madoux-Humery et al., 2016; Mulliss et al., 1997; Passerat et al., 2011; Weyrauch et al., 2010).

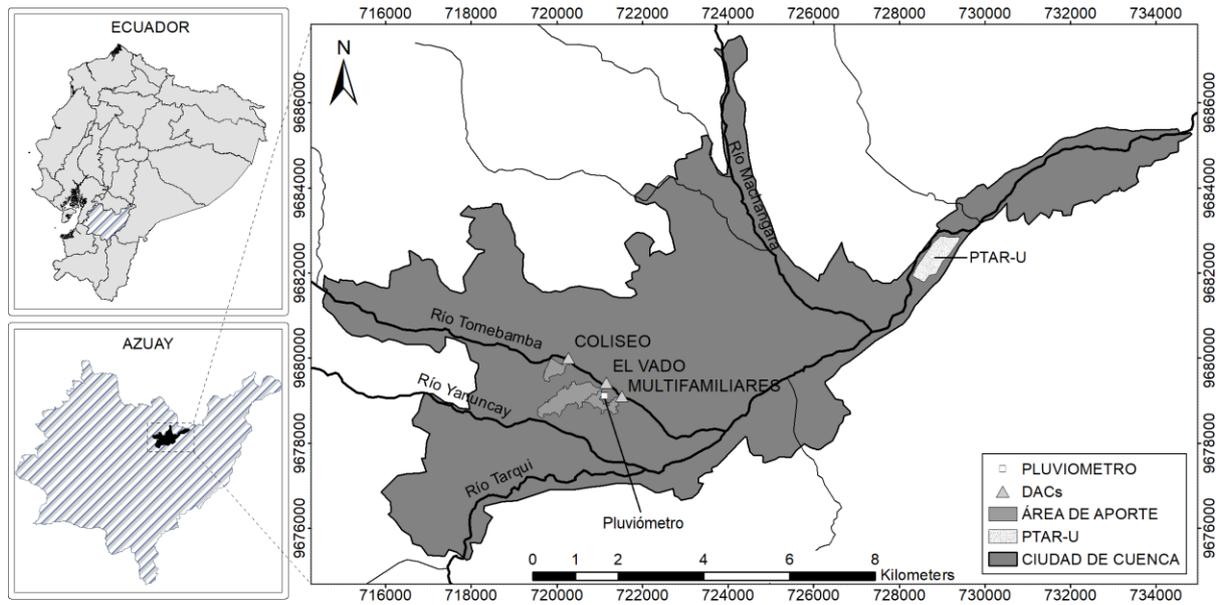
El aumento de la cobertura de la red de alcantarillado y la construcción de los colectores marginales, han mejorado las condiciones de calidad del agua de los ríos. Sin embargo, varias redes de alcantarillado, puntos de contaminación y desechos industriales todavía se descargan directamente en los ríos de Cuenca incluyendo al Tomebamba (Fernandez de Córdova & Gonzales, 2012; Vintimilla Palacios, 2016).

El sistema de drenaje de la ciudad de Cuenca se compone de aproximadamente de 1300 Km de red de alcantarillado y 80 Km de red de interceptores, estos últimos conducen el caudal hacia la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba PTAR-U. La planta se mantiene en funcionamiento desde noviembre de 1999 (Alvarado, Vedantam, Durazno, & Nopens, 2011). Al rededor del 80% del agua residual de la ciudad de Cuenca es tratada antes de su restitución a los cuerpos de agua (CEPAL, 2012).

La Planta de Tratamiento de Ucubamba (PTAR-U) se constituye en la principal infraestructura de depuración de aguas residuales para la ciudad. Esta abarca un área aproximada de 45 hectáreas y se ubica a una distancia de dos kilómetros aguas abajo de la confluencia del río Machángara con el Tomebamba (**Figura 2.1**). La red de interceptores construida en las márgenes de los cuatro ríos principales, permite la recolección y transporte del agua residual de toda la ciudad hacia la PTAR-U. El sistema de tratamiento preliminar comprende una estructura de cribas automáticas y desarenador que permiten la retención y evacuación de los sólidos de mayor tamaño. El sistema de tratamiento principal comprende 6 lagunas de estabilización: dos aireadas, dos facultativas y dos de maduración, estas forman un sistema en paralelo que facilita las operaciones de limpieza y mantenimiento (Alvarado et al., 2011). La PTAR-U trata aproximadamente un caudal medio de 1.2 m³/s (Arévalo, Van Echelpoel, Alvarado, Goethals, & Larriva, 2017).

Las tres descargas de alcantarillado combinado que se analizan en el presente documento, están localizadas en la margen derecha del río Tomebamba cerca del centro de la ciudad de Cuenca (**Figura 2.1**).

La primera se denomina descarga *Colíseo*, abarca un área de aporte de alrededor de 18.1 ha. El tramo final de tubería que descarga en el río es de hormigón, con un diámetro de 1200 mm y con una pendiente promedio de 1.18%.



DACs: Desbordamientos de alcantarillado combinado

Figura 2.1 Ubicación de las descargas. Georreferencia UTM-WGS 84

Elaboración: Autor

Aguas abajo, a 1100 metros aproximadamente, se localiza la descarga *El Vado* cuya área de aporte alcanza 56.0 ha. El colector principal es de hormigón, en el tramo de restitución al río este tiene un diámetro de 1500 mm y una pendiente promedio de 0.90%. Esta descarga es la de mayor área de aporte, por lo tanto, la que mayores caudales registra.

A 500 metros agua abajo de la descarga *El Vado* se encuentra la descarga *Multifamiliares*, cuya área de contribución se estima en 19.4 ha. El material de la tubería de restitución es hormigón, tiene un diámetro de 1200 mm y una pendiente promedio de 1.18%.

Tabla 2.1 Datos de las descargas analizadas

Descarga	Área de aporte (ha)	Tramo de tubería de descarga		
		Material	Diámetro (mm)	Pendiente %
Coliseo	18.1	Hormigón	1200	1.18%
El Vado	56.0	Hormigón	1500	0.90%
Multifamiliares	19.4	Hormigón	1200	1.18%

Elaboración: Autor

2.2 Recolección de datos en las DACs.

Se registraron en total 18 eventos DAC, tres en la descarga *Coliseo*, seis en la descarga *Multifamiliares* y nueve en la descarga *El Vado*. Las mediciones se llevaron a cabo durante el periodo marzo de 2017 a mayo de 2018 conforme al calendario mostrado en la **Tabla 2.2**. Los ensayos realizados no corresponden a la totalidad de eventos DAC ocurridos durante el periodo, algunos de estos eventos no fueron registrados.

Tabla 2.2 Calendario de ensayos

DAC	Ensayo	Fecha
Coliseo	CO-5	8-Apr-2017
	CO-6	12-Apr-2017
	CO-12	18-Apr-2017
El Vado	VA-2	29-Mar-2017
	VA-3	30-Mar-2017
	VA-7	12-Apr-2017
	VA-10	14-Apr-2017
	VA-11	18-Apr-2017
	VA-13	20-Apr-2017
	VA-15	14-Nov-2017
	VA-16	4-Apr-2018
	VA-17	9-May-2018
Multifamiliares	MU-1	21-Mar-2017
	MU-2	29-Mar-2017
	MU-4	8-Apr-2017
	MU-8	12-Apr-2017
	MU-9	14-Apr-2017
	MU-14	20-Apr-2017

Elaboración: Autor

2.2.1 Registro de caudales en las DACs.

Los datos relativos a caudales se determinaron mediante el método de relación sección-pendiente (Aparicio Mijares, 1999), a través de la medición automática del nivel de agua y la caracterización del flujo uniforme presentado en el tramo de aproximación a la descarga. El registro de calados se realizó en intervalos de un minuto, para lo cual se empleó un sensor de nivel conectado a una sonda ISCO 6712 (Gooré Bi et al., 2015). Mediante el dato de altura de flujo y con la información referente a las características geométricas e hidráulicas del tramo final de tubería se determinó el caudal de descarga al cuerpo receptor. La metodología expuesta anteriormente requiere de la formación de flujo uniforme en dicho tramo, para verificar esto, se constató que la turbulencia provocada en el rebosadero no perturba la condición de flujo aguas abajo. Así mismo se comprobó que la descarga se encuentra lo suficientemente alejada del punto de medición, de tal forma que, el registro del calado normal no se vea afectado por la curva de flujo de caída hidráulica al final del canal (**Figura 2.2**).

Gooré Bi et al., (2015) realizaron el registro de datos de caudal de un DAC en Longueuil cerca de Montreal, Québec, Canadá, a través de la medición automática del nivel y la velocidad en el conducto de descarga de la red de alcantarillado combinado. En la investigación se empleó un equipo ISCO 4150 con un intervalo de registro de datos de 5 minutos.

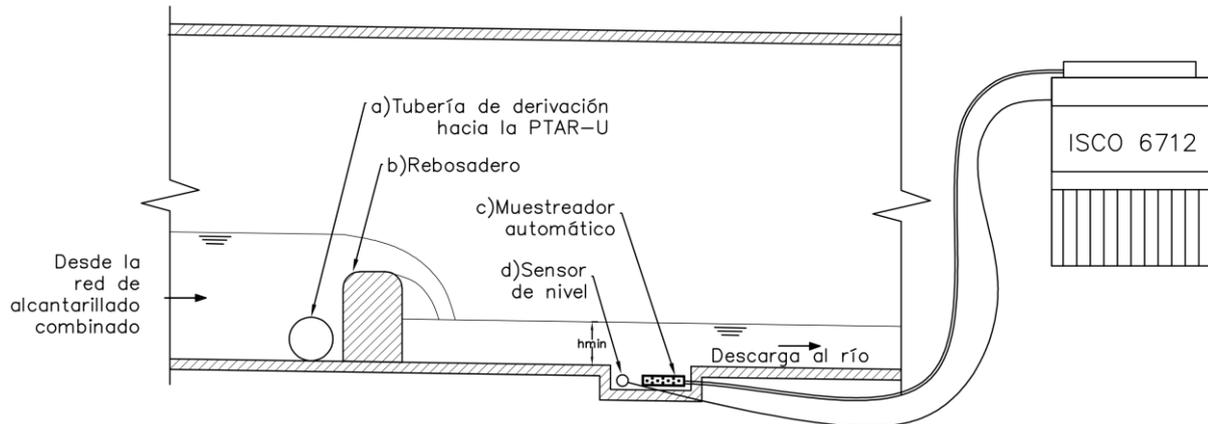


Figura 2.2 Esquema de registro de datos automático en el tramo de descarga.

Elaboración: Autor

Dado que existen precipitaciones que no generan desbordamiento del alcantarillado es necesario definir un umbral de precipitación sobre el cual se considera un evento de DAC (Weyrauch et al., 2010). La definición de este umbral está relacionada con la influencia del desbordamiento en la calidad de agua del río. Si el desbordamiento es leve, el efecto de la dilución de los contaminantes es insignificante, por lo cual no se considera un evento de DAC. La frecuencia de los eventos de desbordamiento pueden influir en la calidad del agua (Lau et al., 2002). En esta investigación se ha empleado un umbral relacionado con la altura de agua en el tramo de descarga. El calado (h_{min}) sobre el cual se empezó la toma de muestras fue cuando este superó los 2.5cm, (Figura 2.2).

2.2.2 Recolección de muestras en las DACs

Paralelamente al registro de caudales se realizó la recolección de muestras para la determinación de los parámetros de calidad de agua. La toma de muestras al igual que la medición de calados, se realizó con la ayuda del equipo automático ISCO 6712 (Figura 2.3) y su sistema de bombeo integrado (Gooré Bi et al., 2015).

Una vez que el calado h_{min} ha superado el umbral establecido, el equipo comienza la recolección de las muestras con un intervalo de tiempo de 3 minutos entre cada una (Gooré Bi et al., 2015; Weyrauch et al., 2010). Las muestras se almacenan en la parte inferior de la ISCO, en 24 botellas plásticas de un litro de capacidad, el muestreo durante el proceso de descarga abarca un tiempo máximo de 72 minutos (24 muestras por 3 minutos). Posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio del Programa para el Manejo del Agua y Suelo PROMAS de la Universidad de Cuenca y sometidas a los respectivos análisis.

La recolección y traslado de muestras se basó en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:213 (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2013). Esta exhibe recomendaciones en relación a los tipos de recipiente, llenado del mismo, tiempos y condiciones de traslado a laboratorio, entre otras.



Figura 2.3 Sonda de muestreo ISCO 6712
Elaboración: Autor

Los parámetros de calidad de agua establecidos para la investigación fueron: conductividad, turbiedad, DBO_5 (demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días), DQO (demanda química de oxígeno), C_F (coliformes fecales), C_T (coliformes totales), NO_3 (nitratos), NO_2 (nitritos), $NH_3 - N$ (nitrogeno amoniacal), PO_4 (orto fosfato disuelto) y P (fosforo total) , Estos fueron determinados mediante metodologías estandarizadas (Valdez & Vásquez, 2003; Weyrauch et al., 2010).

La conductividad se registró en laboratorio del PROMAS a través de la sonda multiparamétrica YSI-probe 600R, la cual fue previamente calibrada empleando una solución de cloruro de potasio KCl (**Figura 2.4**). Para medir la turbiedad se empleó el turbidímetro Turb 555. La DBO_5 y DQO en cambio fueron determinados por el laboratorio acreditado GRUNTEC Cía. Ltda. a través del envío de las muestras vía aérea a los laboratorios en Quito. El método utilizado para la DBO_5 corresponde a Método adaptado de Referencia / Método interno: SM 5210 B, D / MM-AG-19. Para la obtención de la DQO se emplea Método adaptado de Referencia / Método interno: SM 5220 D / MM-AG-18. Para la determinación de los parámetros de coliformes se empleó el método de filtración por membrana y conteo de placas (Passerat et al., 2011). Los parámetros NO_3 (nitratos), NO_2 (nitritos), $NH_3 - N$ (nitrogeno amoniacal), PO_4 (orto fosfato disuelto) y P (fosforo total) se determinaron en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Cuenca.

La conductividad y la turbiedad se registraron para todas las 24 muestras de cada ensayo. A partir del valor máximo de conductividad se seleccionó cinco muestras para realizar el análisis de DQO. Se analizó la DQO en la muestra que presentó mayor valor de conductividad, también se analizó las dos muestras anteriores a esta saltando una muestra y las dos muestras posteriores saltando una muestra hasta completar los 5

registros. La DBO_5 , coliformes totales y coliformes fecales se analizó únicamente para la muestra que presentó mayor valor de conductividad en la mayoría de los casos.

