

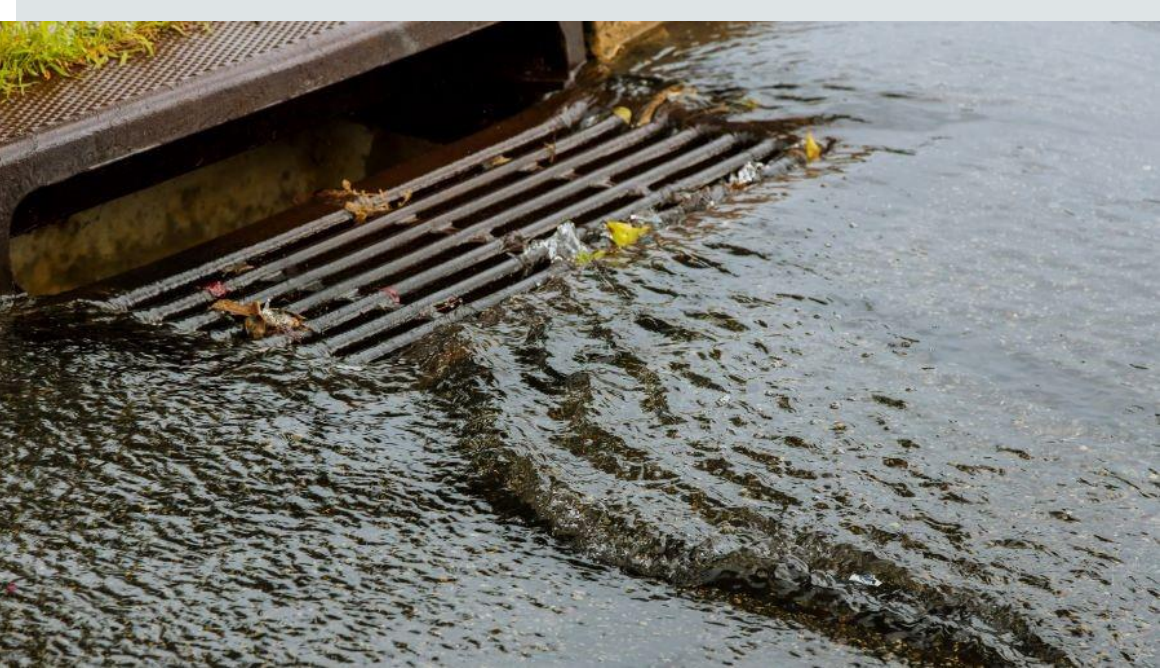
Autor:
Byron Roberto Jiménez Gallardo

Director:
Prof./Dr./Catedrático Juan Ignacio Tejero Monzón

Tutora:
Prof./Dra./Catedrática Amaya Lobo García De Cortázar

Tesis Doctoral
CRITERIOS DE CONTROL Y CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE DEL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LLUVIAS CRÍTICAS EN MEDIO URBANO MEDIANTE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL BINOMIO ESCORRENTÍA – MEDIO RECEPTOR FLUVIAL

PhD Thesis
CONTROL CRITERIA AND MULTIVARIATE STATISTICAL CHARACTERIZATION OF THE IMPACT OF POLLUTION PRODUCED BY CRITICAL RAINS IN URBAN ENVIRONMENT THROUGH THE MATHEMATICAL MODELING OF BINOMY RUNOFF – FLUVIAL RECEIVER



Esta investigación analiza la contaminación de la escorrentía urbana y su impacto en un medio receptor fluvial mediante un enfoque matemático y estadístico multivariante. Se estudian contaminantes críticos (Sólidos Totales, DBO₅ y Nitrógeno Total) y sus polutogramas asociados durante eventos de lluvia, evaluando su incidencia en la calidad del agua en diferentes escenarios hidrológicos. Utilizando el modelo *SWMM*, se simulan lluvias críticas para una cuenca urbana, generando hidrogramas y polutogramas para analizar su grado de desfavorabilidad en términos de contaminación. Se examina el fenómeno del primer lavado “*First Flush*”, desarrollando nuevas metodologías de caracterización mediante variables innovadoras que se deducen de las curvas *M(V)* en lugar de los tradicionales ajustes de regresión. Además, se implementan análisis multivariantes (de componentes principales y de conglomerados) para determinar las lluvias más desfavorables y el impacto en la calidad del agua del receptor. Se dimensionan tanques de tormenta, logrando una retención de escorrentía del 100% y 80% con volúmenes de 146,50 m³/ha imp y 117,20 m³/ha imp, respectivamente, controlando el rebose de aguas pluviales y optimizando el diseño de sistemas de drenaje urbano.

This research analyzes urban runoff pollution and its impact on a fluvial receiving environment through a mathematical and multivariate statistical approach. Critical pollutants (Total Solids, BOD₅, and Total Nitrogen) and their associated pollutographs are studied during rainfall events, assessing their effect on water quality in different hydrological scenarios. Using the *SWMM* model, critical rainfall events for an urban catchment are simulated, generating hydrographs and pollutographs to assess their degree of unfavorability in terms of contamination. The "First Flush" phenomenon is examined, developing new characterization methodologies through innovative variables derived from *M(V)* curves, instead of traditional regression fittings. Additionally, multivariate analyses (principal component and cluster analysis) are implemented to identify the most unfavorable rainfall events and their impact on the water quality of the receptor. Storm tanks are sized, achieving runoff retention of 100% and 80% with volumes of 146.50 m³/ha imp and 117.20 m³/ha imp, respectively, controlling stormwater overflow and optimizing urban drainage system design.



CRITERIOS DE CONTROL Y CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE DEL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LLUVIAS CRÍTICAS EN MEDIO URBANO MEDIANTE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL BINOMIO ESCORRENTÍA – MEDIO RECEPTOR FLUVIAL
CONTROL CRITERIA AND MULTIVARIATE STATISTICAL CHARACTERIZATION OF THE IMPACT OF POLLUTION PRODUCED BY CRITICAL RAINS IN URBAN ENVIRONMENT THROUGH THE MATHEMATICAL MODELING OF BINOMY RUNOFF – FLUVIAL RECEIVER

Tesis Doctoral
2024

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO

**Programa de Doctorado Interuniversitario
en Ingeniería Ambiental**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS**

**Departamento de Ciencias y Técnicas del
Agua y Medio Ambiente**

ESCUELA DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TESIS DOCTORAL

**CRITERIOS DE CONTROL Y CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA
MULTIVARIANTE DEL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN
PRODUCIDA POR LLUVIAS CRÍTICAS EN MEDIO URBANO
MEDIANTE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL BINOMIO
ESCORRENTÍA – MEDIO RECEPTOR FLUVIAL**

PhD THESIS

**CONTROL CRITERIA AND MULTIVARIATE STATISTICAL
CHARACTERIZATION OF THE IMPACT OF POLLUTION PRODUCED
BY CRITICAL RAINS IN URBAN ENVIRONMENT THROUGH THE
MATHEMATICAL MODELING OF BINOMY RUNOFF – FLUVIAL
RECEIVER**

Presentada por:

BYRON ROBERTO JIMÉNEZ GALLARDO

Dirigida por:

Prof./Dr./Catedrático JUAN IGNACIO TEJERO MONZÓN

Tutorizada por:

Prof./Dra./Catedrática AMAYA LOBO GARCÍA DE CORTÁZAR

Santander, noviembre de 2024

*A toda mi familia y;
en especial, a mis hijos.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad de Cantabria, a la Escuela de Doctorado y en especial al Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente por permitirme desarrollar esta Tesis Doctoral.

Quiero agradecer a la Dra. Ana López Martínez por su ayuda en la preparación de los artículos para la difusión de esta investigación.

También agradecer a mi tutora Prof./Dra./Catedrática Amaya Lobo García de Cortázar por su inestimable ayuda, colaboración y consejos.

Por último, quiero agradecer sobremanera a mi Director de Tesis Prof./Dr./Catedrático Juan Ignacio Tejero Monzón por su dedicación, ayuda, consejos y; en especial, por su paciencia.

*“La paciencia es el arte de la esperanza”
Luc de Clapiers*

¡Muchas gracias!

B. Roberto Jiménez G.

Santander, noviembre de 2024

RESUMEN

Es conocida ya la importancia que tiene la contaminación que reciben los medios acuáticos receptores en tiempo de lluvia. Existen innumerables estudios que demuestran lo compleja y determinante que puede ser dicha contaminación al analizar además la respuesta que tienen los distintos elementos que conforman la cadena de producción, recepción, tratamiento, destino final de las aguas contaminadas generadas por los sucesos de lluvia. No obstante, todos los estudios concuerdan que su caracterización y su estimación del impacto que generan es de muy difícil cuantificación sumada la problemática adicional del tiempo y costos que ello implica. La única forma de analizar muchos más sucesos para múltiples tipos de cuenca es mediante la simulación matemática. Así pues, la presente investigación analizó la contaminación de la escorrentía urbana y su impacto en un medio receptor fluvial mediante un enfoque matemático y estadístico multivariante.

Se estudiaron contaminantes críticos, Sólidos Totales (ST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Nitrógeno Total (NT) acompañados de sus caudales y concentraciones asociadas durante un conjunto importante de sucesos de lluvia específicamente seleccionados, evaluando su incidencia en la calidad del agua al caso en concreto de una cuenca urbana tipo, con características específicas de área, impermeabilidad y pendiente; y, con un número determinado de días de tiempo seco previos.

Para la modelización matemática se utilizó el software *EPA SWMM (release 5.2.4)*, una herramienta ampliamente reconocida y validada en la comunidad científica. Este programa simuló las lluvias críticas, generando hidrogramas y polutogramas que posteriormente se analizaron para determinar su grado de desfavorabilidad en términos de contaminación. Para ello, a los resultados obtenidos, se les realizó un tratamiento estadístico utilizando herramientas tales como:

- Cálculo de mínimos, máximos.
- Cálculo de coeficientes de variación.
- Determinación de percentiles y rangos de ellos.
- Estudio de variables politómicas: cualitativas, cuantitativas, dependientes, independientes, intervinientes, moderadoras.
- Escalas: nominales, ordinales, de intervalo, de razón.

Adicionalmente para determinar la contribución de varios factores en los eventos o resultados, se realizó un análisis multivariante utilizando herramientas tales como:

- Análisis de correspondencias (matriz de lluvias).
- Regresiones lineales sencillas.
- Matrices de correlación.
- Matrices de covarianzas.
- Matrices de coeficientes de determinación.
- Análisis de conglomerados (dendrogramas).
- Análisis de componentes principales.

Finalmente, y como una variable estadística adicional importante, se aplicó el criterio del período de retorno (Tr) de cada suceso de lluvia. Aunque la presente investigación es válida para cualquier enclave, se aplicó la ecuación del (Tr) de la ciudad de Santander para observar los resultados de la investigación aplicados a una localización específica.

La investigación también abordó el fenómeno del primer lavado “*First Flush*”, desarrollando nuevas metodologías de caracterización mediante variables innovadoras que se deducen de las curvas $M(V)$ en lugar de los tradicionales ajustes de tipo potencial con regresiones lineales. Además, se implementaron análisis multivariantes (de componentes principales y de conglomerados) para determinar las lluvias más desfavorables y el impacto en la calidad del agua del receptor. Se dimensionaron tanques de tormenta, logrando una retención de escorrentía del 100% y 80% con volúmenes de 146,50 m³/ha imp y 117,20 m³/ha imp, respectivamente, controlando el rebose de aguas pluviales y optimizando el diseño de sistemas de drenaje urbano.

Todo lo mencionado anteriormente, permitió:

- Caracterizar la contaminación que transportan las redes de aguas pluviales en tiempo de lluvia.
- La identificación de variables “criterio” con hidrogramas y polutogramas asociados evaluando su incidencia sobre la calidad del agua de un medio receptor en concreto: un río.
- La determinación de las lluvias “críticas” (más desfavorables), que producen las peores situaciones de contaminación asociándolas al período de retorno (Tr) de cualquier localización geográfica.
- Hallar los volúmenes necesarios de almacenamiento que permiten controlar la contaminación/impacto sobre el medio acuático receptor cumpliendo criterios de calidad de las aguas.
- Profundizar en la comprensión y aportar soluciones a los problemas generados por estos sucesos de contaminación transitoria.
- Ofrecer nuevas líneas de investigación que permitan extrapolar los resultados obtenidos y poder analizar cuencas urbanas con diferentes áreas, impermeabilidades y pendientes.

Palabras clave:

calidad del agua, escorrentía urbana, *SWMM*, hidrogramas, curvas IDF, polutogramas, CMS, primer lavado, curvas $M(V)$, cuerpo de agua receptor, tanques de tormenta

ABSTRACT

The importance of contamination in aquatic receiving bodies during rainfall events is already well recognized. Numerous studies demonstrate the complexity and significance of this contamination, especially when analyzing the response of the various elements involved in the production, reception, treatment, and final disposal of contaminated waters generated by rainfall events. However, all studies agree that characterizing and estimating the impact of this contamination is extremely difficult to quantify, compounded by the additional challenges of time and costs involved. The only way to analyze many more events across multiple types of basins is through mathematical simulation. Thus, the present research analyzed urban runoff contamination and its impact on a riverine receiving environment using a multivariate mathematical and statistical approach.

Critical pollutants were studied, including Total Solids (TS), Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), and Total Nitrogen (TN), alongside their associated flow rates and concentrations during a significant set of specifically selected rainfall events. This evaluation assessed their impact on water quality in a specific urban basin case, characterized by area, impermeability, and slope, with a predetermined number of dry days prior.

For mathematical modeling, the EPA SWMM software (release 5.2.4) was utilized, a widely recognized and validated tool within the scientific community. This program simulated critical rain events, generating hydrographs and pollutographs that were subsequently analyzed to determine their degree of unfavorability in terms of contamination. Statistical treatments were applied to the obtained results using tools such as:

- Calculation of minimums and maximums.
- Calculation of coefficients of variation.
- Determination of percentiles and their ranges.
- Study of polytomous variables: qualitative, quantitative, dependent, independent, intervening, and moderating.
- Scales: nominal, ordinal, interval, and ratio.

Additionally, to determine the contribution of various factors to the events or results, a multivariate analysis was performed using tools such as:

- Correspondence analysis (rainfall matrix).
- Simple linear regressions.
- Correlation matrices.
- Covariance matrices.
- Determination coefficient matrices.
- Cluster analysis (dendrograms).
- Principal component analysis.

Finally, as an important additional statistical variable, the return period (T_r) criterion for each rainfall event was applied. Although this research is valid for any location, the (T_r) equation for the city of Santander was applied to observe the results of the research in a specific location.

The research also addressed the "First Flush" phenomenon, developing new characterization methodologies using innovative variables derived from $M(V)$ curves instead of traditional potential-type adjustments with linear regressions. Furthermore, multivariate analyses (of principal components and clusters) were implemented to determine the most unfavorable rainfalls and their impact on the water quality of the receiving environment. Storm tanks were dimensioned, achieving runoff retention of 100% and 80% with volumes of 146.50 m³/ha impervious and 117.20 m³/ha impervious, respectively, controlling the overflow of stormwater and optimizing the design of urban drainage systems.

All the aforementioned allowed:

- Characterization of the contamination transported by stormwater networks during rainfall events.
- Identification of “criterion” variables with associated hydrographs and pollutographs evaluating their impact on the water quality of a specific receiving environment: a river.
- Determination of “critical” (most unfavorable) rainfalls that produce the worst contamination situations, associating them with the return period (T_r) of any geographical location.
- Identification of the necessary storage volumes that allow for controlling contamination/impact on the aquatic receiving body while meeting water quality criteria.
- Deepening the understanding of and providing solutions to the problems generated by these transient contamination events.
- Offering new research avenues that allow extrapolating the obtained results and analyzing urban basins with varying areas, impermeabilities, and slopes.

Keywords:

water quality, urban runoff, SWMM, hydrographs, IDF curves, pollutographs, EMC, first flush, $M(V)$ curves, receiving water body, storm tanks

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo realizado en esta Tesis Doctoral no solo implica un profundo compromiso con el estudio y la innovación en un campo específico, sino que también refleja la dedicación y el esfuerzo por contribuir al conocimiento existente. En este contexto, la investigación ha dado lugar a la propuesta de publicación de varios artículos en revistas internacionales de alto prestigio, lo que resalta la relevancia y el impacto de sus hallazgos. Estas publicaciones no solo validan la calidad del trabajo, sino que también abren la puerta a nuevas discusiones y colaboraciones en el ámbito académico y profesional.

Los artículos científicos derivados de la presente investigación son:

ARTÍCULO	Nº1
Título:	<i>Theoretical analysis of urban runoff pollutographs: identification of characterization variables and impact</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	Environmental Technology
JCR:	Q2
Año:	2022
Mes:	Abril
Estado:	Publicado
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	22
URL:	https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2059406

ARTÍCULO	Nº2
Título:	<i>Slope (θ_i) & tangent (Δi) of the curve $M(V)$ as alternatives for the study of the first flush</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	Environmental Modelling & Software
JCR:	Q1
Año:	2024
Mes:	Octubre
Estado:	Enviado a la revista. En revisión. (ID: ENVSOFT-D-24-01364)
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	-
URL:	-

ARTÍCULO	Nº3
Título:	<i>GAP, MI and Dynamic EMC of the curve M(V) as alternatives for the study of the first flush</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	Water Resources Management
JCR:	Q1
Año:	2024
Mes:	Octubre
Estado:	Enviado a la revista. En revisión. (ID: WARM-D-24-01315)
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	-
URL:	-

ARTÍCULO	Nº4
Título:	<i>Characterization variables of urban runoff pollutographs. First flush analysis and impact</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	-
JCR:	-
Año:	2024
Mes:	Octubre
Estado:	En revisión por parte del Director y la Tutora de Tesis.
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	-
URL:	-

Un mayor detalle de los artículos se encuentra en los Anexos de la Tesis Doctoral.

ÍNDICE ABREVIADO

	<u>Pág.</u>
1.- GENERALIDADES	C1-1
1.1.- INTRODUCCIÓN	C1-1
1.2.- OBJETIVOS	C1-8
2.- ESTADO DEL CONOCIMIENTO	C2-1
2.1.- PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA.....	C2-1
2.2.- CARACTERÍSTICAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA.....	C2-31
2.3.- EL PRIMER LAVADO “ <i>FIRST FLUSH</i> ”	C2-54
2.4.- CARENCIAS ENCONTRADAS EN EL ESTADO DEL CONOCIMIENTO	C2-65
3.- PLANTEAMIENTO	C3-1
3.1.- OBJETIVO	C3-1
3.2.- ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN.....	C3-2
3.3.- SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA MATEMÁTICA O MODELO A UTILIZAR EN EL ANÁLISIS	C3-2
3.4.- DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	C3-3
4.- ESTUDIO PARTICULARIZADO DEL SISTEMA POR MEDIO DE UN CASO EN CONCRETO	C4-1
4.1.- DATOS Y SIMULACION MATEMÁTICA.....	C4-1

4.2.- ANÁLISIS TEÓRICO DE POLUTOGRAMAS DE ESCORRENTÍA URBANA. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN E IMPACTO.....	C4-11
---	-------

5.- ANÁLISIS E IMPACTO DEL PRIMER LAVADO (“FIRST FLUSH”) Y ALTERNATIVAS AL AJUSTE POTENCIAL DE LAS CURVAS M(V) PARA SU DETERMINACIÓN..... C5-1

5.1.- PENDIENTE (θ_i) Y TANGENTE (Δi) DE LA CURVA M(V) COMO ALTERNATIVAS PARA EL ESTUDIO DEL PRIMER LAVADO	C5-5
---	------

5.2.- GAP, MI Y EMC DINÁMICA DE LA CURVA M(V) COMO ALTERNATIVAS PARA EL ESTUDIO DEL PRIMER LAVADO	C5-31
---	-------

5.3.- VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE POLUTOGRAMAS DE ESCORRENTÍA URBANA. ANÁLISIS E IMPACTO DEL PRIMER LAVADO.....	C5-54
---	-------

6.- CONCLUSIONES..... C6-1

6.1.- CONCLUSIONES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN	C6-1
--	------

6.2.- CONCLUSIONES SOBRE LA CORRELACIÓN DE VARIABLES.....	C6-2
---	------

6.3.- CONCLUSIONES SOBRE ANÁLISIS MULTIVARIANTE	C6-3
---	------

6.4.- CONCLUSIONES SOBRE LAS LLUVIAS CRÍTICAS	C6-4
--	------

6.5.- CONCLUSIONES SOBRE LA MODELIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO.....	C6-5
---	------