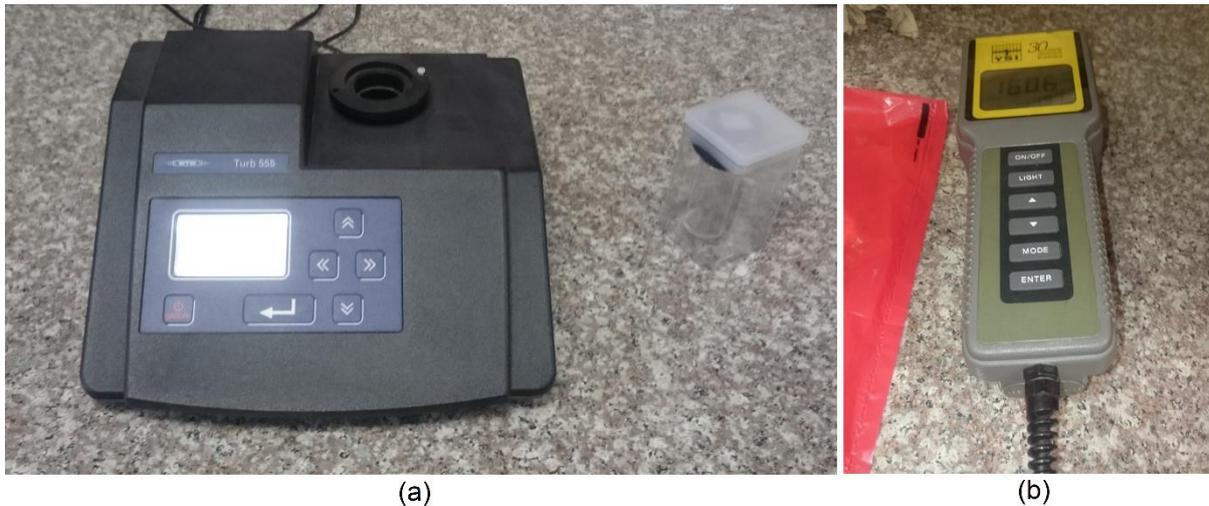


Figura 2.4 (a) Turbidímetro Tur555, (b) Sonda multiparamétrica YSI-probe 600R
Elaboración: Autor

En los dos últimos muestreos correspondientes a la descarga El Vado, se realizó la medición adicional de los parámetros: nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, ortofosfato disuelto y fósforo total, para 5 de las 24 muestras en cada ensayo (Ver ANEXO A. Calendario de muestreo).

2.1 Datos de lluvia

Los datos de precipitación se obtuvieron de la estación pluviométrica de la Universidad de Cuenca, ubicada entre las áreas de aporte de las descargas El Vado y Multifamiliares **Figura 2.1**.

La estación registra los datos de precipitación con un paso de 0.2mm. Estos datos fueron transformados a precipitación con intervalo de tiempo de 5 minutos para ser empleados en este trabajo.

2.2 Dinámica de los contaminantes durante el DAC

La calidad del agua que rebosa durante el DAC varía dentro de un mismo evento de tormenta, pues la primera agua dentro de la tormenta es más sucia que la del final de la tormenta. Aspecto que también sucede entre tormentas, pues depende igualmente de la magnitud y duración de la tormenta como de que tanto había permanecido sin llover antes de dicho evento (Gómez, 2000).

Para evaluar el comportamiento de los contaminantes durante el proceso de DAC, se ha escogido dos eventos provenientes de cada descarga. La selección de estos dos eventos se ha realizado en base a los criterios siguientes:



- (i) El primer evento seleccionado registra valores cercanos a la mediana en relación a los parámetros DBO₅ y DQO.
- (ii) El segundo evento seleccionado registra los mayores valores en relación a los parámetros DBO₅ y DQO.

La **Tabla 2.3** y **Tabla 2.4** muestra las DACs seleccionadas para el análisis según los criterios (i) y (ii) respectivamente.

Tabla 2.3 Eventos de DAC para el análisis de variabilidad temporal con criterio (i) valores cercanos a la media en relación a los parámetros conductividad, turbiedad, DBO₅ y DQO

Evento	Fecha	Inicio	Fin	Duración (h)	Q pico (l/s)
VA-13	20/04/2017	18:04:00	19:13:00	1:09	324.2
MU-14	20/04/2017	18:17:00	19:26:00	1:09	37.6
CO-12	18/04/2017	16:16:00	17:25:00	1:09	508.8

Elaboración: Autor

Tabla 2.4 Eventos de DAC para el análisis de variabilidad temporal con criterio (ii) el evento que registra mayores valores en relación a los parámetros conductividad, turbiedad, DBO₅ y DQO

Evento	Fecha	Inicio	Fin	Duración (h)	Q pico (l/s)
VA-3	30/03/2017	15:09:00	16:03:00	0:54	77.9
MU-4	08/04/2017	13:56:00	14:32:00	0:36	90.4
CO-5	08/04/2017	13:58:00	14:16:00	0:18	22.6

Elaboración: Autor

2.3 Modelo de predicción de contaminantes

La utilidad de los modelos radica en que pueden emplearse para estimar parámetros que son difíciles de determinar ya sea por los procedimientos o por el costo de su obtención. La estimación se realiza a partir de otros parámetros que se pueden obtener de manera más sencilla o empleando costos significativamente menores.

La relación entre las variables de precipitación y las características de los DACs se pueden estudiar mediante los métodos estadísticos multivariados (Sandoval et al., 2013; Yu et al., 2013). La correlación canónica es una forma de evaluar la relación entre dos conjuntos de datos multidimensionales, como es el caso de las variables de lluvia y DAC (González, Déjean, Martin, & Alain, 2008; Leurgans, Moyeed, & Silverman, 1993; Sandoval et al., 2013).

Para esta investigación se ha empleado el análisis de correlación canónica CCA, en conjunto con la regresión por mínimos cuadrados parciales PLSR para explorar las relaciones entre las variables de precipitación y las características de los DACs. La PLSR ha sido usada para desarrollar un modelo de lluvia - características de DAC que



permita estimar los parámetros que caracterizan un evento DAC a partir de datos de precipitación.

Para determinar las relaciones existentes entre la precipitación y los parámetros de calidad de agua en las descargas, es necesario definir y delimitar los eventos de lluvia discretos que corresponden a cada uno de los DACs analizados. Weyrauch et al. (2010) en su estudio "Contribution of combined sewer overflows to trace contaminant loads in urban streams" considera dos eventos de lluvia diferentes a aquellos que están separados por al menos 6 horas de ausencia de precipitaciones. Yu, Zhang, An, & Furumai (2018) consideran en cambio un periodo de 4 horas sin precipitaciones para definir un evento de lluvia. Para el presente estudio, tomando en cuenta el tamaño de las cuencas de aporte, su respuesta hidrológica y el régimen de precipitaciones existente dentro de la zona, se ha definido un evento de lluvia a aquel que está precedido y seguido por al menos 2 horas de ausencia de precipitaciones.

Una vez definidos los eventos de lluvia se establecieron los parámetros que caracterizan a cada uno. Para cada evento se determinó: la precipitación total P_t , la intensidad máxima de precipitación a los cinco minutos I_{max} , la intensidad media de precipitación I_{med} , la duración del evento de lluvia D_{ll} , y la duración de la temporada seca antecedente a la lluvia D_s (Gooré Bi et al., 2015; Jean et al., 2018; Mailhot et al., 2015; Sandoval et al., 2013; Yu et al., 2013).

Los valores de máxima intensidad I_{max} dependen fuertemente del intervalo de duración sobre el cual se determina. En su investigación Sandoval et al., (2013) consideró una duración de 30 minutos para determinar la intensidad máxima del evento de lluvia. Este intervalo se definió tomando en cuenta el tiempo de concentración de la cuenca. La relación entre los parámetros de lluvia y DAC no variaron en su análisis para intensidades máximas definidas para otros intervalos de 5 y 15 minutos (Sandoval et al., 2013). En este sentido considerando que el tiempo de concentración de las cuencas de aporte es relativamente pequeño (10 – 15 minutos) se ha tomado la intensidad máxima de un evento de lluvia en un periodo de 5 minutos para definir el parámetro I_{max} (Gooré Bi et al., 2015).

Para realizar la predicción de los contaminantes en función de los parámetros de precipitación, se requiere también establecer las variables dependientes, es decir las relacionadas con las características de los DACs. Para definir estas variables se ha considerado que exista una cantidad de información tal que permita establecer relaciones entre los parámetros. De este modo se ha definido las siguientes variables para cada evento DAC: caudal máximo de descarga Q_{max} , conductividad promedio C_{med} , turbiedad promedio Tur_{med} , demanda química de oxígeno promedio DQO_{med} (Gooré Bi et al., 2015; Mailhot et al., 2015; Sandoval et al., 2013; Yu et al., 2013).

El valor de Q_{max} se ha obtenido según lo establecido en el ítem 2.2.1. Los parámetros C_{med} , Tur_{med} y DQO_{med} se obtuvieron de las concentraciones medias durante el



periodo de duración del DAC (ver ítem 2.2.2). La **Tabla 2.5** presenta el resumen de las variables consideradas tanto para el CCA como para la elaboración del modelo Lluvia – DAC mediante PLSR.

Tabla 2.5 Variables dependientes e independientes para el análisis de correlación canónica CCA y la elaboración del modelo de relación lluvia - DAC

Variables predictoras (Lluvia)	Variables dependientes (DAC)
P_t	Q_{max}
I_{max}	C_{med}
I_{med}	Tur_{med}
D_{II}	DQO_{med}
D_s	

Elaboración: Autor

Los resultados del modelo pueden emplearse en la evaluación de estrategias para la mitigación de los efectos del DAC en los cuerpos receptores. En este sentido algunas propuestas se enfocan a la implementación de tanques almacenamiento que retienen parte del volumen de agua cruda proveniente de la red de alcantarillado combinado para luego ser tratado en la PTAR (Jerves-Cobo et al., 2020; Lau et al., 2002; Ruan, 1999; Temprano & Tejero, 2002). Estos estudios emplean la modelación numérica y matemática como principal herramienta para evaluar las alternativas propuestas.

2.3.1 Análisis de correlación canónica

El Análisis de Correlación Canónica (CCA por sus siglas en inglés) es un método estadístico exploratorio multidimensional (Balzarini, Córdoba, Bruno, & Teich, 2015; Cuadras, 2007). El objetivo principal de CCA es la exploración de correlaciones de muestra entre dos conjuntos de variables cuantitativas observadas en las mismas unidades experimentales (Badii, Castillo, Cortez, Wong, & Villalpando, 2007; González et al., 2008). Muchas veces cada conjunto de variable es usado para representar un concepto el cual no puede ser medido directamente sino a través de varias variables o indicadores (Balzarini et al., 2015).

Notación

Considerando dos matrices X e Y de orden $n \times p$ y $n \times q$ respectivamente. Las columnas de X e Y corresponden a variables y las filas corresponden a las unidades experimentales. La columna j^{th} de la matriz X se denota por X^j , de igual forma la columna k^{th} de Y se denota por Y^k . Sin perder generalidad, se supondrá que las columnas de X e Y están estandarizadas (media 0 y varianza 1). Además, se asume que $p \leq q$ (en otras palabras, el grupo que contiene el menor número de variables se denota por X). Se denomina por S_{XX} y S_{YY} las matrices de covarianza para los conjuntos de variables X e Y respectivamente, y S_{XY} y S_{YX} la matriz de covarianza entre X e Y . La notación A^T representa la transpuesta del vector o matriz A .



Principio

La CCA clásica asume primero $p \leq n$ y $q \leq n$, entonces las matrices X e Y son de rango p y q columnas respectivamente. A continuación, el principio del CCA se presenta como un problema resuelto a través de un algoritmo iterativo.

La primera etapa del CCA consiste en encontrar dos vectores $a^1 = (a_1^1, \dots, a_p^1)^T$ y $b^1 = (b_1^1, \dots, b_q^1)^T$ que maximiza la correlación entre las combinaciones lineales:

$$U^1 = Xa^1 = a_1^1X^1 + a_2^1X^2 + \dots + a_p^1X^p$$

y

$$V^1 = Yb^1 = b_1^1Y^1 + b_2^1Y^2 + \dots + b_q^1Y^q$$

Asumiendo que los vectores a^1 y b^1 están normalizados de modo que:

$$var(U^1) = var(V^1) = 1$$

En otras palabras, el problema consiste en resolver:

$$\rho_1 = cor(U^1, V^1) = \max cor(X_a, Y_b),$$

Sujeto a la restricción

$$var(X_a) = var(Y_b) = 1$$

Las variables resultantes U^1 y V^1 son denominadas las primeras variables canónicas y ρ_1 es denominada la primera correlación canónica (González et al., 2008).

Las variaciones canónicas de orden superior y las correlaciones canónicas se pueden encontrar como un problema gradual. Para $s = 1, \dots, p$, se puede encontrar las correlaciones $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \dots \geq \rho_p$ con sus vectores correspondientes $(a^1, b^1), \dots, (a^p, b^p)$, maximizando

$$\rho_s = cor(U^s, V^s) = \max cor(X_a^s, Y_b^s) \text{ sujeto a } var(X_a^s) = var(Y_b^s) = 1$$

Bajo la restricción adicional

$$cor(U^s, U^t) = cor(V^s, V^t) = 0 \text{ para } 1 \leq t \leq s \leq p.$$

Aspectos matemáticos

Desde un punto de vista geométrico definamos:

$$P_X = X(X^T X)^{-1}X^T = \frac{1}{n}XS_{XX}^{-1}X^T \text{ y } P_Y = Y(Y^T Y)^{-1}Y^T = \frac{1}{n}YS_{YY}^{-1}Y^T$$



Los proyectores ortogonales en los tramos lineales de las columnas de X e Y respectivamente. Se sabe que:

- las correlaciones canónicas ρ_s son las raíces cuadradas positivas de los eigenvalores λ_s de $P_X P_Y$: $\rho_s = \sqrt{\lambda_s}$;
- los vectores U^1, \dots, U^p son los eigenvectores estandarizados correspondientes a los decrecientes eigenvalores $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_p$ de $P_X P_Y$;
- los vectores V^1, \dots, V^p son los eigenvectores estandarizados correspondientes a los decrecientes eigenvalores de $P_X P_Y$.

CCA Normalizado

El CCA no puede ser realizado cuando el número de unidades experimentales es menor que la máxima cantidad de variables en los dos set de datos ($n \leq \max(p, q)$). En realidad, cuando aumenta el número de variables, las mayores correlaciones canónicas son casi 1 debido a la recuperación de subespacios canónicos que no proporcionan información significativa. Por lo tanto, una condición estándar generalmente recomendada para CCA es (Eaton & Perlman, 1973) $n \geq p + q + 1$.

Además cuando las variables X^1, \dots, X^p y/o Y^1, \dots, Y^p están altamente correlacionadas, es decir, casi colineales, las matrices S_{XX} y/o S_{YY} respectivamente, tienden a estar mal condicionados y sus inversas no son confiables.