6.6.- RECOMENDACIONES TÉCNICAS	C6-6
--------------------------------------	------

6.7.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	C6-6
--	------

7.- REFERENCIAS..... C7-1



LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE ANEXOS



ÍNDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
1.- GENERALIDADES	C1-1
1.1.- INTRODUCCIÓN	C1-1
1.1.1.- Descripción del problema.....	C1-1
1.1.2.- Antecedentes	C1-3
1.2.- OBJETIVOS	C1-8
1.2.1.- Objetivos generales	C1-8
1.2.2.- Objetivos particulares.....	C1-9
1.2.3.- Objetivos instrumentales	C1-10
2.- ESTADO DEL CONOCIMIENTO	C2-1
2.1.- PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA	C2-1
2.1.1.- Contaminación atmosférica.....	C2-2
2.1.2.- Contaminación de las superficies	C2-7
2.1.2.1.- Deposición atmosférica seca	C2-7
2.1.2.2.- Residuos de animales	C2-9
2.1.2.3.- Basura esparcida.....	C2-10
2.1.2.4.- Erosión y/o lavado de superficies.....	C2-11
2.1.2.4.1.- Calles.....	C2-11
2.1.2.4.2.- Zonas peatonales y accesos.....	C2-12
2.1.2.4.3.- Fachadas, cubiertas y tejados	C2-13
2.1.2.4.4.- Parques y jardines.....	C2-15
2.1.2.4.5.- Vías interurbanas (vías férreas, carreteras, autopistas y áreas de estacionamiento).....	C2-15
2.1.2.4.6.- Zonas industriales.....	C2-19
2.1.2.5.- Superficies no protegidas	C2-19
2.1.2.5.1.- Terrenos sin edificación	C2-19
2.1.2.5.2.- Terrenos con obras de edificación.....	C2-20
2.1.2.6.- Corrientes y cauces urbanos	C2-20
2.1.3.- Otras causas	C2-21
2.1.3.1.- Tráfico rodado (desgaste de neumáticos de vehículos)..	C2-21
2.1.3.2.- Lixiviados de vertederos controlados.....	C2-23
2.1.3.3.- Posibles actividades agrícolas y pecuarias	C2-24

	<u>Pág.</u>
2.1.3.4.- Uso de sal para el deshielo de la nieve	C2-24
2.1.4.- Microplásticos (como contaminante emergente).....	C2-25
2.1.4.1.- El problema de los microplásticos.....	C2-26
2.1.4.1.1.- Definición y origen de los microplásticos	C2-26
2.1.4.1.2.- Fuentes de microplásticos en entornos urbanos	C2-26
2.1.4.2.- Microplásticos como contaminantes en la lluvia.....	C2-26
2.1.4.2.1.- Transporte atmosférico y deposición de microplásticos a través de la lluvia.....	C2-26
2.1.4.2.2.- Impacto en la calidad del agua de lluvia y el suelo	C2-27
2.1.4.3.- Microplásticos en la escorrentía urbana	C2-27
2.1.4.3.1.- Fuentes de microplásticos en áreas urbanas .	C2-27
2.1.4.3.2.- Impacto de la escorrentía en cuerpos de agua superficiales	C2-27
2.1.4.4.- Impacto en medios acuáticos receptores y estaciones depuradoras de aguas residuales	C2-27
2.1.4.4.1.- Efectos de los microplásticos en ecosistemas acuáticos	C2-27
2.1.4.4.2.- Retención y liberación de microplásticos en estaciones depuradoras	C2-28
2.1.4.4.3.- Problemas asociados con el uso de lodos residuales en la agricultura	C2-28
2.1.4.5.- Medidas y estrategias para mitigar la contaminación por microplásticos	C2-28
2.1.4.5.1.- Estrategias de reducción en origen	C2-29
2.1.4.5.2.- Mejoras en el tratamiento de aguas residuales y gestión de lodos	C2-29
2.1.4.5.3.- Políticas y regulaciones relevantes	C2-29
2.1.4.6.- Investigaciones futuras	C2-30
 2.2.- CARACTERÍSTICAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA	 C2-31
2.2.1.- Composición de la contaminación.....	C2-31
2.2.1.1.- Contaminantes principales.....	C2-32
2.2.1.1.1.- Sedimentos	C2-32
2.2.1.1.2.- Sustancias que demandan oxígeno	C2-33
2.2.1.1.3.- Nutrientes	C2-34
2.2.1.1.4.- Metales pesados.....	C2-34
2.2.1.1.5.- Contaminantes tóxicos e hidrocarburos ...	C2-35
2.2.1.1.6.- Bacterias y virus	C2-36
2.2.1.1.7.- Cloruros y sodio	C2-36
2.2.1.1.8.- Microplásticos	C2-37
2.2.2.- Valores característicos.....	C2-37
2.2.2.1.- Por áreas o zonas	C2-43
2.2.2.1.1.- Residencial y comercial.....	C2-43

	<u>Pág.</u>
2.2.2.1.2.- Calles y autovías.....	C2-45
2.2.2.1.3.- Industrial.....	C2-47
2.2.3.- Relación con las aguas residuales urbanas	C2-51
2.3.- EL PRIMER LAVADO “FIRST FLUSH”	C2-54
2.3.1.- Introducción al fenómeno del “First Flush”	C2-54
2.3.1.1.- Definición del “First Flush”	C2-54
2.3.1.2.- Impacto en las áreas urbanas	C2-54
2.3.1.3.- Importancia de la gestión de aguas pluviales	C2-55
2.3.2.- Curvas M(V) en el análisis del “First Flush”	C2-56
2.3.2.1.- Definición de las curvas M(V)	C2-56
2.3.2.2.- Relación entre carga contaminante y volumen de escorrentía.....	C2-57
2.3.2.3.- Premisas y supuestos en el uso de curvas M(V)	C2-58
2.3.2.4.- Aplicaciones y desafíos del uso de las curvas M(V)..	C2-59
2.3.3.- Metodología para la evaluación del “First Flush”	C2-59
2.3.3.1.- Recopilación de datos de lluvia y escorrentía	C2-59
2.3.3.2.- Técnicas de monitoreo de calidad del agua.....	C2-60
2.3.3.3.- Simulación y modelado de eventos de lluvia	C2-60
2.3.3.4.- Técnicas de calibración y validación de modelos	C2-61
2.3.3.5.- Técnicas de análisis de datos.....	C2-61
2.3.3.6.- Métodos de predicción del primer lavado	C2-61
2.3.4.- Aplicaciones y condicionantes en el estudio del “First Flush”	C2-62
2.3.4.1.- Variables clave para predecir el “First Flush”	C2-62
2.3.4.2.- Aplicaciones en el diseño de sistemas de tratamiento	C2-62
2.3.4.3.- Factores limitantes y condicionantes en el análisis	C2-63
2.3.4.4.- Influencia de la infraestructura urbana	C2-63
2.3.4.5.- Condicionantes geográficos y climáticos	C2-64
2.3.4.6.- Aplicaciones futuras y recomendaciones	C2-64
2.4.- CARENCIAS ENCONTRADAS EN EL ESTADO DEL CONOCIMIENTO	C2-65
2.4.1.- Caracterización del “First Flush” y su variabilidad espacial y temporal	C2-65
2.4.2.- Simulación y evaluación de polutogramas	C2-65
2.4.3.- Impacto de contaminantes en cuencas urbanas y medios receptores fluviales.....	C2-65
2.4.4.- Eficiencia de modelos de simulación hidrológica como SWMM. C2- 66	
2.4.5.- Carencias en la aplicación de criterios Dosis-Tiempo de exposición para evaluar polutogramas desde el punto de vista de la contaminación.....	C2-66
2.4.5.1.- Limitación en la evaluación del impacto de la Dosis- Tiempo de exposición en la calidad del agua	C2-66

Pág.

2.4.5.2.- Insuficiente aplicación de modelos matemáticos complejos para evaluar la Dosis-Tiempo	C2-66
2.4.5.3.- Falta de criterios internacionales uniformes para el análisis Dosis-Tiempo	C2-67
2.4.6.- Carencias en el diseño de tanques de tormenta tomando en cuenta hietogramas de precipitación y período de retorno de lluvias críticas	C2-67
2.4.6.1.- Falta de uso de hietogramas rectangulares (I-D) aislados para evaluar lluvias críticas	C2-67
2.4.6.2.- Insuficiente evaluación del impacto de los hietogramas críticos sobre el diseño de tanques de tormenta.....	C2-67
2.4.6.3.- Falta de aplicación sistemática de períodos de retorno en el diseño de tanques de tormenta	C2-68
2.4.7.- Conclusiones.....	C2-68

3.- PLANTEAMIENTO

3.1.- OBJETIVO

3.2.- ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN.....

3.3.- SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA MATEMÁTICA O MODELO A UTILIZAR EN EL ANÁLISIS

3.4.- DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

4.- ESTUDIO PARTICULARIZADO DEL SISTEMA POR MEDIO DE UN CASO EN CONCRETO

4.1.- DATOS Y SIMULACION MATEMÁTICA.....

4.1.1.- Datos generales - Cuenca (30 ha)	C4-1
4.1.2.- Datos caso particular - Cuenca (1 ha).....	C4-4
4.1.3.- Curvas de acumulación y lavado de contaminantes	C4-5
4.1.4.- Matriz de lluvias	C4-6
4.1.5.- Simulación y obtención de hidrogramas y polutogramas.....	C4-7
4.1.5.1.- Fichero de datos de entrada SWMM	C4-7
4.1.5.2.- Fichero de salida SWMM.....	C4-8
4.1.5.3.- Ficheros necesarios para la simulación	C4-8
4.1.5.4.- Hidrogramas y polutogramas obtenidos en la simulación de todos los eventos de la matriz de lluvias elegida.....	C4-9

4.2.- ANÁLISIS TEÓRICO DE POLUTOGRAMAS DE ESCORRENTÍA URBANA. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN E IMPACTO C4-11

4.2.1.- Resumen	C4-13
4.2.2.- Introducción.....	C4-14
4.2.3.- Metodología.....	C4-15
4.2.3.1.- Identificación de variables de caracterización de hidrogramas y polutogramas	C4-16
4.2.3.2.- Ejemplos de gráficos característicos de hidrograma y polutogramas	C4-17
4.2.4.- Resultados y discusión	C4-18
4.2.4.1.- Valores resultantes de las variables para cada contaminante simulado.....	C4-18
4.2.4.2.- Valores de las variables de caracterización para cada I-D de la matriz de lluvias elegida y gráficos de contorno ..	C4-18
4.2.4.2.1.- Probabilidad de ocurrencia de los valores de las variables de caracterización.....	C4-21
4.2.4.3.- Coeficientes de correlación y coeficientes de determinación de las variables de caracterización.....	C4-23
4.2.4.3.1.- Mejores coeficientes de determinación para cada variable de caracterización	C4-23
4.2.4.4.- Análisis de componentes principales (PCA) y análisis de conglomerados (CA).....	C4-24
4.2.4.5.- Impacto e identificación de polutogramas más desfavorable	C4-26
4.2.4.5.1.- Variables de evaluación de impacto (IEV's) C4-	29
4.2.4.5.2.- Análisis de vertido a un medio receptor...	C4-30
4.2.4.5.3.- Análisis de rebose y dimensionamiento de tanques de tormenta	C4-33
4.2.5.- Conclusiones	C4-44

5.- ANÁLISIS E IMPACTO DEL PRIMER LAVADO (“FIRST FLUSH”) Y ALTERNATIVAS AL AJUSTE POTENCIAL DE LAS CURVAS M(V) PARA SU DETERMINACIÓN..... C5-1