Una forma de lidiar con este problema consiste en incluir un paso de regularización en los cálculos. La regularización fue desarrollada por (Leurgans et al., 1993). S_{XX} y S_{YY} son reemplazados respectivamente por $\Sigma_{XX}(\lambda_1)$ y $\Sigma_{YY}(\lambda_2)$ definido por

$$\Sigma_{XX}(\lambda_1) = S_{XX} + \lambda_1 I_p \text{ y } \Sigma_{YY}(\lambda_2) = S_{YY} + \lambda_2 I_q$$

Los valores adecuados para los parámetros de regularización se determinan a través de una validación cruzada que permite ajustar dichos parámetros (González et al., 2008).

2.3.2 Regresión por mínimos cuadrados parciales PLSR

La regresión por mínimos cuadrados parciales tiene que ver con datos similares a los del CCA. Sin embargo, este tiene como objetivo explicar una o varias variables respuesta de uno de los grupos a través de las variables del otro grupo (González et al., 2008). PLSR presenta ventajas respecto de otros métodos de regresión (Gregoria, Aparicio, & Antonio, 1995; Mevik & Wehrens, 2007; Vega Vilca & Guzman, 2011).

El modelo de regresión PLSR es un potente método de regresión lineal, este se desarrolla para evitar, entre otros, el efecto de la multicolinealidad en las variables explicativas de una regresión, así como el problema que se presenta cuando el número de individuos es menor al número de variables (Gaviria, 2016; Gregoria et al.,



1995). También se suele emplear cuando existe relación entre las variables predictoras (Mevik & Wehrens, 2007). La multicolinealidad produce inestabilidad en los coeficientes de regresión. Esto suele ocurrir cuando se emplea un número relativamente grande de variables explicativas, por lo que su tratamiento es reducir la dimensionalidad de dicho conjunto de variables. El método más usado era el de los Componentes Principales PC, este enfoque aplicado a la regresión solía denominarse Regresión por Componentes Principales o PCR (Principal Components Regression) (Gregoria et al., 1995).

Por su parte, el objetivo perseguido por la modelización PLSR es la predicción de las variables dependientes. Este objetivo se traduce en un intento por maximizar la varianza explicada de dichas variables, por lo que PLSR puede ser más adecuado para fines predictivos (Bellosta, 2018; Gregoria et al., 1995). Wold, (1979) afirma que PLSR se orienta principalmente para el análisis causal predictivo en situaciones de alta complejidad pero con un conocimiento teórico poco desarrollado.

PLSR y PCR pretenden reducir la dimensionalidad, y, por tanto, hacer frente al problema que en muchas ocasiones presenta un conjunto de variables explicativas con un alto grado de multicolinealidad. Sin embargo, PCR tiene como objetivo recoger la máxima variabilidad o varianza de las variables explicativas, PLSR trata de realizar lo mismo, pero teniendo en cuenta además la relación entre X e Y. En otras palabras, PLSR es un método más orientado a la predicción que PCR (Gregoria et al., 1995).

El PLSR presenta ventajas en relación a la potencialidad del método en situaciones con muestras pequeñas, como es el caso del presente estudio. PLSR puede ser una poderosa herramienta de análisis por las mínimas exigencias en términos de escalas de medición, tamaño de las muestras y distribuciones residuales (Gregoria et al., 1995). El PLSR no precisa que los datos provengan de distribuciones normales o conocidas (Falk & Miller, 1992). Pero hay que advertir que aunque la hipótesis de normalidad de los datos raramente se encuentra en la realidad, y a pesar de que con esta técnica se puede obviar esta restricción, los resultados y decisiones basadas en ellos quedan claramente comprometidos.(Gregoria et al., 1995).

EL PLSR puede integrar múltiples variables dependientes e independientes (Abdi, 2003; Bertrand, 2005). Sin embargo, cada vez que se incluyen variables dependientes, el modelo pierde precisión y poder de predicción (Martínez Galera, Martínez Vidal, Garrido Frenich, & Gil García, 1997). Por lo tanto, se podrían formular múltiples modelos PLSR considerando en todos los casos las características de lluvia como entrada multivariada, y diferentes características DAC como salida individual (ver **Tabla 2.5**), ajustando los parámetros del modelo mediante un procedimiento de validación cruzada (Sandoval et al., 2013).



2.3.2.1 Construcción del Modelo PLSR

Para la construcción del modelo se requiere en primer lugar, determinar el número de componentes (variables latentes) que se pretenden emplear en la predicción de la variable. Para esto, se analiza el error cuadrático medio de predicción (RMSEP) usando validación cruzada. Por otro lado también se toma en cuenta el porcentaje de variabilidad explicada por cada uno de los componentes del modelo (Gaviria, 2016). En base a estos criterios se selecciona el número de componentes para la construcción del modelo PLSR.

Se construye un modelo PLSR para cada una de las variables dependientes relacionadas a las características de los DAC (**Tabla 2.5**). El resultado es una ecuación de predicción que permite estimar los valores de la variable dependiente a partir de combinaciones lineales de las variables predictoras (Gaviria, 2016).

La presente investigación emplea el software de análisis estadístico R (R-Core-Team, 2017) y el software InfoStat versión estudiantil (InfoStat-Team, 2019), para desarrollar los modelos de análisis de correlación canónica CCA y la regresión por mínimos cuadrados parciales PLSR.

Capítulo 3

Resultados y Discusión

3.1 Caracterización de la carga contaminante

Para la totalidad de las muestras analizadas durante todo el periodo de ensayos en las tres descargas (2017-2018), se obtuvo que la conductividad registrada se encuentra en el rango de 50 a 616 mS/cm, la turbiedad está en el rango de 9 a 378 NTU, la DBO_5 registra valores en el rango de 7 a 528 mg/l y la DQO en el rango de 40 a 1450 mg/l. En relación a los parámetros microbiológicos, los coliformes fecales están en el rango de 1.6×10^6 a 1.9×10^{10} , los coliformes totales se encuentran en el rango de 4.8×10^6 a 4.1×10^{10} . La **Figura 3.1** exhibe de manera gráfica los resultados de los datos recabados para cada uno de los DACs.

La descarga del Coliseo presenta en promedio valores más elevados de los parámetros de Turbiedad, DQO y DBO_5 en relación a los encontrados en las descargas El Vado y Multifamiliares **Figura 3.1 (b), (c) y (d)**, esto sugiere un mayor grado de contaminación relacionado con material en suspensión, microorganismos y materia orgánica proveniente del DAC Coliseo.

El promedio de DBO_5 para las descargas El Vado, Multifamiliares y Coliseo resultó en 92.75, 134.1 y 170.0 mg/l respectivamente **Figura 3.1 (d)**. Jerves-Cobo et al., (2018) determinó que los valores de DBO_5 para el tramo del río Tomebamba entre las descargas Coliseo y Multifamiliares no supera los 2.5 mg/l. Se evidencia un significativo aporte de contaminantes al río por parte de estas descargas.

En relación a la conductividad **Figura 3.1 (a)**, los valores para las tres descargas se concentran alrededor de 120 uS/cm a 240 uS/cm, pero la descarga Multifamiliares y El Vado presenta datos más dispersos que la descarga del Coliseo. La medida de conductividad nos da una idea de la cantidad de sólidos disueltos en el agua.

Jerves-Cobo et al., (2018) registraron valores entre 92 y 95 uS/cm en el tramo de estudio durante la época lluviosa. La conductividad promedio de las aguas que descargan los DAC (120 uS/cm a 240 uS/cm) es considerablemente superior a la conductividad encontrada en el río Tomebamba.

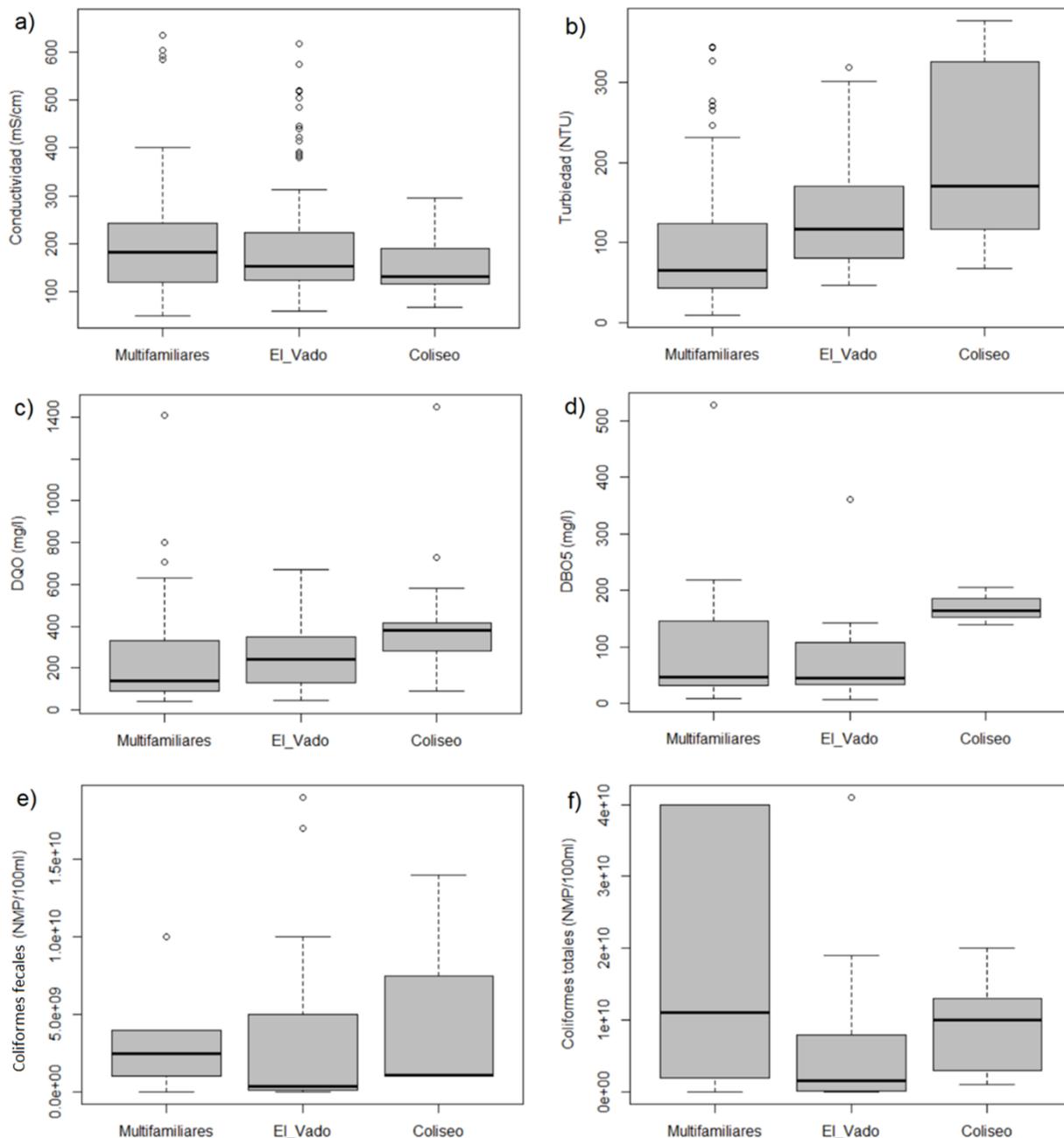
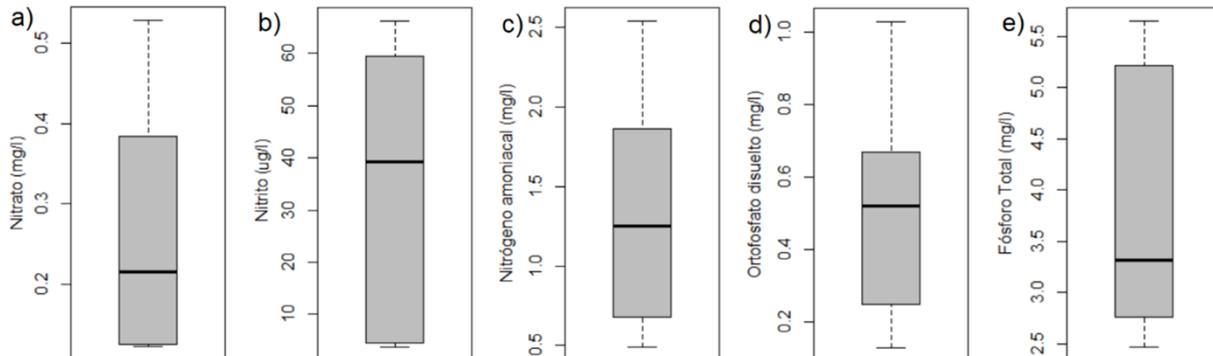


Figura 3.1 Análisis de las muestras tomadas en las tres descargas en todo el periodo de estudio 2017-2018 (a) conductividad, (b) demanda química de oxígeno, (c) turbiedad, (d) demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días, (e) coliformes fecales, (f) coliformes totales.

Elaboración: Autor

En relación a los parámetros de coliformes fecales, para las tres descargas se registraron valores de 1.6×10^6 a 1.9×10^{10} NMP, **Figura 3.1 (e)**. Jerves-Cobo et al., (2018) en su investigación determinó que los valores de coliformes fecales en el río Tomebamba para la temporada húmeda están en el orden de 1×10^5 a 2.5×10^5 , para el tramo comprendido entre unos 500m aguas arriba de la descarga Coliseo y 500m aguas debajo de la descarga Multifamiliares. Los desbordamientos de alcantarillado combinado que vierten en el Tomebamba durante su paso por la ciudad contribuyen al deterioro de la calidad de agua del río durante el periodo de lluvia.

Para dos eventos DAC en la descarga El Vado (Ver ANEXO A. Calendario de muestreo) se analizaron también los parámetros, nitratos (NO_3), nitritos (NO_2), nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3 - \text{N}$), orto fosfato disuelto (PO_4) y fósforo total (P). Los resultados se muestran en la **Figura 3.2**.



Se registraron 2 eventos DAC: 4 de abril de 2018 y 9 de mayo de 2018, 5 muestras en cada evento

Figura 3.2 Análisis de las muestras tomadas en la descarga El Vado. (a) Nitrato, (b) nitrito, (c) nitrógeno amoniacal, (d) orto fosfato disuelto (e) fósforo total.

Elaboración: Autor

Los valores para nitrato NO_3 , obtenidos en los dos últimos ensayos realizados en la descarga de El Vado en 2018 están en el rango de 0.12 a 0.53 mg/l **Figura 3.2 (a)**. Jerves-Cobo et al., (2018) determinó que los valores de NO_3 varían en el rango de 0.2 a 0.3 mg/l aproximadamente para el tramo de río comprendido entre las DAC Coliseo y Multifamiliares durante la temporada húmeda. El valor medio de nitrato registrado en la descarga El Vado (0.26 mg/l), está dentro del rango de NO_3 determinado para el río.