5.1.- PENDIENTE (θ_i) Y TANGENTE (Δ_i) DE LA CURVA M(V) COMO ALTERNATIVAS PARA EL ESTUDIO DEL PRIMER LAVADO C5-5

5.1.1.- Resumen	C5-5
5.1.2.- Introducción.....	C5-5
5.1.3.- Metodología.....	C5-8

	<u>Pág.</u>
5.1.3.1.- Definición gráfica de los ángulos θ_i y Δ_i	C5-8
5.1.3.2.- Formulación matemática de los ángulos θ_i y Δ_i	C5-8
5.1.3.3.- Estudio de los ángulos θ_i y Δ_i	C5-10
5.1.4.- Resultados.....	C5-10
5.1.4.1.- Valores resultantes.....	C5-10
5.1.4.2.- Posibles nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando θ_i y Δ_i	C5-12
5.1.4.3.- Resultados de los nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando las curvas $[M(V), \theta_i, \Delta_i]$. C5-	13
5.1.5.- Discusión	C5-15
5.1.5.1.- Comentarios sobre el criterio N°1 ($\Delta_i = 45^\circ$).....	C5-15
5.1.5.2.- Comentarios sobre el criterio N°2 (Δ_{mean}).....	C5-16
5.1.5.3.- Comentarios sobre el criterio N°3 (Δ_{mean45}).....	C5-17
5.1.5.4.- Comentarios sobre el criterio N°4 (θ_{mean})	C5-18
5.1.5.5.- Volúmenes de almacenamiento (V_i/V_t), fracciones de masa lavada (M_i/M_t) e índices de masa (MI) de los diferentes criterios propuestos	C5-19
5.1.5.6.- Aplicación del criterio N°4 (θ_{mean}) a un caso específico	C5-23
5.1.6.- Conclusiones.....	C5-30

5.2.- GAP, MI Y EMC DINÁMICA DE LA CURVA M(V) COMO ALTERNATIVAS PARA EL ESTUDIO DEL PRIMER LAVADO .. C5-31

5.2.1.- Resumen	C5-31
5.2.2.- Introducción.....	C5-31
5.2.3.- Metodología.....	C5-32
5.2.3.1.- Definición de GAP, Maxgap, Gapmean, G1, G2	C5-32
5.2.3.2.- Definición de MI, MI _{mean} , EMC, DynEMCi, DynEMC _{mean} , DynEMC _{mean} /EMC	C5-33
5.2.4.- Resultados.....	C5-35
5.2.4.1.- Valores resultantes.....	C5-35
5.2.4.2.- Posibles nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando Maxgap, Gapmean, MI _{mean} y DynEMC _{mean} /EMC	C5-37
5.2.4.3.- Resultados de los nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando las curvas $[M(V), GAP, MI,$ $DynEMCi/EMC]$	C5-38
5.2.5.- Discusión	C5-39
5.2.5.1.- Comentarios sobre el criterio N°1 (Maxgap).....	C5-39
5.2.5.2.- Comentarios sobre el criterio N°2 (Gapmean).....	C5-40
5.2.5.3.- Comentarios sobre el criterio N°3 (MI _{mean})	C5-42
5.2.5.4.- Comentarios sobre el criterio N°4 (DynEMC _{mean} /EMC)	C5-42
5.2.5.5.- Volúmenes de almacenamiento (V_i/V_t) y fracciones de masa lavada (M_i/M_t) de los distintos criterios propuestos	C5-43

5.2.5.6.- Aplicación del criterio N°2 (Gapmean) a un caso específico	C5-47
5.2.6.- Conclusiones	C5-53
5.3.- VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE POLUTOGRAMAS DE ESCORRENTÍA URBANA. ANÁLISIS E IMPACTO DEL PRIMER LAVADO	C5-54
5.3.1.- Resumen	C5-54
5.3.2.- Introducción.....	C5-54
5.3.3.- Metodología.....	C5-57
5.3.3.1.- Caso de estudio y datos iniciales.....	C5-57
5.3.3.2.- Estudio del primer lavado.....	C5-57
5.3.3.2.1.- Criterio de primer lavado N°1: $[Mi/Mt - Vi/Vt] > 0$	C5-60
5.3.3.2.2.- Criterio de primer lavado N°2: $\theta_i > 45^\circ$...	C5-62
5.3.3.2.3.- Criterio de primer lavado N°3: $[DynEMC_{mean}/EMC] > 1$	C5-63
5.3.3.3.- Criterios para la selección de los polutogramas más desfavorables dentro de la matriz de lluvias elegida .	C5-63
5.3.3.3.1.- Exponente “b” del ajuste potencial de la curva $M(V)$	C5-64
5.3.3.3.2.- Criterio “Dosis - Tiempo de Exposición” con variables: EMC, bMiMt, Tff.....	C5-64
5.3.3.3.3.- Criterio “Dosis - Tiempo de Exposición” con variables: EMCTff, bMiMtTff, Tff	C5-65
5.3.4.- Resultados y discusión	C5-66
5.3.4.1.- Valores resultantes de las variables para cada contaminante simulado.....	C5-66
5.3.4.2.- Gráficos representativos de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado)	C5-67
5.3.4.3.- Valores de las variables de caracterización para cada I-D de la matriz de lluvias elegida y sus gráficos de contorno	C5-72
5.3.4.4.- Coeficientes de correlación y coeficientes de determinación de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado)	C5-74
5.3.4.4.1.- Mejores coeficientes de determinación para cada variable de caracterización	C5-74
5.3.4.5.- Análisis de componentes principales (PCA) y análisis de conglomerados (CA).....	C5-76
5.3.4.6.- Resultados de los dos ajustes potenciales de la curva $M(V)$ para la matriz de lluvias elegida	C5-79
5.3.4.7.- Resultados y dispersión de las variables que cuantifican el primer lavado para la matriz de lluvias elegida.....	C5-81

Pág.

5.3.4.8.- Gráficos de contorno (I-D, Percentiles) de las variables que cuantifican el primer lavado para la matriz de lluvias elegida.....	C5-85
5.3.4.9.- Líneas de diseño de las variables que cuantifican el primer lavado, para la matriz de lluvias elegida.....	C5-87
5.3.4.10.- Análisis de rebose y dimensionamiento de tanques de tormenta	C5-89
5.3.5.- Conclusiones.....	C5-98

6.- CONCLUSIONES C6-1

6.1.- CONCLUSIONES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN C6-1

6.1.1.- Impacto de la urbanización en la escorrentía.....	C6-1
6.1.2.- Eficiencia del modelo SWMM para la simulación de escenarios C6-1	
6.1.3.- Importancia de los parámetros hidrológicos.....	C6-1
6.1.4.- Necesidad de almacenamiento y depuración.....	C6-2

6.2.- CONCLUSIONES SOBRE LA CORRELACIÓN DE VARIABLES (APARTADOS 4.2.4.3 Y 5.3.4.4) C6-2

6.2.1.- Coeficientes de correlación y determinación.....	C6-2
6.2.2.- Mejores coeficientes de determinación	C6-3
6.2.3.- Relación entre variables del primer lavado	C6-3

6.3.- CONCLUSIONES SOBRE ANÁLISIS MULTIVARIANTE (APARTADOS 4.2.4.4 Y 5.3.4.5) C6-3

6.3.1.- Análisis de Componentes Principales (PCA)	C6-3
6.3.2.- Análisis de Conglomerados (CA).....	C6-4

6.4.- CONCLUSIONES SOBRE LAS LLUVIAS CRÍTICAS C6-4

6.4.1.- Escenarios de mayor desfavorabilidad en polutogramas.....	C6-4
6.4.2.- Simulación de vertidos a medios receptores.....	C6-5

6.5.- CONCLUSIONES SOBRE LA MODELIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO C6-5

6.5.1.- Variables clave para cuantificar el primer lavado	C6-5
6.5.2.- Relación entre variables dinámicas (DynEMCmean, Gapmean, MImean).....	C6-5

6.6.- RECOMENDACIONES TÉCNICAS..... C6-6

6.6.1.- Implementación de sistemas de control dinámico	C6-6
--	------

	<u>Pág.</u>
6.6.2.- Optimización del diseño de infraestructuras	C6-6
6.6.3.- Monitoreo y tratamiento de vertidos a ríos	C6-6
6.6.4.- Integración de infraestructuras verdes.....	C6-6
6.7.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	C6-6
6.7.1.- Líneas de investigación como prolongación de la presente investigación	C6-6
6.7.1.1.- Estudio generalizado del sistema	C6-6
6.7.1.2.- Simulación dinámica de vertidos a medios receptores.	C6-6
6.7.2.- Líneas de investigación innovadoras.....	C6-6
6.7.2.1.- Modelos predictivos basados en Inteligencia Artificial	C6-6
6.7.2.2.- Evaluación del impacto del cambio climático.....	C6-7
6.7.2.3.- Investigación sobre contaminantes emergentes	C6-7
6.7.2.4.- Aplicación de tecnologías de sensorización avanzada	C6-7
7.- REFERENCIAS.....	C7-1