La concentración de nitritos NO_2 en la descarga El Vado está en el orden de 3.74 a 66.27 µg/l **Figura 3.2 (b)**. Según Jerves-Cobo et al., (2018) los valores de NO_2 para el tramo de río correspondiente a las 3 descargas analizadas varía entre 4.0 y 9.0 µg/l aproximadamente en la temporada de lluvia. Los valores en las DACs son elevados respecto a los registrados en el río.

El nitrógeno amoniacal varía entre 0.49 a 2.54 mg/l con un valor medio de 1.34 mg/l **Figura 3.2 (c)**. El ortofosfato PO_4 está en el rango de 0.13 a 1.03 mg/l con un valor medio de 0.49 mg/l **Figura 3.2 (d)**. Jerves-Cobo et al., (2018) registró valores de PO_4 en el rango de 0.01 a 0.02 mg/l en la temporada húmeda. Finalmente respecto del fósforo total tomado en las muestras, este se encuentra en el orden de 2.47 a 5.65 mg/l con un valor medio de 3.77 mg/l **Figura 3.2 (e)**.

Es evidente que las tres descargas contribuyen al deterioro de las aguas del río Tomebamba durante los eventos de DAC.

3.1.1 Relación DBO₅/DQO

La determinación de relación DBO₅/DQO, influye a la hora de definir el tipo de tratamiento más adecuado. Una de las características importantes de las aguas residuales es su biodegradabilidad, y de esta depende la factibilidad para la aplicación de los métodos biológicos. La relación DBO₅/DQO para la totalidad de las muestras analizadas en el presente estudio se encuentra en el rango de 0.04 a 0.92. Este resultado evidencia una alta variación en la tipología del agua, desde aguas con gran cantidad de materia biodegradable hasta aguas con alto grado de contaminación química (Jerves-Cobo et al., 2020). La **Tabla 3.1** muestra los resultados catalogados por descarga.

Tabla 3.1 Relación DBO₅/DQO para las muestras tomadas en todo el periodo de estudio, 21 de marzo de 2017 a 09 de mayo de 2018.

DAC	max	min	DBO ₅ /DQO promedio	Desv estandar
Multifamiliares	0.92	0.17	0.52	0.33
El Vado	0.81	0.04	0.38	0.24
Coliseo	0.63	0.34	0.44	0.16

Elaboración: Autor

Se visualiza que la descarga Multifamiliares y El Vado presentan un mayor rango de variabilidad, es decir, estas aguas exhiben un mayor rango en la tipología de los contaminantes. La descarga Coliseo en cambio presenta valores dentro de un rango menos extenso.

Los menores valores de relación DBO₅/DQO se obtuvieron durante el ensayo realizado el 14 de noviembre de 2017 en la descarga El Vado. Este es el único ensayo que se realizó fuera del periodo de febrero a mayo, considerado como temporada húmeda. Durante este evento, se registraron valores de DBO₅/DQO entre 0.04 y 0.24, lo cual evidenció una carga contaminante poco biodegradable. Este resultado puede haberse dado debido a que el ensayo se realizó durante las primeras lluvias registradas en el mes de noviembre. El efecto de las primeras lluvias contribuye al lavado, re-suspensión y arrastre de una gran cantidad de contaminantes no biodegradables provenientes de las aguas de escorrentía (Gooré Bi et al., 2015; Passerat et al., 2011; Sandoval et al., 2013).

3.1.2 Norma de calidad ambiental y descarga de efluente.

La legislación ecuatoriana establece criterios de calidad de agua para la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce (MAE, 2017). En este sentido, limita únicamente las concentraciones de los valores medios diarios de DBO₅ y DQO a 100 mg/l y 200 mg/l respectivamente, esto si no se dispone de estudios a detalle en el cuerpo receptor. La **Figura 3.3** presenta el porcentaje de los ensayos que cumplen con la normativa para la descarga de efluentes.

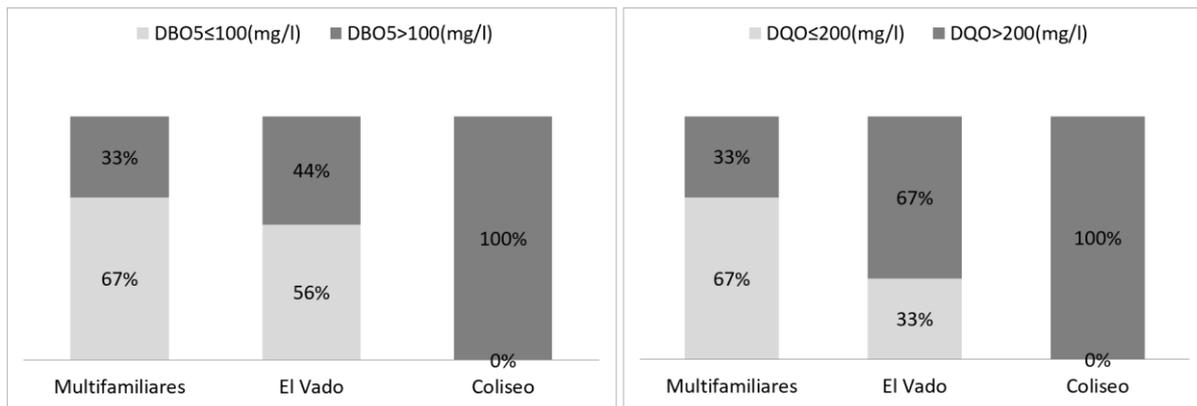


Figura 3.3 Comparación de los resultados de DBO₅ y DQO con la normativa ambiental

Elaboración: Autor

En la descarga de los Multifamiliares un 67% de los ensayos cumple lo establecido en la normativa, en relación al parámetro DBO₅ y DQO. Este colector es el que menor carga contaminante por unidad de volumen aporta al cuerpo receptor.

En la descarga El Vado el 56% de los ensayos cumple la restricción que plantea la normativa en relación a la DBO₅. En términos de la DQO únicamente el 33% de los ensayos cumplen con lo requerido. Especial cuidado se debe tener con esta DAC debido a la considerable área de aporte que maneja. Esto a su vez se traduce a magnitudes de caudales importantes y por ende a elevadas cargas contaminantes.

La descarga del Coliseo presenta valores elevados de DBO₅ y DQO. En esta descarga, ninguno de los parámetros DBO₅ ni DQO que fueron analizados, satisface la normativa ambiental para descarga de efluentes en cuerpos receptores de agua dulce.

3.2 Dinámica de los contaminantes durante el DAC

La **Figura 3.4**, **Figura 3.5**, **Figura 3.6** muestran los resultados de la variación de los parámetros durante los eventos DAC en las descargas El Vado, Multifamiliares y Coliseo según los criterios (i) y (ii) establecidos en el ítem 2.2. Se evidencia gran variabilidad de los parámetros conductividad, turbiedad y DQO durante los eventos de DAC.

3.2.1.1 Descarga El Vado

En el ensayo (i) realizado en la descarga El Vado, se obtuvo que los valores de conductividad están en el rango de 113 a 313 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Figura 3.4 a(i)**). Para el ensayo correspondiente al criterio (ii) en esta misma descarga, se obtuvo registros de conductividad en el orden de 379 a 616 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Figura 3.4 a(ii)**), este último valor corresponde al mayor registrado de la totalidad de las muestras en las tres descargas.

La turbiedad en las muestras del ensayo (i) de la descarga El Vado (**Figura 3.4 b(i)**) se encuentra en un rango de variación de 65 a 132 NTU, en tanto en el ensayo (ii) el rango fluctúa entre 72 a 170 NTU (**Figura 3.4 b(ii)**). La DQO en las muestras del

ensayo (i) de la descarga El Vado (**Figura 3.4 c(i)**) se encuentra en un rango de variación de 130 a 240 mg/l, en tanto que en el ensayo (ii) el rango fluctúa entre 248 a 670 mg/l (**Figura 3.4 c(ii)**). En relación a la DBO₅ en la descarga El Vado, se ha registrado un valor de 41mg/l para el evento (i) (**Figura 3.4 d(i)**) y unos valores de 74 y 361 mg/l en el evento (ii) (**Figura 3.4 d(ii)**).

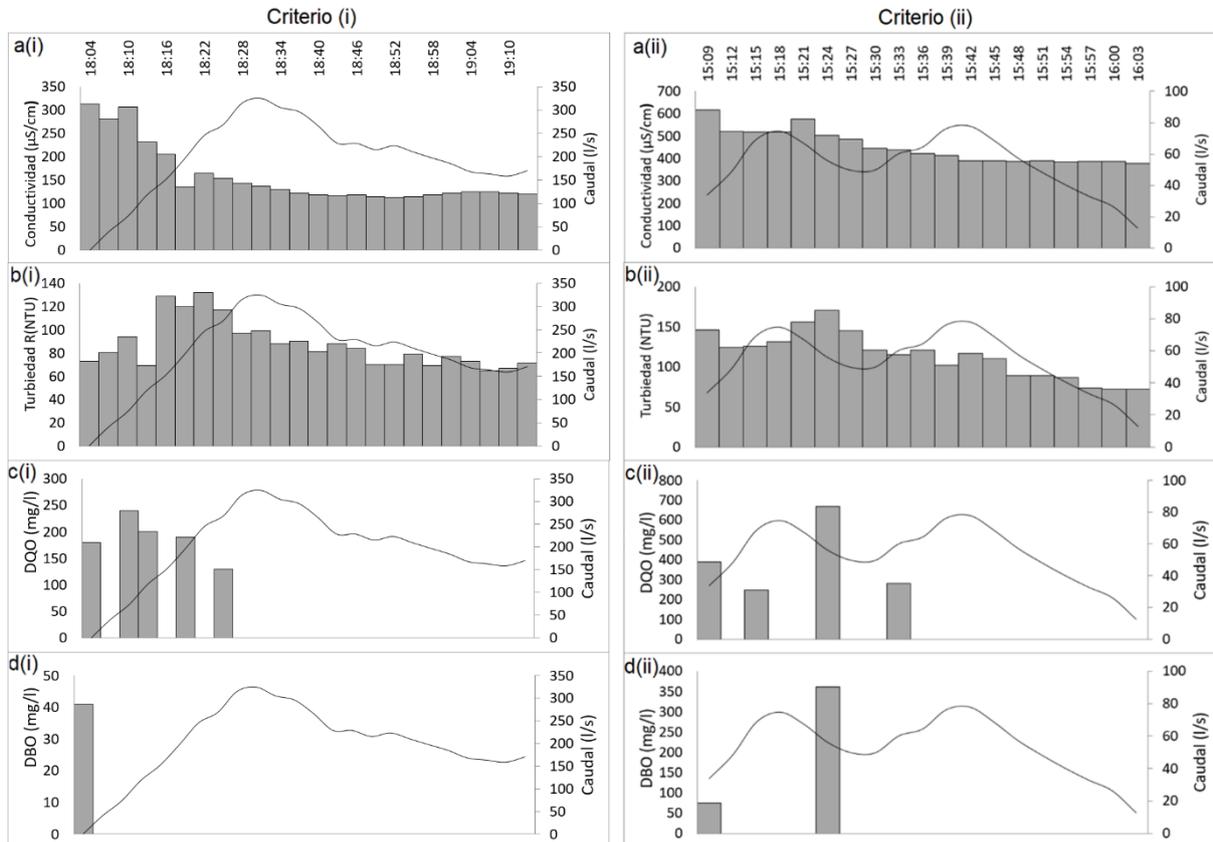


Figura 3.4 Variación de los parámetros de calidad de agua en la descarga El Vado.
Criterio (i) evento Va-13. Criterio (ii) evento Va-3

Elaboración: Autor

Pese a que el caudal pico es superior en el evento (i), la conductividad, turbiedad, DBO₅ y DQO, son mayores en el evento (ii). Esto sugiere que los valores de concentración de contaminantes, no dependen de la magnitud del evento DAC en términos de caudales de descarga.

3.2.1.2 Descarga Multifamiliares

En la descarga Multifamiliares los valores de conductividad están en el orden de 97 a 243 $\mu\text{S/cm}$ para el ensayo (i) (**Figura 3.5 a(i)**). El rango de conductividad registrada para las muestras correspondientes al ensayo (ii) está entre 93 a 256 $\mu\text{S/cm}$ (**Figura 3.5 a(ii)**). No se distingue mayor variación en el rango de variabilidad de la conductividad para los ensayos (i) y (ii).

En relación a la turbiedad en el ensayo (i) las muestras registran valores entre 32 a 74 NTU, en tanto que para el ensayo (ii) el rango está entre 68 a 378 NTU. Este último valor es el mayor registrado durante el análisis de todas las muestras de las tres descargas.

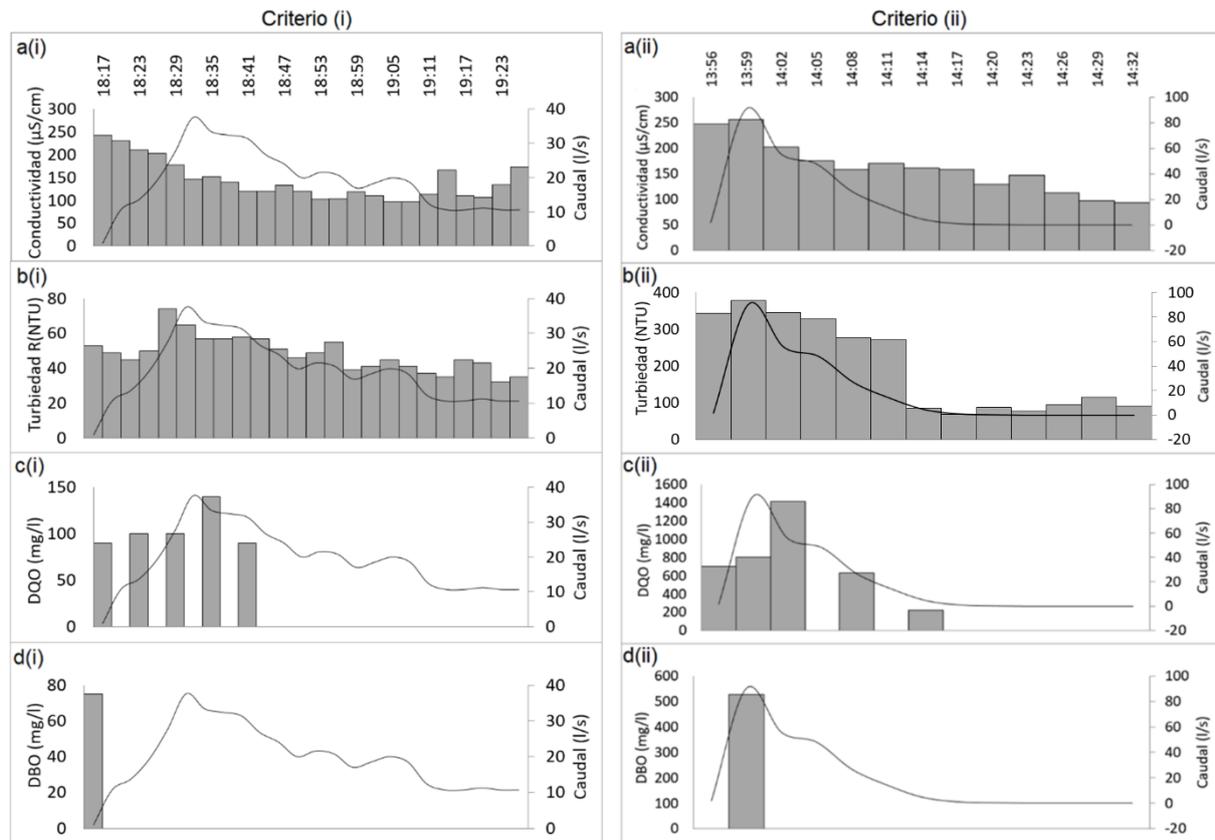


Figura 3.5 Variación de los parámetros de calidad de agua en la descarga Multifamiliares.