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

FIG.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
2.1	Ejemplo de obtención de una curva M(V) para SST	C2-57
4.1	Cuenca vertiente seleccionada	C4-2
4.2	Alternativa de red de drenaje para la cuenca vertiente seleccionada	C4-2
4.3	Variables de caracterización de hidrograma y polutogramas	C4-16
4.4	Hidrograma y polutogramas (Contaminante TS) obtenidos para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min	C4-17
4.5	Ejemplos de polutogramas dentro de la matriz de lluvias elegida	C4-18
4.6	Gráfico de contorno de Qmean (L/s)	C4-20
4.7	Gráfico de contorno de EMC (mg/L) para el contaminante TS	C4-21
4.8	Gráfico de contorno de EMC (mg/L) y Tr (años) para el contaminante TS	C4-22
4.9	Análisis de componentes principales (PCA) de las variables de caracterización de los polutogramas para el contaminante TS	C4-25
4.10	Análisis de conglomerados (CA) / Dendrograma de las variables de caracterización de los polutogramas para el contaminante TS	C4-26
4.11	Hipótesis de vertido de escorrentía urbana a un río	C4-31
4.12	Hipótesis de rebose de alcantarillado pluvial	C4-34
4.13	Diagrama de flujo de la metodología utilizada	C4-43
5.1	Tipología de las curvas M(V) en función del parámetro “b”	C5-7
5.2	Definición gráfica de los ángulos θ_i y Δ_i	C5-8
5.3	Curvas [M(V), θ_i , Δ_i] para los diferentes tipos de primer lavado	C5-11
5.4	Valores de Vi/Vt y Mi/Mt para diferentes “b” (Criterio N°1 $\Delta_i = 45^\circ$)	C5-15
5.5	Valores de Vi/Vt, Mi/Mt y Δ_{mean} para diferentes “b” (Criterio N°2 Δ_{mean})	C5-16
5.6	Valores de Vi/Vt, Mi/Mt y Δ_{mean45} para diferentes “b” (Criterio N°3 Δ_{mean45})	C5-17
5.7	Valores Vi/Vt, Mi/Mt y θ_{mean} para diferentes “b” (Criterio N°4 θ_{mean})	C5-18
5.8	Valores Vi/Vt y Mi/Mt para diferentes criterios y para diferentes valores “b”	C5-20
5.9	Valores de MI de los diferentes criterios para diferentes valores “b”	C5-21
5.10	Valores de “b” y sus percentiles para el caso específico estudiado	C5-25
5.11	Valores R^2 y sus percentiles para el caso específico estudiado	C5-26
5.12	Valores de $\theta_{mean'}$ y sus percentiles para el caso específico estudiado	C5-27
5.13	Comparación de los valores de $\theta_{mean'}$ (caso específico estudiado) y θ_{mean} (Tabla 5.2) para valores de $b \leq 1$	C5-28
5.14	Posibles formas de curvas reales M(V)	C5-29
5.15	Variables de caracterización de la curva M(V)	C5-32
5.16	Curvas [M(V), GAP, MI, DynEMCi/EMC] para los diferentes tipos de primer lavado	C5-36
5.17	Valores de Vi/Vt y Mi/Mt para distintos “b” (Criterio N°1 Maxgap)	C5-39
5.18	Valores de Vi/Vt, Mi/Mt y Gapmean para diferentes “b” [Criterio N°2 Gapmean (G1)]	C5-40
5.19	Valores de Vi/Vt, Mi/Mt y Gapmean para diferentes “b” [Criterio N°2 Gapmean (G2)]	C5-41
5.20	Valores de Vi/Vt, Mi/Mt y MImean para diferentes “b” (Criterio N°3 MImean)	C5-42
5.21	Valores de Vi/Vt, Mi/Mt y DynEMCmean/EMC para distintos “b” (Criterio N°4 DynEMCmean/EMC)	C5-42
5.22	Valores Vi/Vt y Mi/Mt para diferentes criterios y para diferentes valores de “b”	C5-44
5.23	Valores de MI de los diferentes criterios para diferentes valores “b”	C5-45
5.24	Valores de Gapmean' y sus percentiles para el caso específico estudiado	C5-48
5.25	Comparación de valores de Gapmean' (caso específico estudiado) y Gapmean (Tabla 5.6), para valores de $b \leq 1$	C5-49
5.26	Comparación de los valores (MImean y DynEMCmean/EMC) del caso específico estudiado y los obtenidos en esta investigación (Tabla 5.6), para valores de $b \leq 1$	C5-50

FIG.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
5.27	Curva M(V) y su ajuste con fórmula potencial	C5-57
5.28	Variables de caracterización de la curva M(V)	C5-59
5.29	Representación de To y Tf en el hidrograma y polutogramas (Contaminante TS) obtenidos para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min	C5-67
5.30	Variables de caracterización de la concentración (Contaminante TS) obtenidas para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min durante los primeros ocho minutos	C5-68
5.31	Hidrograma, polutogramas y variables de caracterización (Contaminante TS) obtenidos para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min con eje de abscisas normalizado Vi/Vt	C5-69
5.32	Hidrograma, polutogramas y variables de caracterización (Contaminante TS) obtenidos para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min con eje de abscisas estandarizado Mi/Mt	C5-69
5.33	Curva M(V) y ajuste de regresión durante el tiempo Tt obtenido para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min	C5-70
5.34	Curva M(V) y ajuste de regresión durante el tiempo Tff obtenido para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min	C5-70
5.35	Curvas M(V) y ajustes de regresión obtenidos para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min, con eje de abscisas estandarizado Ti/Tt	C5-71
5.36	Curva θ_i -T obtenida para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min	C5-71
5.37	Curva θ_i (V) obtenida para la lluvia I = 140 mm/h, D = 4 min	C5-72
5.38	Gráfico de contorno de bMiMt para el contaminante TS	C5-74
5.39	Análisis de componentes principales (PCA) de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado) para el contaminante TS	C5-77
5.40	Análisis de conglomerados (CA) / Dendrograma de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado) para el contaminante TS	C5-79
5.41	Líneas de percentiles de las variables bMiMt y θ_{mean} para la matriz de lluvias elegida	C5-86
5.42	Líneas de diseño de las variables que cuantifican el primer lavado para la matriz de lluvias elegida	C5-88
5.43	Diagrama de flujo de la metodología utilizada	C5-97

LISTA DE TABLAS

TAB.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
1.1	Ejemplos de estudios sobre contaminación en tiempo de lluvia en España	C1-2
2.1	Calidad del agua de lluvia	C2-4
2.2	Calidad del agua de lluvia	C2-4
2.3	Calidad del agua de lluvia	C2-5
2.4	Calidad del agua de lluvia	C2-6
2.5	Deposición de microplásticos atmosféricos en tiempo de lluvia	C2-6
2.6	Deposición de microplásticos atmosféricos en tiempo seco	C2-8
2.7	Contribuciones de la deposición atmosférica a la calidad de las aguas pluviales urbanas	C2-9
2.8	Contribuciones de los excrementos de animales a la calidad de las aguas pluviales urbanas	C2-10
2.9	Calidad del agua de escorrentía de calles	C2-12
2.10	Calidad del agua de escorrentía de tejados en zonas urbanas	C2-14
2.11	Calidad del agua de escorrentía de tejados	C2-14
2.12	Calidad del agua de escorrentía de jardines	C2-15
2.13	Especificación de metales pesados y HAPs en forma disuelta y asociados a partículas en la escorrentía de carreteras. Porcentajes de contaminación asociada a partículas > 0,45 µm	C2-17
2.14	Contaminantes liberados por el tráfico vehicular en zonas urbanas	C2-22
2.15	Fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía en carreteras	C2-22
2.16	Estimación de las cargas contaminantes anuales unitarias para aguas de escorrentía de carreteras en Francia con IMD de hasta 10.000 vehículos/día	C2-23
2.17	Principales contaminantes presentes en la escorrentía urbana	C2-38
2.18	Características principales de las aguas de escorrentía urbana	C2-39
2.19	Características principales de las aguas de escorrentía urbana	C2-40
2.20	Características de las aguas de escorrentía urbana	C2-40
2.21	Características de las aguas de escorrentía urbana en diferentes ciudades españolas	C2-41
2.22	Origen de los contaminantes en la escorrentía urbana	C2-42
2.23	Valores típicos de contaminación de la escorrentía urbana en zonas residenciales y comerciales	C2-44
2.24	Valores característicos de contaminantes en escorrentías de áreas residenciales y comerciales	C2-45
2.25	Cargas medias de contaminación (kg/km cuneta/día) en la escorrentía urbana de calles y autovías	C2-46
2.26	Concentraciones de contaminantes en la escorrentía de zonas industriales	C2-50
2.27	Comparación de concentraciones (P_{50}) en mg/L de escorrentías de diferentes cuencas y usos de suelo	C2-50
2.28	Proporción másica en % de contaminación anual aportada por las diversas fuentes de contaminación de los reboses de alcantarillado unitario	C2-52
2.29	Comparación de concentraciones (agua residual urbana, escorrentía superficial y rebose de alcantarillado unitario)	C2-52
2.30	Comparación de concentraciones (agua de lluvia, escorrentía superficial, rebose de alcantarillado unitario, agua residual urbana)	C2-53
4.1	Valores de Q_{mean} (L/s) en la matriz de lluvias	C4-19
4.2	Valores de EMC (mg/L) en la matriz de lluvias para el contaminante TS	C4-20
4.3	Valores de EMC (mg/L) y Tr (años) en la matriz de lluvias para el contaminante TS	C4-23
4.4	Mejores coeficientes de determinación R^2 de las variables de caracterización de los polutogramas para el contaminante TS	C4-24

TAB.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
4.5	Situaciones más desfavorables para evaluar sucesos de contaminación	C4-27
4.6	Ejemplos de IEV's	C4-29
4.7	Ejemplos de IEV's para analizar los vertidos de escorrentía urbana al río	C4-32
4.8	Diez valores más altos de $\uparrow Cr_{Fm} \uparrow T_t$ con sus correspondientes lluvias desfavorables I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS	C4-33
4.9	Diez valores más altos de $\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot T_{fp}$ con sus correspondientes lluvias desfavorables I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS	C4-33
4.10	Vstso (m^3/ha imp) para contaminante TS con límite Tr_{ssd} (Santander) = 10 años	C4-36
4.11	Vstso (m^3/ha imp) para contaminante TS con RVF = 80% y Tr_{ssd} (Santander) = 10 años	C4-37
4.12	Para cada Intensidad: valores de Vstorage (m^3/ha imp) más cercanos a P90 con sus correspondientes $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow T_t$ (escala de 10 puntos) y Tr (años) para el contaminante TS. [RVF = 80% y Tr_{ssd} (Santander) = 10 años]	C4-38
4.13	Valores de Vstorage con sus correspondientes lluvias desfavorables I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS (Para diferentes RVF's y Tr_{ssd} 's)	C4-40
5.1	Criterios alternativos para analizar polutogramas desfavorables	C5-12
5.2	Resultados de los criterios alternativos para analizar polutogramas desfavorables	C5-14
5.3	Resumen de resultados de "b" para los eventos de escorrentía urbana simulados	C5-24
5.4	Propuesta de valores de θ_{mean} para el estudio del primer lavado	C5-29
5.5	Criterios alternativos para analizar polutogramas desfavorables	C5-37
5.6	Resultados de los criterios alternativos para analizar los polutogramas más desfavorables	C5-38
5.7	Propuesta de valores de Gapmean, MI _{mean} y DynEMC _{mean} /EMC para el estudio del primer lavado	C5-52
5.8	Valores de bMiMt en la matriz de lluvias para el contaminante TS	C5-73
5.9	Mejores coeficientes de determinación R^2 de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado) para el contaminante TS	C5-75
5.10	Comparación de valores estadísticos entre los dos ajustes potenciales de la curva M(V) para la matriz de lluvias elegida	C5-80
5.11	Resumen de los resultados de bMiMt para la matriz de lluvias elegida	C5-82
5.12	Para cada Intensidad: valores de Vstorage (m^3/ha imp) más cercanos a P90 con sus correspondientes bMiMt y Tr (años) para el contaminante TS. [RVF = 80% y Tr_{ssd} (Santander) = 10 años]	C5-91
5.13	Valores de Vstorage con sus correspondientes lluvias desfavorables I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS (Para diferentes RVF's y Tr_{ssd} 's)	C5-93
5.14	Ligera variación en los resultados al buscar Vstorage utilizando la alternativa (II): $\uparrow MI_{mean}$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$; o la alternativa (III): $\uparrow DynEMC_{mean}/EMC$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$	C5-98

LISTA DE ANEXOS

ANEXO	DESCRIPCIÓN
A4.1	Ejemplo de fichero de datos
A4.2	Ejemplo de fichero de resultados
A4.3	Datos de lluvia en fichero Case1622.inp
A4.4	Datos de lluvia en fichero Rains.dat
A4.5	Hidrogramas y polutogramas
A4.6	Herramienta de simulación
A4.7	Valores de variables de caracterización de polutogramas para el contaminante TS
A4.8	Gráficos de contorno de variables de caracterización para el contaminante TS
A4.9	Coefficientes de correlación y determinación entre variables de caracterización para el contaminante TS
A4.10	Gráficos de contorno de variables IEV's para el contaminante TS
A5.1	Herramienta para generar curvas M(V) con distintos valores de “b”
A5.2	Valores de variables de caracterización del primer lavado para el contaminante TS
A5.3	Gráficos de contorno de variables de caracterización del primer lavado para el contaminante TS
A5.4	Coefficientes de correlación y determinación entre variables de caracterización del primer lavado para el contaminante TS

ANEXO	PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN
ART-1	<i>Theoretical analysis of urban runoff pollutographs: identification of characterization variables and impact</i>
ART-2	<i>Slope (θ_i) & tangent (Δi) of the curve M(V) as alternatives for the study of the first flush</i>
ART-3	<i>GAP, MI and Dynamic EMC of the curve M(V) as alternatives for the study of the first flush</i>
ART-4	<i>Characterization variables of urban runoff pollutographs. First flush analysis and impact</i>

CAPÍTULO 1

Generalidades

1.- GENERALIDADES

1.1.- INTRODUCCIÓN

1.1.1.- Descripción del problema

Es bien sabido que las aguas pluviales urbanas ocasionan graves impactos en los medios acuáticos receptores, incluyendo la degradación de la calidad del agua, la erosión inducida por la corriente y la pérdida de hábitat (*varios autores citados por Muschalla et al., 2014*).

La urbanización es uno de los problemas más característicos de nuestro tiempo, que además tiende a intensificarse en el futuro. Según las Naciones Unidas, aproximadamente el 55% de la población mundial es urbana y alcanzará el 66% en el 2050 (*UNDESA, 2014 citado en Sharma et al., 2019*). Sin embargo, las áreas urbanas en cada país son bastante pequeñas y adaptadas a las necesidades del hombre y no a las de las especies vegetales y animales; en donde, clima, ciclo de nutrientes, flujos de energía, estructura espacial e inventario biológico, difieren sustancialmente del entorno rural (*Sukopp, 1989 citado por Jiménez Gallardo, 1999*).

Se puede caracterizar a las zonas urbanas desde un punto de vista medio ambiental como zonas donde ocurre (*varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999; Sañudo Fontaneda et al., 2012; Rodríguez Bayón, 2013*):

- Utilización y consumo de energía a gran escala.
- Heterogeneidad en el espacio estructurado y en los usos del suelo.
- Marcado descenso de las especies vegetales y animales.
- Acumulación y aislamiento de materiales procedentes de la construcción, así como alteraciones de la topografía provocadas por movimientos de tierras a gran escala, y por obras.
- Gran número de núcleos de condensación en el aire producto del alto grado de contaminación, que provocan un cambio en el equilibrio térmico que se materializa en forma del efecto invernadero.
- Contaminación acelerada de aire, suelo, agua e impacto en los medios receptores.
- Canalización, importación, y grandes consumos de agua.

El agua, como elemento condicionante de vida, ha sido factor fundamental en el asentamiento humano. A lo largo de la historia, este elemento vital ha ido, por un lado aumentando en cuanto a su necesidad y demanda, y por otro, disminuyendo en cuanto a su disponibilidad. Pero, es con el inicio de la revolución industrial, según criterio de muchos investigadores, cuando las ciudades crecieron rápidamente paralelamente al

incremento desmesurado de la contaminación ambiental. La calidad ambiental, y particularmente la contaminación del agua se han convertido efectivamente en un grave problema y el hombre preocupado por su entorno ha empezado a alarmarse ideando medidas que contrarresten dicha situación.

Existen innumerables estudios que demuestran lo compleja y determinante que puede ser dicha contaminación al analizar además la respuesta que tienen los distintos elementos que conforman la cadena producción/recepción/tratamiento/destino final de las aguas contaminadas generadas por los sucesos de lluvia. No obstante, todos los estudios concuerdan que su caracterización y su estimación del impacto que generan es de muy difícil cuantificación sumada la problemática adicional del tiempo y costos que ello implica. En España, varios estudios importantes de ello se detallan a continuación:

Tabla 1.1 Ejemplos de estudios sobre contaminación en tiempo de lluvia en España

Estudio	Lugar	Año	Sucesos de lluvia estudiados
GEAMA (Grupo Ing. y M.A. U.Coruña ^(a))	Santiago de Compostela-Cuenca “Santiago Este”	1998 - 1999	11
GEAMA (Grupo Ing. y M.A. U.Coruña ^(a))	Santiago de Compostela-Cuenca “Cancelón”	2002 - 2003	13
PROMEDSU ^(a) (Programa Nacional de Medición de Descargas de Sistemas Unitarios)	Madrid, Barcelona, Vitoria, Sevilla y Valencia	2000 - 2001	46
Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain ^(b)	Santander	2001	3
Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía ^(c)	Torrelavega	2004	10
SOSTAQUA ^(a) (Proyecto CENIT)	Barcelona-Cuenca “Riera D’Horta”	2007 - 2010	9
GEAMA (Grupo Ing. y M.A. U.Coruña ^(a))	Santiago de Compostela-Subcuenca “El Ensanche”	2008 - 2009	10

(a) *Del Río Cambeses, 2011*

(b) *Temprano *et al.*, 2006*

(c) *Zafra Mejía *et al.*, 2009*

Se puede observar que el número de sucesos de lluvia analizados ha sido:

Min: 3

Máx: 46

Media: 14,6

Hacer uso de la simulación matemática es una buena forma de analizar muchos más sucesos para múltiples tipos de cuenca. Así pues, la presente investigación pretende, de esta manera abordar la problemática mencionada de forma más amplia mediante la modelización matemática simulando un conjunto importante de sucesos de lluvia aplicados a diversas cuencas urbanas con distintas características de área, impermeabilidad, pendiente.

1.1.2.- Antecedentes

Hablar de la contaminación del agua implica intrínsecamente hablar de los conceptos de: aguas residuales y aguas blancas. El problema surge al querer fijar un punto de referencia que permita diferenciar entre un concepto y otro. Es así que aparecen términos complementarios que ayudan en esta labor, siendo algunos de estos: calidad de aguas, objetivos de calidad, criterios y estándares, etc.

Al hacer referencia de lo dicho anteriormente, a las aguas procedentes de la escorrentía superficial, se puede decir que:

- A principios de los años 70 ya se empieza a analizar y discutir el ciclo del agua en el medio urbano y particularmente la contaminación de las aguas de escorrentía. Las aguas de lluvia y las de escorrentía se consideraban esencialmente limpias y, el concepto de aguas blancas se aplicaba a este tipo de aguas (*Momparler y Andrés-Doménech, 2007; Russo et al., 2007; Rodríguez Bayón, 2013; Müller et al., 2020*).
- Gracias a muchos investigadores, en la actualidad se sabe que la escorrentía de áreas urbanas contiene cantidades significativas de los mismos tipos de contaminantes que se encuentran en las aguas residuales urbanas; y que causan problemas similares de calidad de aguas o incluso, superiores (*García Haba, 2011; Espín Leal, 2016; Lastra et al., 2020*). Estos contaminantes pueden incluir: metales pesados, (cromo, cadmio, cobre, plomo, níquel, zinc), pesticidas, herbicidas y compuestos orgánicos tales como: combustibles, aceites, solventes, lubricantes, y grasas (*Perales Momparler, 2008; Suárez et al., 2010; Müller et al., 2020*).

Si se analiza el problema de la contaminación de las aguas de escorrentía en uno de los países que lleva la delantera en el estudio de este tema, como es los EE.UU., se puede encontrar que la Agencia de Protección Ambiental (EPA) condujo un programa para el estudio de la escorrentía urbana a nivel nacional (El Nationwide Urban Runoff Program [NURP]) desde 1978 a 1983. Posteriormente en 1988 igualmente la EPA, envió un reporte al Congreso que consistía en un inventario de la calidad del agua a nivel nacional. En este informe se ratificaba en 37 estados, a la escorrentía superficial de zonas urbanas, como la primera causa de deterioro de la calidad del agua (*U.S. EPA, 1991a citada por Jiménez Gallardo, 1999; Smith, 2015; Pitt et al., 2018 citados por Müller et al., 2020*).

Posteriormente, el congreso de EE.UU. modificó la Ley/Acta de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA) en 1987 para exigir que la EPA establezca regulaciones específicas por fases para vertidos de aguas pluviales dentro del Sistema Nacional de eliminación de vertidos contaminantes (NPDES, National Pollutant Discharge Elimination System). Para implementar estas regulaciones, la EPA publicó el 16 de noviembre de 1990 (NPDES Fase I) los requisitos iniciales de solicitud de permisos para ciertas categorías de descargas de aguas pluviales asociadas con la actividad industrial y para vertidos de sistemas municipales de alcantarillado separativo ubicados en municipios con una población de 100.000 o más habitantes (*U.S. EPA, 2000 citada por Ringler, 2007*).

El 7 de agosto de 1995, la EPA promulgó reglamentos de aplicación para la Fase II del Programa NPDES. Las regulaciones de la Fase II establecieron un proceso de aplicación secuencial para controlar todos los vertidos compuestos íntegramente de agua de lluvia, excepto aquellos clasificados específicamente dentro de la Fase I. Tales descargas incluyeron aguas pluviales de pequeños sistemas municipales de alcantarillado pluvial e instalaciones comerciales e institucionales. Se han efectuado acciones complementarias a partir de 1999 para completar las actuaciones demandadas por el Programa NPDES (U.S. EPA, 2000 citada por Ringler, 2007).

En 2001, la Universidad de Alabama y el Centro para la Protección de Cuencas Hidrográficas (CWP, Center for Watershed Protection) recibieron una subvención de la EPA para recopilar y evaluar datos de calidad de aguas pluviales a nivel nacional. La recopilación realizada (La NSQD, National Stormwater Quality Database) es una base de datos de caracterización de escorrentías de aguas pluviales urbanas que se actualizó periódicamente hasta 2015. La versión 4.02 contiene datos de más de 9.000 eventos de escorrentía de aproximadamente 200 municipios en todo el país, que representan múltiples usos de la tierra. La NSQD es un recurso importante para los administradores e investigadores municipales de aguas pluviales que buscan datos de caracterización de escorrentías urbanas. Se pueden buscar datos sobre la calidad del agua por zonas geográficas (Estados), usos de la tierra, zonas de lluvia establecidas por la EPA, junto con otros varios criterios (Smith, 2015; Pitt *et al.*, 2018 citados por Müller *et al.*, 2020; <https://bmpdatabase.org/national-stormwater-quality-database>).