Criterio (i) evento Mu-14. Criterio (ii) evento Mu-4

Elaboración: Autor

Respecto de los valores de DQO y DBO₅, el evento Mu-4 (**Figura 3.5 c(ii) y d(ii)**), no cumple con la normativa nacional de descarga de efluentes, la cual establece un límite para las concentraciones de DBO₅ y DQO a 100 mg/l y 200 mg/l respectivamente (MAE, 2017). El valor de DBO₅ registrado en el evento (ii) **Figura 3.5 d(ii)** es de 528 mg/l, este corresponde al máximo registrado de entre todas las muestras analizadas en las tres descargas.

3.2.1.3 Descarga Coliseo

Pese a que el caudal en el evento (ii) es bastante menor en que el evento (i), la **Figura 3.6** muestra que los valores de conductividad, turbiedad, DQO y DBO₅ registrados en las muestras del evento (ii) son superiores a los encontrados en las muestras del evento (i).

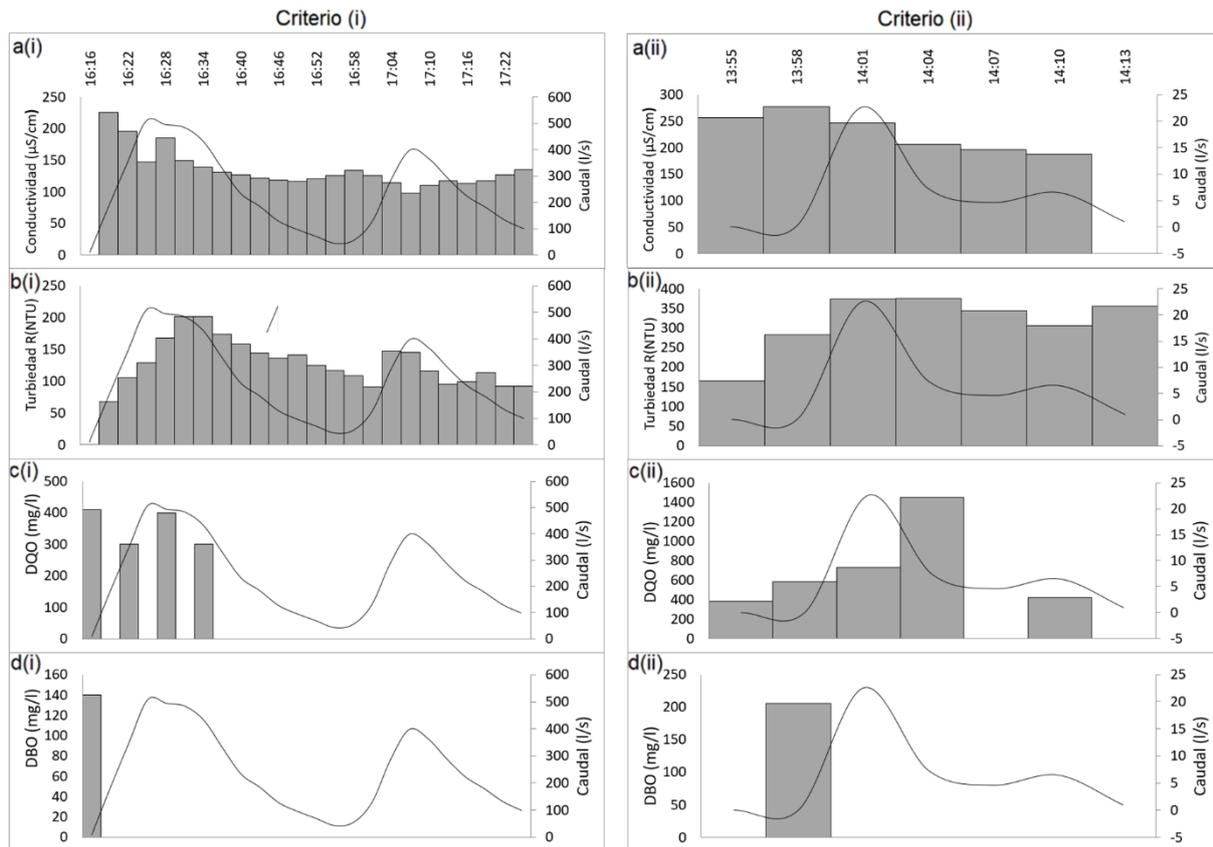


Figura 3.6 Variación de los parámetros de calidad de agua en la descarga Coliseo.

Criterio (i) evento Co-12. Criterio (ii) evento Co-5

Elaboración: Autor

La máxima DQO registrada en el evento (ii) de la descarga Coliseo resulta en 1459 mg/l según se observa en la **Figura 3.6 d(ii)**. Este valor corresponde al máximo registrado de entre todas las muestras analizadas en las tres descargas.

3.2.1.4 Características comunes en las tres descargas

Se ha identificado algunas características de los contaminantes que se observan en todos los seis eventos analizados, independientemente de la descarga, así como del ensayo tipo (i) o (ii). Estas características se analizan a continuación:

La **Figura 3.4 a(i)** y **a(ii)**, **Figura 3.5 a(i)** y **a(ii)** y **Figura 3.6 a(i)** y **a(ii)** evidencian que en las tres descargas los mayores valores de conductividad se presentan entre, la parte inicial del evento de DAC y el valor máximo de caudal del hidrograma de descarga. Esto supone un mayor grado de contaminación relacionada con las sales disueltas al inicio del evento en todos los eventos DAC analizados.

Se observa en la **Figura 3.4 b(i)** y **b(ii)**, **Figura 3.5 b(i)** y **b(ii)** y **Figura 3.6 b(i)** y **b(ii)** que en las tres descargas se presentan valores elevados de turbiedad relativamente cerca del caudal pico del hidrograma de descarga. La turbiedad se relaciona con la carga de materia suspendida en el agua residual. El aumento de turbiedad en el tramo



máximo del hidrograma puede deberse al proceso de re-suspensión de material sedimentado en las conducciones debido al aumento de fuerza tractiva provocado por el incremento de caudal. Passerat et al., (2011) en su estudio “Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River” determinó que alrededor del 75% de la materia suspendida encontrada en la descarga de alcantarillado combinado provenía de la re-suspensión de partículas sedimentadas en los conductos. Passerat et al., (2011) también determinó que la intensidad de la precipitación influye en el porcentaje de materia suspendida encontrada en el agua residual durante la descarga.

3.3 Construcción de modelos de predicción de contaminantes a partir de los datos de precipitación

3.3.1 Análisis de correlación canónica CCA

3.3.1.1 Descarga El Vado

Los resultados del análisis correlacional de Pearson entre las variables de lluvia y DAC para la descarga El Vado se presentan en la **Tabla 3.2.** y de manera gráfica en la **Figura 3.7:**

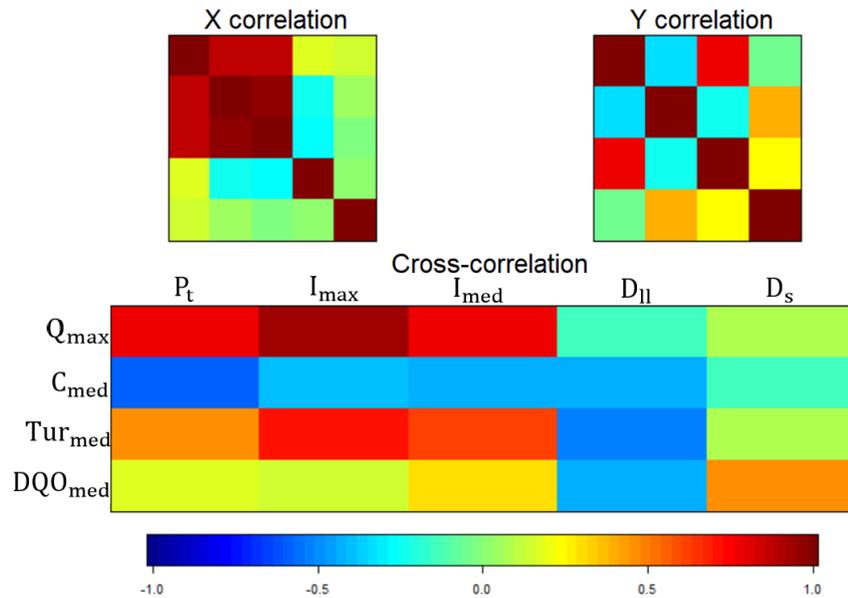
Tabla 3.2 Matriz de correlación entre las variables de lluvia y DAC en la descarga El Vado

	P_t	I_{max}	I_{med}	D_{II}	D_s	Q_{max}	C_{med}	Tur_{med}	DQO_{med}
P_t	1.00	0.87	0.87	0.16	0.14	0.78	-0.58	0.46	0.18
I_{max}	0.87	1.00	0.95	-0.23	0.04	0.91	-0.39	0.69	0.14
I_{med}	0.87	0.95	1.00	-0.28	-0.03	0.77	-0.43	0.61	0.29
D_{II}	0.16	-0.23	-0.28	1.00	0.00	-0.13	-0.42	-0.51	-0.42
D_s	0.14	0.04	-0.03	0.00	1.00	0.07	-0.15	0.08	0.45
Q_{max}	0.78	0.91	0.77	-0.13	0.07	1.00	-0.33	0.76	-0.05
C_{med}	-0.58	-0.39	-0.43	-0.42	-0.15	-0.33	1.00	-0.24	0.39
Tur_{med}	0.46	0.69	0.61	-0.51	0.08	0.76	-0.24	1.00	0.25
DQO_{med}	0.18	0.14	0.29	-0.42	0.45	-0.05	0.39	0.25	1.00

Elaboración: Autor

La **Tabla 3.3** ilustra los resultados del análisis de correlación canónica. Aparentemente sólo dos variables canónicas L(1) y L(3) son estadísticamente significativas ($p - \text{valor} \approx 0$). Para las dos variables canónicas la correlación es cercana a 1. Esto quiere decir que dos correlaciones canónicas serían suficientes para medir la asociación entre las variables de lluvia y DAC (Balzarini et al., 2015).

La **Tabla 3.4(a)** muestra las cargas canónicas (ρ) obtenidas entre L(1) y L(3) y las características de lluvia (variables independientes). Por otro lado, **Tabla 3.4(b)** muestra las cargas canónicas obtenidas entre las variables canónicas L(1) y L(3) y las características del DAC (variables respuesta).



La gama de colores indica el grado de correlación según la escala gráfica

Figura 3.7 Correlación entre las variables de lluvia y DAC – Descarga El Vado

Elaboración: Autor

Tabla 3.3 Correlaciones canónicas – El Vado

	L (1)	L (2)	L (3)	L (4)
R	1.000	1.000	1.000	0.593
R ²	1.000	1.000	1.000	0.351
λ	106.37	0.00	36.07	0.43
gl	20	12	6	2
p-valor	0.000	1.000	2,7 E⁻⁶	0.805

L: variables canónicas, R: correlación canónica, λ : estadístico asociado a un p-valor, gl: grados de libertad, p – valor: significancia estadística.

Elaboración: Autor

Tabla 3.4 Correlaciones (cargas canónicas ρ) entre (a) variables explicativas de lluvia y (b) variables respuesta, con las variables canónicas significativas L(1) y L(3) - descarga El Vado

	a)		b)		
	L(1)	L(3)	L(1)	L(3)	
P _t	0.582	-0.573	Q _{max}	0.992	0.03
I _{max}	0.948	-3E-04	C _{med}	-0.441	0.252
I _{med}	0.626	0.219	Tur _{med}	0.809	0.503
D _{II}	0.026	-0.832	DQO _{med}	-0.238	0.123
D _s	0.263	-0.392			

Elaboración: Autor

3.3.1.2 Descarga Multifamiliares

La **Tabla 3.5** y la **Figura 3.8** muestran los resultados del análisis correlacional de Pearson para las variables de lluvia y DAC en la descarga Multifamiliares.

Tabla 3.5 Matriz de correlación entre las variables de lluvia y DAC en la descarga Multifamiliares

	P_t	I_{max}	I_{med}	D_{ll}	D_s	Q_{max}	C_{med}	Tur_{med}	DQO_{med}
P_t	1.00	0.47	0.16	0.65	-0.10	0.27	-0.47	0.07	-0.03
I_{max}	0.47	1.00	0.67	-0.29	0.12	0.73	-0.25	0.63	0.36
I_{med}	0.16	0.67	1.00	-0.56	0.30	0.41	-0.30	0.89	0.71
D_{ll}	0.65	-0.29	-0.56	1.00	-0.37	-0.34	-0.21	-0.56	-0.39
D_s	-0.10	0.12	0.30	-0.37	1.00	-0.08	0.68	0.96	0.46
Q_{max}	0.27	0.73	0.41	-0.34	-0.08	1.00	-0.47	0.11	-0.25
C_{med}	-0.47	-0.25	-0.30	-0.21	0.68	-0.47	1.00	0.15	0.24
Tur_{med}	0.07	0.63	0.89	-0.56	0.96	0.11	0.15	1.00	0.93
DQO_{med}	-0.03	0.36	0.71	-0.40	0.46	-0.25	0.24	0.93	1.00

Elaboración: Autor

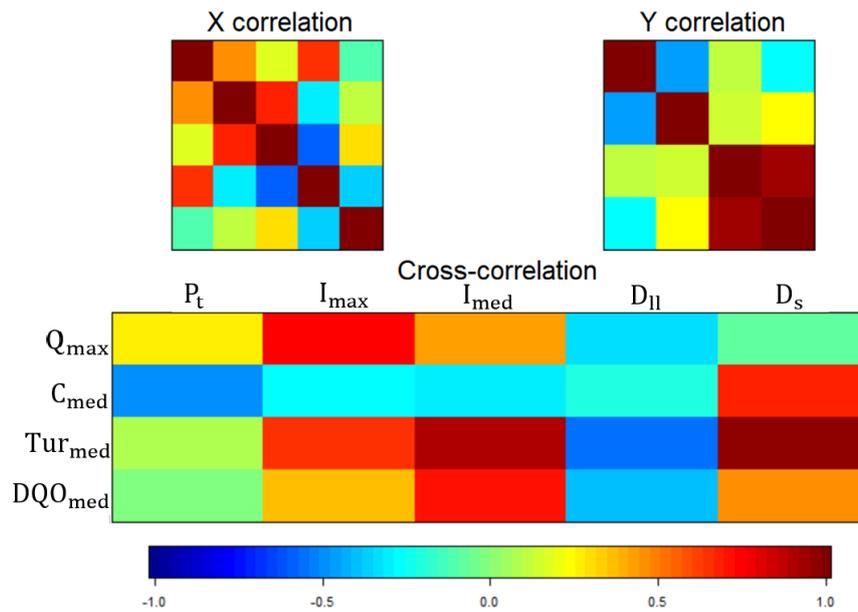


Figura 3.8 Correlación entre las variables de lluvia y DAC – Descarga Multifamiliares

Elaboración: Autor

3.3.1.3 Descarga Coliseo

La tabla y la figura siguientes presentan los resultados del análisis de correlación de Pearson entre las variables de lluvia y variables de DAC, para la descarga Coliseo.