En Europa, la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas ha sido el marco general donde se encuadran actuaciones sobre la problemática en cuestión. La Directiva contempla además del tratamiento, la recogida y conducción de las aguas residuales. En su Anexo I hace referencia directa de la restricción de la contaminación de las aguas receptoras por el desbordamiento (reboses) de las aguas de tormentas. Llevar a efecto dicha Directiva significó revisar y redefinir planes de saneamiento y depuración con enfoques nuevos y más completos (Jiménez Gallardo, 1999).

La Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DMA) establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas para la consecución del buen estado de las masas de agua superficiales y subterráneas de los Estados Miembro. Los planteamientos más significativos de la DMA se sintetizan en la búsqueda de la convergencia en cuanto a la oferta, la demanda y la gestión del agua, en la mejora de la calidad de las aguas y el medio ambiente, la introducción de mayor eficacia que permita un ahorro del recurso y una participación más elevada del sector privado y de los usuarios. A pesar de que la DMA defina el marco común y los objetivos y principios generales, es conveniente señalar la existencia de condiciones y necesidades distintas a lo largo de toda la Unión Europea, por lo que se requieren soluciones específicas. Para ello se establece la necesidad de desarrollar un programa de medidas que forme parte del Plan Hidrológico de cada Demarcación Hidrográfica y que tome también en cuenta el ámbito autonómico e incluso ámbito local (Chave, 2001 citado por Freni *et al.*, 2010; Soriano Martínez, 2015; Espín Leal, 2016).

En la actualidad en España se están dando pasos importantes para mejorar la gestión de las aguas de lluvia en los entornos urbanos. La incorporación en la legislación del Real Decreto 1290/2012 publicado el 20 de Septiembre de 2012 para conseguir un buen estado ecológico de las masas de agua, ha establecido la obligatoriedad de obtener una autorización de vertido para los desbordamientos de los sistemas de saneamiento de ciudades con más de 50.000 habitantes equivalentes (*Malgrat et al., 2015; Soriano Martínez, 2015; Espín Leal, 2016*).

En España se han realizado diversos estudios para caracterizar los vertidos que se producen desde los aliviaderos (ver Tabla 1.1). El más importante fue el promovido por el entonces Ministerio de Medio Ambiente denominado “Programa Nacional de Medición de Descargas de Sistemas Unitarios”, PROMEDSU entre los años 2000 y 2001 (*Beneyto, 2004; Del Río Cambeses, 2011; Suárez López et al., 2012; García González et al., 2012*). El Plan Nacional de Calidad de Aguas: saneamiento y depuración (2007-2015), desarrollado con el objetivo de cumplir los requisitos establecidos en las Directivas 91/271 y 2000/60, tiene en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización de contaminantes movilizados en tiempo de lluvia en el Programa PROMEDSU. En el apartado “Estado actual del tratamiento de las cargas de episodios de lluvia” se señala la importancia del control de la contaminación producida por descargas de sistemas unitarios promovidas por el alivio de la mezcla de agua residual con pluvial durante tormentas. Este Plan también marca como líneas de actuación e investigación el diseño y estudio de tanques de tormenta, planeando una inversión de unos 3.000 millones de euros para actuaciones de este tipo y otro tanto por ciento del presupuesto para el fomento de labores de I+D+i en este campo (*Espín Leal, 2016*).

También, entre los años 2007 y 2010 en el marco del proyecto CENIT “SOSTAQUA: DESARROLLOS TECNOLÓGICOS HACIA EL CICLO URBANO DEL AGUA AUTOSOSTENIBLE” liderado por Aguas de Barcelona (AGBAR) y subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), se estudió una cuenca piloto de “Riera d’Horta” en la ciudad de Barcelona, caracterizando 9 sucesos pluviométricos con sus respectivos parámetros hidrológico/hidráulicos (*Del Río Cambeses, 2011*).

En España; como se ha detallado, no existen muchos estudios sobre el tema y está clara la necesidad de investigar y estudiar nuevas metodologías para analizar el problema de la contaminación de las aguas de escorrentía. Concretamente, en la Universidad de Cantabria, el Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente y en particular, su Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA); sensibilizado con el problema de la contaminación en tiempo de lluvia, ha visto la necesidad de incluir dentro de sus líneas de investigación el análisis de dicha problemática.

Como antecedente al presente estudio y dentro del ámbito de trabajo del GIA, se encuentran realizadas algunas revisiones bibliográficas, informes parciales, estudios y las siguientes investigaciones y publicaciones:

- Sistemas de control y tratamiento de reboses (S.C.T.R.). Optimización del binomio Depósito - Decantador. (Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad de Cantabria, Santander, 1993)

- Contaminación de la escorrentía superficial (Informe emitido para el Grupo de Emisarios Submarinos, Fundación Leonardo Torres Quevedo, Universidad de Cantabria, Santander, 1993)
- Modelos de calidad del agua del río Nalón (Tramo Superior). Aplicación al estudio del estiaje húmedo. (Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, 1994)
- Influencia de la conceptualización de pequeñas cuencas urbanas en la simulación de hidrogramas de escorrentía superficial mediante el Storm Water Management Model (SWMM). (Tesina de fin de carrera, Santander, 1994)
- Contaminación de la escorrentía superficial urbana: Determinación de polutogramas de cálculo. (Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad de Cantabria, Santander, 1994)
- Análisis de la representación conceptual de la agrupación de pequeñas cuencas urbanas para su simulación mediante el SWMM. (Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad de Cantabria, Santander, 1995)
- Depuración de aguas residuales urbanas en tiempo de lluvia. Panorámica General. (Ponencia; Jornadas Técnicas sobre la Calidad de aguas e Impacto en medios receptores por vertidos procedentes de drenajes urbanos y agrícolas, Benicassim, 1995)
- Dimensionamiento ambiental de depósitos de tormenta en conducciones de alcantarillado. (1er Premio URALITA-OBRA CIVIL de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria; Santander, 1995. Premio Especial URALITA-OBRA CIVIL a nivel nacional, Madrid, 1995)
- Contaminación de redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control en origen. (Publicación en la Revista de Obras Públicas, Madrid, 1996)
- Contaminación de redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control de vertidos. (Publicación en la Revista de Obras Públicas, Madrid, 1996)
- Sistemas de control y tratamiento de reboses. Optimización del binomio Depósito-Decantador. (Comunicación oral aceptada; 7ma Conferencia Internacional sobre Drenaje Urbano en tiempo de lluvia, Hannover, 1996)
- Contaminación de la escorrentía superficial urbana: Determinación de polutogramas de cálculo. (Comunicación oral aceptada; 7ma Conferencia Internacional sobre Drenaje Urbano en tiempo de lluvia, Hannover, 1996)
- Criterios de dimensionamiento de depósitos de tormenta para Santander. (Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, 1997)

- Dimensioning criteria for storm water tanks for Santander. The case of ocean combined sewer overflow discharge. (Publicación en la Revista European Water Management. Vol. 1, N° 4, pp. 55-60, 1998)
- Detention storage volume for combined sewer overflow into a river. (Publicación en la Revista Environmental Technology. Vol. 23, N° 6, pp. 663-675, 2002)
- Aplicabilidad de aguas regeneradas en una zona costera de alta pluviosidad. (Publicación en la Revista Ingeniería del Agua. Vol. 10, N°1, pp. 59-68, 2003)
- Evaluación de la contaminación olorosa procedente de redes de alcantarillado unitarias: el caso de Santander. (Publicación en la Revista Técnica de Medio Ambiente. Vol. 93, pp. 24-39, 2003)
- Stormwater calibration by SWMM: A case study in northern Spain. (Publicación en la Revista Water SA. Vol. 32, N° 1, pp. 55-63, 2006)
- Particle size distribution of accumulated sediments on an urban road in rainy weather. (Publicación en la Revista Environmental Technology, Vol. 29, N° 5, pp. 571-582, 2008)
- Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía. (Publicación en la Revista Ingeniería e Investigación, Vol. 29, N° 1, pp. 101-108, 2009).
- Concentración y distribución de metales pesados (Pb, Zn, Cu, Cd y Cr) en sedimentos viarios urbanos. (Publicación en la Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquía, N° 58, pp. 53-62, 2011)
- Distribution of the concentration of heavy metals associated with the sediment particles accumulated on road surfaces. (Publicación en la Revista Environmental Technology, Vol 32, N° 9, pp. 997-1008, 2011)
- Estimación de la distribución de los metales pesados asociados con el sedimento viario a partir del material en suspensión del aire. (Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, 2012)
- La nueva EDAR. Retos, conceptos y necesidades del tratamiento de aguas residuales: eficiencia energética, recuperación de recursos y reducción de impactos. (Ponencia en Congreso: Procesos Avanzados para Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales. 20-21 de octubre, Santander, 2016)
- The physical factors affecting heavy metals accumulated in the sediment deposited on road surfaces in dry weather: a review. (Publicación en la Revista Urban Water Journal, 14 (6), pp. 639-649, 2017)

- A simplified method for determining potential heavy metal loads washed-off by stormwater runoff from road-deposited sediments. (Publicación en la Revista Science of the Total Environment, 601, pp. 260-270, 2017)
- Aportaciones metodológicas a la gestión del agua urbana para paliar los efectos del cambio climático incluyendo el uso de técnicas de drenaje urbano sostenible. (Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, 2017)

Adicionalmente; en la misma línea, el Grupo GIA también ha colaborado y participado en estudios y proyectos comunes con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidad de la Coruña.

Así pues; se puede afirmar que, el Equipo Investigador de la Universidad de Cantabria (GIA) cuenta con la capacidad suficiente para llevar a cabo este proyecto de investigación.

1.2.- OBJETIVOS

1.2.1.- Objetivos generales

Son objetivos generales de esta tesis:

- Analizar los orígenes y causas de la contaminación en la escorrentía urbana, considerando tanto factores físicos como las características de las superficies urbanas y los contaminantes presentes en ellas.
- Caracterizar los tipos de contaminantes presentes en la escorrentía urbana y su comportamiento durante los eventos de lluvia, con especial atención a los contaminantes como los sólidos totales (ST), la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅) y el nitrógeno total (NT).
- Para dicha contaminación, determinar polutogramas de cálculo y sus hidrogramas asociados, evaluando su incidencia sobre la calidad del agua de un medio receptor en concreto, en este caso: un río. Se busca analizar el impacto ambiental en diferentes escenarios hidrológicos.
- Profundizar en la comprensión de los problemas generados por estos sucesos de contaminación transitoria en eventos de lluvia y aportar soluciones técnicas y estratégicas que permitan mitigarlos.
- Aportar nuevas ideas sobre la gestión integral de la calidad del agua, promoviendo métodos más eficaces y sostenibles de tratamiento y control de contaminantes en escorrentías urbanas.