Tabla 3.6 Matriz de correlación entre las variables de lluvia y DAC en la descarga Coliseo

	P_t	I_{max}	I_{med}	D_{ll}	D_s	Q_{max}	C_{med}	Tur_{med}	DQO_{med}
P_t	1.00	0.88	0.17	0.99	0.98	0.92	-0.81	-0.87	-0.36
I_{max}	0.88	1.00	0.61	0.82	0.96	0.63	-0.44	-0.54	0.12
I_{med}	0.17	0.61	1.00	0.05	0.36	-0.22	0.44	0.33	0.86
D_{ll}	0.99	0.82	0.05	1.00	0.95	0.96	-0.88	-0.93	-0.47
D_s	0.98	0.96	0.36	0.95	1.00	0.83	-0.68	-0.76	-0.17
Q_{max}	0.92	0.63	-0.22	0.96	0.83	1.00	-0.97	-0.99	-0.69
C_{med}	-0.81	-0.44	0.44	-0.88	-0.68	-0.97	1.00	0.99	0.84
Tur_{med}	-0.87	-0.54	0.33	-0.93	-0.76	-0.99	0.99	1.00	0.77
DQO_{med}	-0.36	0.12	0.86	-0.47	-0.17	-0.69	0.84	0.77	1.00

Elaboración: Autor

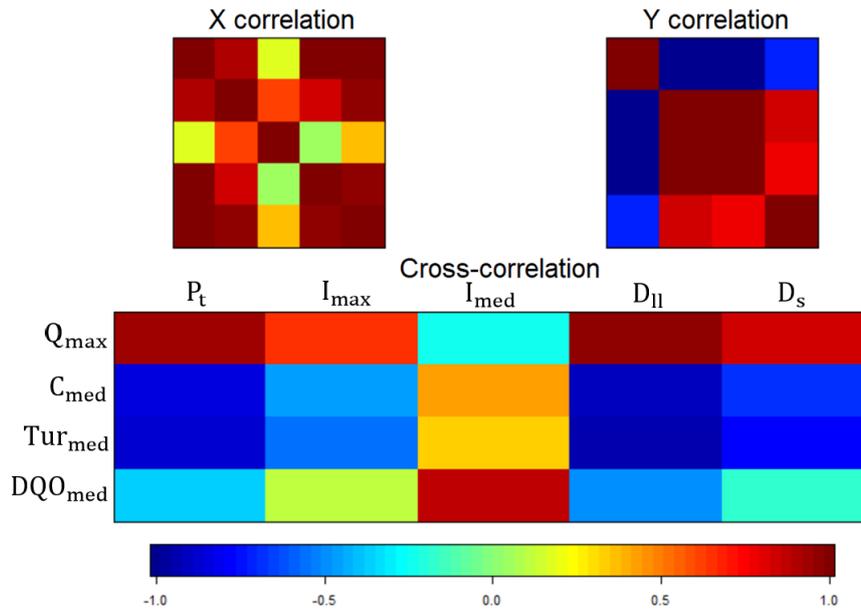


Figura 3.9 Correlación entre las variables de lluvia y DAC – Descarga Coliseo
Elaboración: Autor

3.3.1.4 Discusión respecto del análisis de correlación y CCA

Con respecto del CCA presentado para la descarga El Vado, en la **Tabla 3.4(a)** y **Tabla 3.4(b)** los valores de ρ mayores que 0.4-0.5 entre L(1) y L(3) y las características de lluvia y DAC, indican posible influencia de la lluvia en las variables del DAC (Sandoval et al., 2013). Del análisis de L(1), la máxima intensidad de lluvia I_{max} , la intensidad media I_{med} y la precipitación total P_t , parecen tener influencia sobre las variables del DAC Q_{max} (mayor influencia) y Turbiedad media Tur_{med} (menor influencia). Del análisis de L(3), se determina que la duración de la lluvia D_{II} y la precipitación total P_t se relacionan con los valores de turbiedad media Tur_{med} .

Como se puede observar en la matriz de correlación para las descargas El Vado y Multifamiliares (**Tabla 3.2** y **Tabla 3.5**), la intensidad máxima de lluvia I_{max} y en menor grado, la intensidad promedio I_{med} parecen tener influencia en el valor del caudal máximo de descarga Q_{max} . Sandoval et al., (2013) en su estudio “The evaluation of rainfall influence on combined sewer overflows characteristics: the Berlin case study” encontró que la intensidad máxima y promedio de precipitación se relaciona con el volumen de agua en el DAC, con el caudal máximo y con el caudal promedio de descarga. En la descarga Coliseo, el Q_{max} parece estar relacionado con el parámetros de lluvia I_{max} y con la precipitación total P_t .

En las descargas El Vado y Multifamiliares, la intensidad máxima I_{max} y promedio I_{med} , parecen influir en los valores de la turbiedad promedio Tur_{med} (**Tabla 3.2** y **Tabla 3.5**). La turbiedad permite tener una idea de la cantidad de material suspendido (Murillo, 2009), por lo que a mayor intensidad de lluvia correspondería un mayor arrastre de sólidos. Sandoval et al., (2013) encontró relación entre I_{max} e I_{med} con los valores de sólidos suspendidos totales TSS.



En las tres descargas, la precipitación total P_t parece estar relacionada negativamente con los valores de conductividad promedio C_{med} (**Tabla 3.2**, **Tabla 3.5** y **Tabla 3.6**),. Sandoval et al., (2013) en su estudio encontró que la conductividad promedio se relaciona mayormente con la altura de precipitación total y en menor grado con la duración del evento de lluvia.

En la descarga El Vado y Multifamiliares, la DQO_{med} se relaciona con la intensidad media de la precipitación I_{med} y con la duración de la temporada seca previa al evento de precipitación, D_s (**Tabla 3.2**, **Tabla 3.5**). El D_s puede influir en la cantidad de material de arrastre por escorrentía y re suspensión de material depositado en los conductos de drenaje ocasionando mayores cargas de contaminación (Gooré Bi et al., 2015; Passerat et al., 2011; Sandoval et al., 2013). En la descarga Coliseo la DQO se relaciona únicamente con el parámetro I_{med} .

En las tres descargas, la DQO se relaciona también con la duración del evento de precipitación D_{II} (relación negativa) **Tabla 3.2**, **Tabla 3.5** y **Tabla 3.6**).

Los resultados de las correlaciones entre los parámetros de lluvia y DAC para la descarga Multifamiliares, concuerdan con los resultados obtenidos para la descarga El Vado.

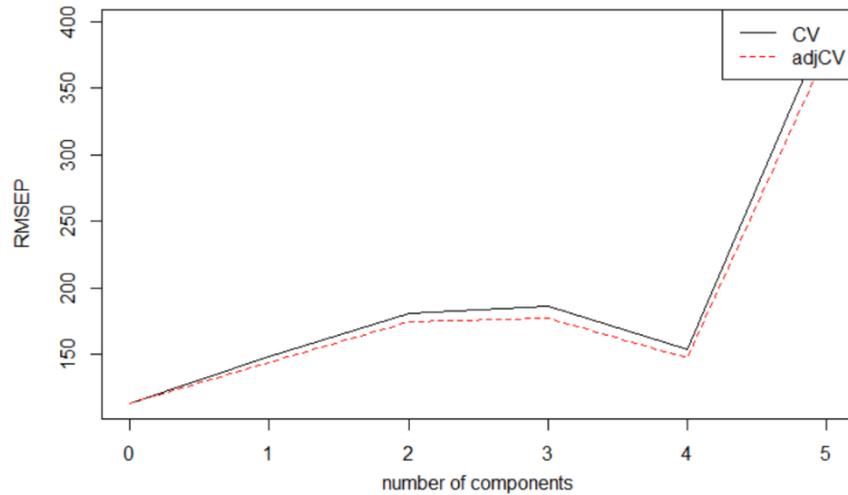
Los resultados en la descarga de El Coliseo evidencian que algunas de las relaciones lluvia – DAC no son consistentes con los resultados obtenidos en las descargas El Vado y Multifamiliares, los cuales fueron muy similares entre sí. Esto puede ser debido a que esta descarga se sustenta únicamente en 3 ensayos de DAC, a diferencia de las otras dos descargas donde se dispone de más ensayos (ANEXO A. Calendario de muestreo). En este sentido, dado el pequeño tamaño muestral, los resultados referentes a la descarga Coliseo deben ser interpretados con cautela.

3.3.2 Regresión por mínimos cuadrados parciales PLSR

3.3.2.1 Descarga El Vado

A continuación, se presenta la construcción del modelo PLSR para el contaminante DQO_{med} en la DAC El Vado. De la misma manera es como se determinaron los modelos de predicción PLSR para la conductividad C_{med} , para la turbiedad Tur_{med} y para el caudal máximo de descarga Q_{max} en todas las descargas. (Ver la sección 2.3.2)

La **Figura 3.10** presenta el error cuadrático medio de predicción (RMSEP) para la variable DQO_{med} . Por otro lado la **Tabla 3.7** muestra el porcentaje de variabilidad explicada por cada uno de los componentes del modelo. En este caso considerando la reducción del RMSEP y los niveles de variabilidad explicada se determinaron 4 componentes para la construcción del modelo PLS para predicción de DQO_{med} en la descarga El Vado.



CV: es el CV ordinario estimado. **adjCV:** es la estimación de CV corregida por sesgo. (Mevik & Wehrens, 2007)

Figura 3.10 Error cuadrático medio de predicción en función del número de componentes para el modelo PLSR de predicción de DQO_{med} en la descarga El Vado.

Elaboración: Autor

Tabla 3.7 Porcentajes de variabilidad de los parámetros de lluvia (X) explicada por cada componente del modelo PLSR, para la predicción de la DQO_{med} en la descarga El Vado

	1 comp	2 comp	3 comp	4 comp	5 comp
X	41.85	76.27	81.32	99.66	100
DQO_{med}	32.1	42.67	66.39	71.13	71.27

Elaboración: Autor

La **Figura 3.12** muestra la validación del modelo PLSR de 4 componentes para la predicción de DQO_{med} en la descarga El Vado.

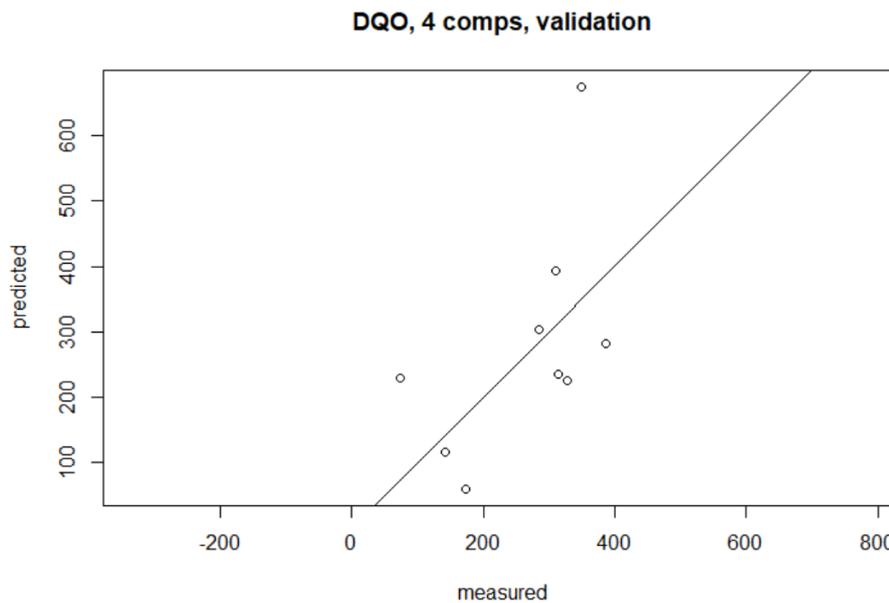


Figura 3.11 Validación del modelo PLS, valores medidos y predicciones – Descarga El Vado

Elaboración: Autor



Luego de realizar el análisis PLSR para todas las variables dependientes (características de DAC) se obtuvieron las ecuaciones de ajuste que permiten estimar los parámetros DQO_{med} , C_{med} , Tur_{med} , Q_{max} en función de las características de la precipitación en la descarga El Vado:

$$DQO_{med} = 16.281 * P_t - 11.664 * I_{max} + 23.326 * I_{med} - 1.399 * D_{ll} + 3.480 * D_s + 279.93 \quad R^2 = 0.71$$

$$C_{med} = -8.428 * P_t - 0.584 * I_{max} - 26.091 * I_{med} - 0.989 * D_{ll} + 2.079 * D_s + 373.14 \quad R^2 = 0.62$$

$$Tur_{med} = 0.404 * P_t + 1.792 * I_{max} + 0.513 * I_{med} - 0.516 * D_{ll} + 0.207 * D_s + 170.93 \quad R^2 = 0.60$$

$$Q_{max} = 7.710 * P_t + 33.739 * I_{max} + 9.892 * I_{med} + 1.217 * D_{ll} + 2.300 * D_s - 29.93 \quad R^2 = 0.81$$

El modelo PLSR para la conductividad se construyó empleando 4 componentes los cuales explican un 97.95% de la variabilidad de los datos. Para el modelo de la turbiedad y caudal máximo Q_{max} se empleó 2 componentes los cuales explican un 92.23% y un 92.24% de variabilidad de los datos respectivamente. El coeficiente de determinación R^2 para los modelos predictivos varía entre 0.60 a 0.81.

Los resultados del PLSR, son exhibidos también a través de un triplot (**Figura 3.12**) que representa en una misma gráfica los casos, las variables respuesta (DAC: Q_{max} , C_{med} , Tur_{med} , DQO_{med}), y las variables predictoras (lluvia: P_t , I_{max} , I_{med} , D_{ll} , D_s) medidas sobre los mismos casos.

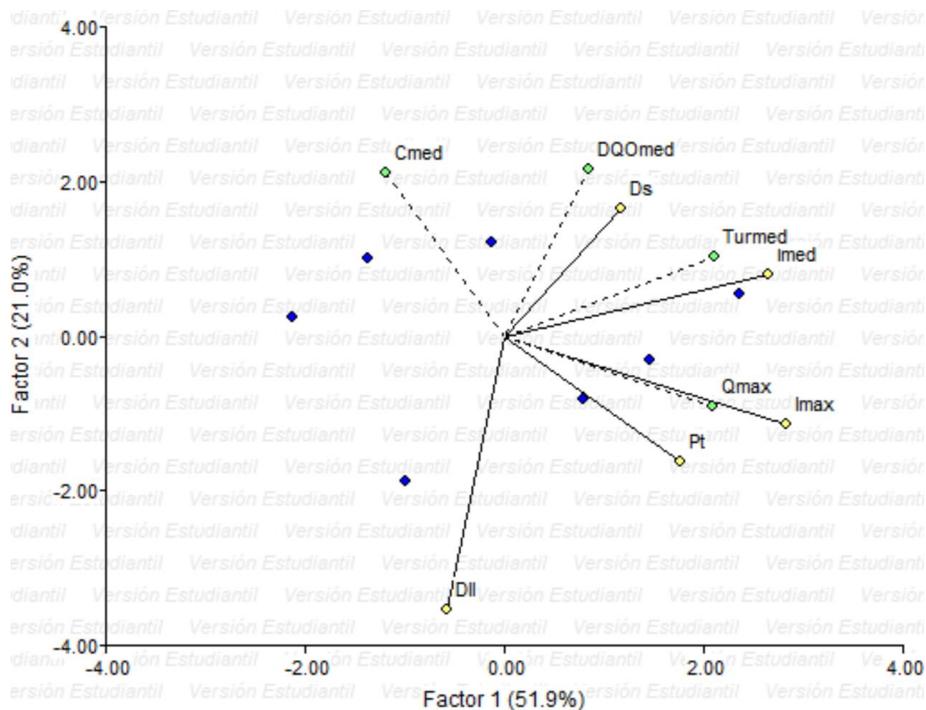


Figura 3.12 Triplot que representa en una misma gráfica los casos, las variables respuesta y las variables predictoras para los datos de la descarga El Vado.

Elaboración: Autor.

3.3.2.2 Descarga Multifamiliares

Empleando el mismo procedimiento explicado en el ítem 2.3.2 y desarrollado en el ítem 3.3.2.1 se obtuvo los modelos de regresión PLSR para la predicción de las características del DAC a partir de los parámetros de lluvia en la descarga Multifamiliares:

$$DQO_{med} = 1.897 * P_t + 10.783 * I_{max} + 9.220 * I_{med} - 0.834 * D_{II} + 8.214 * D_s + 44.24 \quad R^2 = 0.37$$

$$C_{med} = -0.394 * P_t - 1.568 * I_{max} - 0.653 * I_{med} - 0.017 * D_{II} + 4.311 * D_s + 138.72 \quad R^2 = 0.57$$

$$Tur_{med} = 0.965 * P_t + 4.469 * I_{max} + 1.745 * I_{med} - 0.423 * D_{II} + 6.720 * D_s + 26.15 \quad R^2 = 0.90$$

$$Q_{max} = 3.638 * P_t + 20.553 * I_{max} + 2.152 * I_{med} - 1.919 * D_{II} - 9.809 * D_s + 314.90 \quad R^2 = 0.57$$

El modelo para la estimación de la DQO_{med} en la descarga Multifamiliares se construyó empleando 3 componentes del análisis PLS, esto corresponde a una varianza explicada de 99.87%. Para la predicción de la conductividad C_{med} se empleó un modelo PLS de 2 componentes que explican un 97.52% de la varianza de los datos. El modelo de turbiedad Tur_{med} , se construyó a partir de 2 componentes que explican el 98.97% de la varianza. Finalmente, el modelo de predicción para el caudal máximo de la descarga Q_{max} se elaboró con 2 componentes correspondientes a una varianza explicada del 96.13%.

La **Figura 3.13** muestra el triplot que representa las variables de lluvia y DAC de los correspondiente a la descarga Multifamiliares.

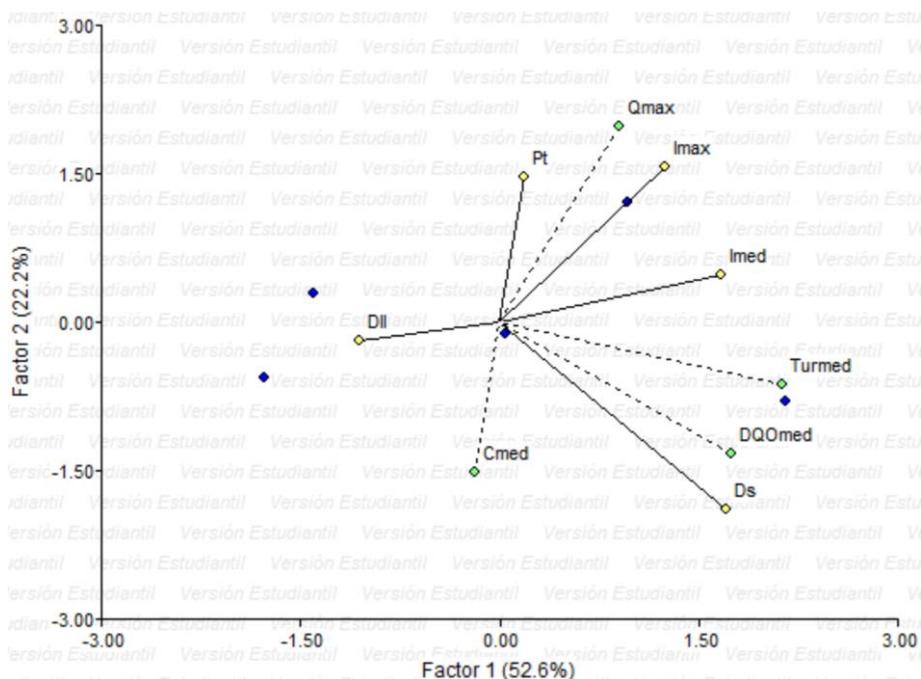


Figura 3.13 Triplot que representa en una misma gráfica los casos, las variables respuesta y las variables predictoras para los datos de la descarga Multifamiliares.

Elaboración: Autor.

3.3.2.3 Descarga Coliseo

Una vez realizado el análisis PLSR para la descarga el Coliseo se ha determinado las ecuaciones de predicción para las variables de DAC en función de los parámetros de precipitación:

$$DQO_{med} = -0.240 * P_t + 0.217 * I_{max} + 0.230 * I_{med} - 2.835 * D_{II} - 0.924 * D_s + 586.03 \quad R^2 = 0.20$$

$$C_{med} = -0.114 * P_t - 0.167 * I_{max} + 0.025 * I_{med} - 1.114 * D_{II} - 0.768 * D_s + 256.85 \quad R^2 = 0.65$$

$$Tur_{med} = -0.199 * P_t - 0.331 * I_{max} + 0.031 * I_{med} - 1.909 * D_{II} - 1.389 * D_s + 345.26 \quad R^2 = 0.75$$

$$Q_{max} = +0.592 * P_t + 1.093 * I_{max} - 0.058 * I_{med} + 5.594 * D_{II} + 4.266 * D_s - 95.74 \quad R^2 = 0.84$$

El modelo PLSR para las variable DQO_{med} , C_{med} , Tur_{med} , Q_{max} , se construyeron únicamente con un componente, la varianza explicada por cada modelo fue de 95.72%, 96.59%, 96.61% y 96.63% respectivamente.

El triplot que relaciona las variables de lluvia con las variables de DAC para la descarga Coliseo se presenta en la **Figura 3.14**.

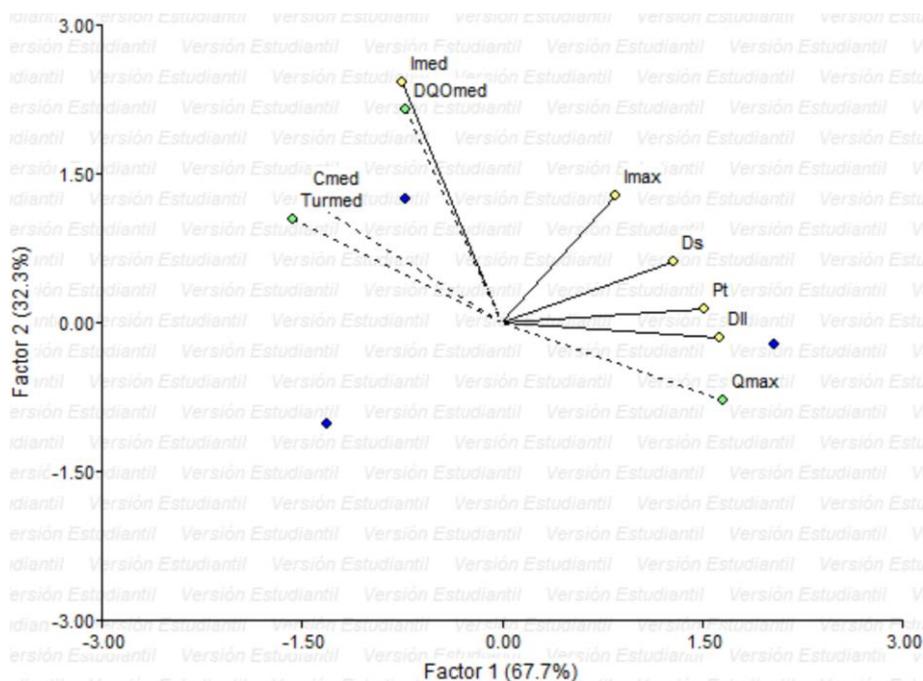


Figura 3.14 Triplot que representa en una misma gráfica los casos, las variables respuesta y las variables predictoras para los datos de la descarga Coliseo.

Elaboración: Autor.

3.3.2.4 Discusión acerca del análisis PLSR

La **Figura 3.12** que muestra el triplot que relaciona las variables de lluvia con las variables de DAC para la descarga El Vado es similar al triplot de la descarga Multifaminiare mostrado en la **Figura 3.13**. Se confirma las relaciones que fueran determinadas a través del análisis de correlación de Pearson y CCA. Por ejemplo, la



relación de las variables I_{\max} con la variable dependiente Q_{\max} . Se observa también la relación de la intensidad promedio I_{med} con la Turbiedad T_{med} y la relación del parámetro D_s y D_{II} (relación negativa) con la DQO_{med} . Así también se observa la relación negativa entre la precipitación total P_t y la conductividad media C_{med} .

El triplot obtenido para la descarga Coliseo mostrado en la **Figura 3.14** difiere de los triplots elaborados para las descargas El Vado y Multifamiliares (**Figura 3.12** y **Figura 3.13** respectivamente). Como se mencionó anteriormente, esto puede ser debido al pequeño tamaño muestral empleado en el análisis de la descarga Coliseo (ANEXO A. Calendario de muestreo).

Los valores del coeficiente de determinación R^2 para las ecuaciones de predicción de los parámetros Q_{\max} , C_{med} , T_{med} , DQO_{med} muestran un amplio rango de variación, de 0.20 a 0.90. Para la predicción de la DQO el $R^2 = 0.20$ indica un modelo de baja precisión. En tanto que el modelo PLSR de predicción del parámetros T_{med} para la descarga Multifamiliares, presenta un $R^2 = 0.90$. Aunque los valores muestren una baja calidad de predicción, los modelos pueden ser útiles para explorar cualitativamente la influencia de la lluvia en las características de los DAC (Sandoval et al., 2013).

Capítulo 4

Conclusiones

Las descargas de alcantarillado combinado El Vado, Multifamiliares y Coliseo, contribuyen al deterioro de la calidad del agua del río Tomebamba durante la temporada de lluvias.

Se evidencia una alta variación en la tipología del agua, principalmente en las descargas Multifamiliares y el Vado (relación DBO_5/DQO entre 0.04 - 0.92). Se observó muestras con gran cantidad de materia biodegradable y otras en cambio con alto grado de contaminación química.

La descarga del Coliseo presenta en promedio valores más elevados de los parámetros de Turbiedad, DQO y DBO_5 en relación a los encontrados en las descargas El Vado y Multifamiliares. Los parámetros microbiológicos de coliformes totales y fecales también presentan valores altos en esta descarga. Lo anterior sugiere un mayor grado de contaminación relacionado con material en suspensión, microorganismos y materia orgánica proveniente del DAC Coliseo. La descarga de El Vado en cambio es la que registra la menor concentración de los parámetros microbiológico coliformes totales y coliformes fecales.

En la descarga de los Multifamiliares un 67% de los ensayos cumple lo establecido en la normativa nacional, en relación a la concentración permitida de DBO_5 y DQO para la descarga en cuerpos de agua dulce. En el DAC El Vado el 56% de las muestras cumplen la normativa en relación a la DBO_5 y 67% cumplen con la DQO. En la DAC Coliseo ninguno de los ensayos cumplió con la normativa requerida para DBO_5 y DQO.

Se observa gran variabilidad temporal de los parámetros de calidad de agua durante la duración del DAC. Con relación a la conductividad, en las tres descargas los mayores valores de se presentan en el periodo entre, el inicio del DAC y el valor máximo de caudal del hidrograma de descarga. Esto supone un mayor grado de contaminación relacionada con la conductividad (sales disueltas) al inicio del evento de DAC. Los valores de máxima turbiedad en cambio se localizan relativamente cerca del caudal pico en el hidrograma de descarga.

Con respecto al análisis de los parámetros de lluvia - características de DAC, llevado a cabo con los procedimientos estadísticos CCA y PLSR, se concluye que:

- El caudal máximo de descarga de un DAC depende principalmente de la Intensidad máxima de lluvia I_{max} que caracteriza el evento de precipitación. A mayor intensidad máxima, sobreviene un caudal pico de descarga mayor en la DAC.



- La intensidad de lluvia máxima I_{\max} y promedio I_{med} , tienen influencia en los valores registrados de turbiedad promedio Tur_{med} medidos en las DACs.
- Los valores de precipitación total P_t exhiben una relación negativa respecto de los valores de conductividad promedio C_{med} que se registran en la descarga durante un evento de DAC.
- La DQO_{med} se relaciona con la duración de la temporada seca previa al evento de precipitación, D_s y con la intensidad media de precipitación I_{med} . El D_s puede influir en la cantidad de material de arrastre por escorrentía y en la re suspensión de material depositado en los conductos de drenaje ocasionando mayores cargas de contaminación y aumento de la DQO_{med} .
- La intensidad de precipitación máxima I_{\max} y promedio I_{med} , tienen influencia en el parámetro de la turbiedad promedio Tur_{med} medida en la descarga. La turbiedad se puede relacionar con la cantidad de sólidos suspendidos totales TSS, por lo que la intensidad de precipitación tendría relación con el arrastre de partículas hacia los cuerpos receptores durante el DAC.

Referencias

- Abdi, H. (2003). Partial least squares (PLS) regression. *In: Encyclopedia of Social Sciences Research Methods (M. Lweis-Beck, A. Bryman & T. Futing, Eds)*. Sage, Thousand Oaks, CA, USA, Pp. 792–795.
- Aereopuerto-Mariscal-Lamar. (2012). *Información meteorológica Aereopuerto Mariscal Lamar Cuenca*. Dirección de aviación Civil del Ecuador, Quito - Ecuador.
- Al Aukidy, M., & Verlicchi, P. (2017). Contributions of combined sewer overflows and treated effluents to the bacterial load released into a coastal area. *Science of the Total Environment*, 607–608, 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.050>
- Alvarado, A., Vedantam, S., Durazno, G., & Nopens, I. (2011). Hydraulic assessment of waste stabilization ponds: Comparison of computational fluid dynamics simulations against tracer data. *Maskana*, 2(1), 59–67. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.05>
- Aparicio Mijares, F. J. (1999). *Fundamentos de hidrología de superficie* (8. reimpr). Limusa Noriega Ed.
- Arévalo, M., Van Echelpoel, W., Alvarado, A., Goethals, P., & Larriva, J. (2017). Análisis espacial-temporal de procesos relacionados con concentraciones de oxígeno disuelto en lagunas de maduración. *Maskana*, 8(2), 115–123. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.09>
- Badii, M., Castillo, J., Cortez, K., Wong, A., & Villalpando, P. (2007). *Análisis de correlación canónica (ACC) e investigación científica*. 4(2), 405–422.
- Balzarini, M., Córdoba, M., Bruno, C., & Teich, I. (2015). *Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado*. (June).
- Bellosta, C. J. G. (2018). *R para profesionales de los datos: una introducción*. 139. Retrieved from



- https://datanalytics.com/libro_r/_main.pdf%0Ahttps://datanalytics.com/libro_r/las-funciones-lapply-sapply-y-split.html
- Bertrand, D. (2005). *Etalonnage multidimensionnel: application aux données spectrales (Multi-dimensional calibration: application to spectral data)*. Les Techniques de l'Ingénieur, article P264, mars 2005, 21 pp. p annexes.
- Brzezińska, A., Zawilski, M., & Sakson, G. (2016). Assessment of pollutant load emission from combined sewer overflows based on the online monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5461-6>
- Carrasco, M. C. (2006). *Determinación de Categorías de Calidad Ambiental en los ríos de Cuenca, con el uso de bioindicadores*.
- CEPAL. (2012). *Diagnóstico de la estadística del agua en Ecuador*.
- Cuadras, C. M. (2007). Nuevos Metodos de Analisis Multivariante. *Revista Española de Quimioterapia : Publicación Oficial de La Sociedad Española de Quimioterapia*, 20(3), 249. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19406528>
- Eaton, M. L., & Perlman, M. D. (1973). The Non-Singularity of Generalized Sample Covariance Matrices. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 1(4), 1–8. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat08190>
- ETAPA-EP. (2007). *Evolución de la calidad del agua en los ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca. ETAPA-EP, Dirección de manejo Ambiental*.
- ETAPA EP. (2019). ETAPA EP - Servicios de Telefonía, Televisión, Internet, Agua Potable, Alcantarillado de Cuenca - Ecuador > Información > Saneamiento > Colectores e interceptores. Retrieved May 18, 2019, from <https://www.etapa.net.ec/Información/Saneamiento/Colectores-e-interceptores>
- Falk, R. F., & Miller, N. B. (1992). *A Primer for Soft Modelling*. Akron, Ohio: The University of Akron.
- Fernandez de Córdova, J., & Gonzales, H. (2012). *Evolución de la calidad del agua de los tramos bajos de los ríos de la ciudad de Cuenca*. ETAPA-EP, Cuenca - Ecuador.
- GAD Municipal de Cuenca. (2011). Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Cuenca. *Estudio*.
- García, J. T., Espín-Leal, P., Viguera-Rodríguez, A., Castillo, L. G., Carrillo, J. M., Martínez-Solano, P. D., & Nevado-Santos, S. (2017). Urban runoff characteristics in Combined Sewer Overflows (CSOs): Analysis of storm events in southeastern Spain. *Water (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/w9050303>
- Gaviria, C. (2016). *Regresión por mínimos cuadrados parciales PLS aplicada a datos variedad valuados*. 18–21.
- Gómez, E. G. (2000). ¿Combinar o separar? Una discusión con un siglo de antigüedad y de gran actualidad para los bogotanos. *Revista de Ingeniería*, 21–30.
- González, I., Déjean, S., Martin, P. G. P., & Alain, B. (2008). CCA: An R Package to Extend Canonical Correlation Analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 1(1), 128–129. <https://doi.org/10.1002/wics.10>
- Gooré Bi, E., Monette, F., & Gasperi, J. (2015). Analysis of the influence of rainfall variables on urban effluents concentrations and fluxes in wet weather. *Journal of Hydrology*, 523, 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.017>
- Gregoria, M., Aparicio, M., & Antonio, C. (1995). *La regresión por mínimos cuadrados parciales : orígenes y evolución*. (1979), 441–448.
- Hvitved-Jacobsen, T. (1982). The impact of combined sewer overflows on the dissolved oxygen concentration of a river. *Water Research*, 16(7), 1099–1105. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90125-7)



- INEC. (2010). Proyección de la Población Ecuatoriana, por años calendario, según cantones 2010-2020. Retrieved from Publication website: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- InfoStat-Team. (2019). *InfoStat software estadístico*. Córdoba, Argentina.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2013). Agua, calidad de agua, muestreo manejo y conservación de muestras. 2169, 26. Retrieved from [http://sut.trabajo.gob.ec/publico/Normativa Técnica INEN/NTE INEN 2169 - AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS.pdf](http://sut.trabajo.gob.ec/publico/Normativa_Técnica_INEN/NTE_INEN_2169_-_AGUA._CALIDAD_DEL_AGUA._MUESTREO._MANEJO_Y_CONSERVACIÓN_DE_MUESTRAS.pdf)
- Jean, M. È., Duchesne, S., Pelletier, G., & Pleau, M. (2018). Selection of rainfall information as input data for the design of combined sewer overflow solutions. *Journal of Hydrology*, 565(May), 559–569. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.064>
- Jerves-Cobo, R., Benedetti, L., Amerlinck, Y., Lock, K., De Mulder, C., Van Butsel, J., ... Nopens, I. (2020). Integrated ecological modelling for evidence-based determination of water management interventions in urbanized river basins: Case study in the Cuenca River basin (Ecuador). *Science of the Total Environment*, 709, 136067. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136067>
- Jerves-Cobo, R., Lock, K., Van Butsel, J., Pauta, G., Cisneros, F., Nopens, I., & Goethals, P. L. M. (2018). Biological impact assessment of sewage outfalls in the urbanized area of the Cuenca River basin (Ecuador) in two different seasons. *Limnologica*, 71(December 2017), 8–28. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2018.05.003>
- Kreutzberger, W. A., Race, R. A., Meinholz, T. L., Harper, M., & Ibach, J. (1980). Impact of Sediments on Dissolved Oxygen Concentrations following Combined Sewer Overflows. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 52(1), 192–201. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/25040562>
- Lau, J., Butler, D., & Schütze, M. (2002). Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact? *Urban Water*, 4(2), 181–189. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00013-4)
- Leurgans, S., Moyeed, R., & Silverman, B. (1993). Canonical Correlation Analysis when the Data are Curves. *Journal of the Royal Statistical Society*, 55(3), 725–740.
- Madoux-Humery, A. S., Dorner, S., Sauvé, S., Aboufadi, K., Galarneau, M., Servais, P., & Prévost, M. (2016). The effects of combined sewer overflow events on riverine sources of drinking water. *Water Research*, 92, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.033>
- MAE. (2017). Texto Unificado Legislación Secundaria de Medio Ambiente. In *Registro Oficial Edición Especial 2*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mailhot, A., Talbot, G., & Lavallée, B. (2015). Relationships between rainfall and Combined Sewer Overflow (CSO) occurrences. *Journal of Hydrology*, 523, 602–609. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.063>
- Martínez Galera, M., Martínez Vidal, J. L., Garrido Frenich, A., & Gil García, M. D. (1997). Evaluation of multi-wavelength chromatograms for the quantification of mixtures of pesticides by high-performance liquid chromatography-diode array detection with multivariate calibration. *Journal of Chromatography*, (A 778 (1–2), 139–149).
- Mevik, B. H., & Wehrens, R. (2007). The pls package: Principal component and partial least squares regression in R. *Journal of Statistical Software*, 18(2), 1–23. <https://doi.org/10.18637/jss.v018.i02>



- Morgan, D., Xiao, L., & McNabola, A. (2017). Evaluation of combined sewer overflow assessment methods: case study of Cork City, Ireland. *Water and Environment Journal*, 31(2), 202–208. <https://doi.org/10.1111/wej.12239>
- Mulliss, R., Revitt, D., & Shutes, R. (1997). The impacts of discharges from two combined sewer overflows on the water quality of an urban watercourse. *Water Science and Technology*, 36, 195–199.
- Murillo, J. M. (2009). *Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (México)*. 169–184.
- Passerat, J., Ouattara, N. K., Mouchel, J. M., Vincent Rocher, & Servais, P. (2011). Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River. *Water Research*, 45(2), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.024>
- R-Core-Team. (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria 2016.
- Riechel, M., Matzinger, A., Pawlowsky-Reusing, E., Sonnenberg, H., Uldack, M., Heinzmann, B., ... Rouault, P. (2016). Impacts of combined sewer overflows on a large urban river – Understanding the effect of different management strategies. *Water Research*, 105, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.017>
- Ruan, M. (1999). Continuous simulation of CSO emissions. *Urban Water*, 1(3), 201–205. [https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00014-5](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00014-5)
- Sandoval, S., Torres, A., Pawlowsky-Reusing, E., Riechel, M., & Caradot, N. (2013). The evaluation of rainfall influence on combined sewer overflows characteristics: The Berlin case study. *Water Science and Technology*, 68(12), 2683–2690. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.524>
- Suárez, J., & Puertas, J. (2005). Determination of COD, BOD, and suspended solids loads during combined sewer overflow (CSO) events in some combined catchments in Spain. *Ecological Engineering*, 24(3), 199–217. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.005>
- Temprano-Gonzales, J., Gabriel-Cervigni, M., Suárez-Lopez, J., & Tejero-Monzón, J. (1996). Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: Control de origen. *Revista de Obras Públicas*, 143(3352), 45–57.
- Temprano, J., & Tejero, I. (2002). Detention storage volume for combined sewer overflow into a river. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 23(6), 663–675. <https://doi.org/10.1080/09593332308618381>
- Valdez, C., & Vásquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento Y disposición de aguas residuales. *Fundación Ica*, 341.
- Vega Vilca, J. C., & Guzman, J. (2011). Regresión PLS y PCA Como Solución al Problema de Multicolinealidad en Regresión Múltiple. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 18(1), 9. <https://doi.org/10.15517/rmta.v18i1.2111>
- Vintimilla Palacios, D. M. (2016). *Determinación de contaminación difusa en la Cuenca del Río Tomebamba en Monay*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23344>
- Weyrauch, P., Matzinger, A., Pawlowsky-Reusing, E., Plume, S., von Seggern, D., Heinzmann, B., ... Rouault, P. (2010). Contribution of combined sewer overflows to trace contaminant loads in urban streams. *Water Research*, 44(15), 4451–4462. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.011>
- Wold, H. (1979). *Model construction and evaluation when theoretical knowledge is scarce, Theory and Application of Partial Least Squares*. 47–74.
- Yu, Y., Kojima, K., An, K., & Furumai, H. (2013). Cluster analysis for characterization



of rainfalls and CSO behaviours in an urban drainage area of Tokyo. *Water Science and Technology*, 68(3), 544–551. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.253>

Yu, Y., Zhang, S., An, A. K., & Furumai, H. (2018). Simple method for calculating hydraulic behavior of combined sewer overflow from rainfall event data. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(10), 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000972](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000972)



ANEXO A. Calendario de muestreo

Tabla 5.1 Número de muestras analizadas en las descargas EL Vado, Multifamiliares y Coliseo.

DAC	Ensayo	Fecha	C ($\mu\text{S/cm}$)	Tur (NTU)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	C _F (NMP/ 100ml)	C _T (NMP/ 100ml)	NO ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NH ₃ N (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	P (mg/l)
Coliseo	CO-5	8-Apr-2017	6	7	1	5	2	2					
	CO-6	12-Apr-2017	9	15	1	5	1	1					
	CO-12	18-Apr-2017	23	24	1	4	4	4					
El Vado	VA-2	29-Mar-2017	22	22	2	5							
	VA-3	30-Mar-2017	19	19	2	4							
	VA-7	12-Apr-2017	24	24	1	5	2	2					
	VA-10	14-Apr-2017	13	15	1	5	1	1					
	VA-11	18-Apr-2017	24	24	1	5	4	4					
	VA-13	20-Apr-2017	24	24	1	5	2	2					
	VA-15	14-Nov-2017	23	23	5	5							
	VA-16	4-Apr-2018		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
VA-17	9-May-2018		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Multifamiliares	MU-1	21-Mar-2017	21		1	5							
	MU-2	29-Mar-2017	18	18	2	4							
	MU-4	8-Apr-2017	13	13	1	5	2	2					
	MU-8	12-Apr-2017	23	24	1	5	1	1					
	MU-9	14-Apr-2017	24	24	1	5	1	1					
	MU-14	20-Apr-2017	24	24	1	5	2	2					

C: conductividad, **Tur:** turbiedad, **DBO₅** (demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días), **DQO** (demanda química de oxígeno), **C_F** (coliformes fecales), **C_T** (coliformes totales), **NO₃** (nitratos), **NO₂** (nitritos), **NH₃ – N** (nitrogeno amoniacal), **PO₄** (orto fosfato disuelto) y **P** (fosforo total)

Elaboración: Autor