1.2.2.- Objetivos particulares

Son objetivos particulares de esta tesis:

- Estudio del estado actual del conocimiento sobre la problemática de la contaminación en la escorrentía urbana, y su incidencia ambiental, considerando las normativas vigentes y las mejores prácticas para el control de la calidad del agua.
- Estudiar la modelización de la contaminación en las aguas de escorrentía urbana, utilizando modelos matemáticos como el SWMM para prever el comportamiento de los contaminantes en función de las condiciones hidrológicas y las características del área urbana.
- Estudiar el suceso del primer lavado "*First Flush*" para su tipificación y categorización en función de la intensidad de la lluvia, investigando variables novedosas como alternativas al uso del parámetro "b" (obtenido de regresión lineal) como herramienta para aproximar la forma de la curva adimensional $M(V)$ a una de tipo potencial.
- Obtener polutogramas e hidrogramas asociados que reflejen lo mejor posible el fenómeno de la contaminación en la escorrentía urbana, estableciendo una metodología de selección y clasificación de los mismos según varios criterios de valoración como el volumen de escorrentía, la concentración de contaminantes, y la duración del evento de lluvia.
- Para tres contaminantes específicos ST, DBO_5 y NT, definir y calcular variables "criterio" con sus respectivos hidrogramas y polutogramas asociados que permitan estudiar la incidencia de la escorrentía urbana sobre:
 - ✓ La calidad del agua del medio receptor, en concreto: un río, analizando las concentraciones pico de los contaminantes durante los eventos de lluvia.
 - ✓ El diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), tales como los tanques de tormenta, optimizando su capacidad para capturar la mayor cantidad de contaminantes en los primeros momentos de la escorrentía.
- Proponer métodos para la determinación de polutogramas más desfavorables en redes pluviales urbanas mediante un análisis estadístico exhaustivo de los valores máximos de las variables clave (caudal, concentración de contaminantes) que las caracterizan.
- Elaborar índices o modelos de predicción de las variables "respuesta" (concentraciones de contaminantes) a partir de variables "predictoras" (estado hidrológico-hidráulico), que puedan usarse para prever la calidad del agua en diferentes escenarios de lluvias críticas.
- Determinar las lluvias "críticas" (más desfavorables), que generan las peores

situaciones de contaminación, asociándolas al período de retorno (T_r) y caracterizando los eventos de lluvia más desfavorables para la calidad del agua en cualquier localización geográfica.

- Establecer criterios que sirvan de base para nuevas investigaciones, y proponer a partir de los resultados obtenidos, vías de continuación en el estudio de la contaminación en redes unitarias de alcantarillado en tiempo de lluvia. Esto incluiría el análisis de la escorrentía superficial y el transporte de caudales de aguas residuales y pluviales dentro de la red de drenaje.

1.2.3.- Objetivos instrumentales

Son objetivos instrumentales de la presente tesis:

- Aplicar y evaluar el modelo SWMM “*Storm Water Management Model*” para el estudio de la contaminación en la escorrentía urbana, estableciendo variables “criterio” que permitan contrastar los resultados obtenidos en diferentes escenarios hidrológicos.
- Elaborar metodologías de ordenamiento y gestión de resultados provenientes de la simulación matemática del modelo, estructurando de manera clara la información obtenida para facilitar su interpretación y uso práctico en el diseño de infraestructuras de retención y control de la escorrentía.
- Establecer pautas para simplificar la utilización del modelo, creando herramientas auxiliares de análisis como programas y macros complementarias que faciliten la presentación y análisis de los resultados adicionales generados en las simulaciones.

Todos los objetivos mencionados se enmarcan en varias de las líneas de investigación más importantes del Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria:

- Modelos de calidad de aguas. Modelos de redes de alcantarillado. Contaminación de escorrentía urbana. Acumulación de la suciedad viaria. Desaparición bacteriana.
- Dispersión de contaminantes, medida y/o modelización.
- Nuevas metodologías de evaluación del impacto ambiental e indicadores ambientales.



CAPÍTULO 2

Estado del conocimiento

2.- ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1.- PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

La contaminación de la escorrentía urbana es un ejemplo de una fuente de contaminación difusa o de difícil localización (en inglés: *nonpoint source*, NPS). Esta contaminación difusa se caracteriza por (varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999; Trauth y Shin, 2005; Wong y Kerkez, 2016; Cho y Lee, 2017):

- Vertidos intermitentes que están ligados a un fenómeno de naturaleza aleatoria: la lluvia. Los vertidos por lo general son de corta duración y con un largo espacio de tiempo entre los mismos.
- Transporte de contaminantes de áreas extensas.
- Vertidos de contaminantes que no pueden ser medidos en términos de límites de calidad (extremadamente variables con el tiempo y de un suceso a otro).
- Contaminación muy variable en el tiempo y de un suceso a otro ya que el rango de fluctuación de los valores de un parámetro guía de dicha contaminación puede ser muy amplio.
- Contaminación muy difícil de muestrear en origen.
- Muestreo de la contaminación de acuerdo a su relación con el suelo.

Son muy diversas las causas de la contaminación de la escorrentía urbana. La lluvia y la nieve atrapan contaminantes presentes en la atmósfera en su caída; una primera fracción de la misma se emplea en mojar las superficies, otra se evapora y otra queda atrapada en huecos y depresiones del terreno. Si sigue lloviendo el agua se moviliza hacia los puntos de recogida, drenando las superficies y, a su vez, limpiando y transportando en disolución o en suspensión los contaminantes acumulados hacia la red de saneamiento (varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999; Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente (GEAMA), 2007). Así pues, se puede afirmar que la contaminación de la escorrentía urbana se debe en primera instancia, a una contaminación atmosférica y luego a la que arrastra e incorpora al lavar las superficies por donde discurre.

2.1.1.- Contaminación atmosférica

Las ciudades se caracterizan por el gran consumo energético que éstas demandan. La propia población urbana y su crecimiento desarrollan una serie de interrelaciones que implican cada vez más el dispendio de bienes materiales, energía y medios afectando al medioambiente y por tanto a la calidad de vida de los habitantes.

La industrialización, la tecnificación, y la necesidad de transporte dan como resultado necesidades energéticas que son cubiertas con el uso mayoritario de combustibles fósiles.

Los residuos de este proceso de producción energética son incorporados a la atmósfera en medida creciente y alteran su composición. Las impurezas así incorporadas a la atmósfera se propagan tanto horizontal como verticalmente aprovechando la circulación del aire y el intercambio vertical (*Sioli, 1982 citado por Jiménez Gallardo, 1999*). Estas partículas presentes en la atmósfera se incorporan a la lluvia durante los sucesos de precipitación.

Existe una deposición atmosférica húmeda y una seca. La contaminación atmosférica no solo puede incorporarse a la escorrentía urbana por vía húmeda (lluvia al caer y lavar la atmósfera) sino que también puede depositarse en tiempo seco sobre las superficies y luego ser susceptible de ser lavada por la escorrentía al circular por las superficies (*Hamilton y Harrison, 1991; Kim et al., 2005; Pusch, 2007; Li y Barrett, 2008; Hong et al., 2017; Liu et al., 2018; Goonetilleke, A. y Lampard, J.L., 2019 en Sharma et al., 2019; Müller et al., 2020*).

La cantidad depositada sobre las superficies no es igual si es sobre zonas rurales, zonas urbanas o zonas industriales. Las industrias y las centrales eléctricas, que consumen grandes cantidades de combustibles fósiles, son las responsables del 70 al 90% de la contaminación en zonas urbanas. Por otra parte, la gran diversidad de tráfico existente en las ciudades es la responsable de la contaminación por monóxido de carbono, plomo, y en parte, por vapores nitrosos. La contaminación por partículas sólidas procede especialmente de las plantas de incineración de basuras, fábricas de cemento e industrias metalúrgicas. (*Sukopp, 1989 citado por Jiménez Gallardo, 1999*).

En la actualidad existen países que limitan el contenido máximo de plomo de las gasolinas o que lo prohíben; no obstante, en el mundo todavía hay países con parques automotores muy antiguos donde persiste el problema. La introducción paulatina en las ciudades de vehículos híbridos eléctricos y vehículos totalmente eléctricos mitigará cada vez más el gran efecto contaminante que ocasionan los vehículos con motores de combustión interna.

No obstante; como constituyentes de la contaminación atmosférica se pueden citar en general todavía contaminantes como, por ejemplo (*Jiménez Gallardo, 1999; Kessler, 2014; Hong et al., 2017; Liu et al., 2018; Garaga et al., 2020; Koutnik et al., 2022; Sun et al., 2022*):

- Dióxido de carbono.
- Monóxido de carbono.

- Óxidos de azufre.
- Óxidos de nitrógeno.
- Cloro.
- Plomo.
- Hidrocarburos no combustionados.
- Metales pesados.
- Plaguicidas.
- Microplásticos
- etc.

Un aspecto importante a mencionar es el efecto de la acidificación de las precipitaciones. La lluvia ácida es causada por efectos locales y regionales, por los óxidos de azufre y nitrógeno. La acidez aumenta drásticamente la solubilidad de los metales presentes en todos los objetos y estructuras expuestas a la intemperie (varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999; Garaga *et al.*, 2020).

El dióxido de azufre, el óxido de nitrógeno y el amoníaco que proceden de centrales térmicas de combustibles fósiles, de los motores de los coches y de calefacción y de las plantas industriales, son emisiones que reaccionan con el oxígeno atmosférico y se disuelven en el agua de lluvia produciendo “lluvia ácida” (Hamilton y Harrison, 1991; Gómez-Ullate Fuente, 2010; Dirección General del Agua. Subdirección General de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico y TRAGSATEC, 2019).

En España y en Europa ha habido alguna mejora reciente, debido a que el uso de derivados del petróleo con menos contenido de azufre ha reducido de modo considerable la contaminación por dióxido de azufre y algo la acidez de las precipitaciones, aunque se mantienen elevados los niveles de óxidos de nitrógeno que, además, hacen aumentar las concentraciones de ozono troposférico, y las partículas sólidas en suspensión (Rueda Palenzuela, 2012).

Un aspecto emergente es el estudio de los microplásticos como parte de la contaminación atmosférica en las ciudades. La deposición atmosférica es una fuente importante de microplásticos, en particular fragmentos pequeños, y es una causa relevante de contaminación de las aguas urbanas y no debe ignorarse en las estrategias de control (Koutnik *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2022; Österlund *et al.*, 2023).

Las tablas siguientes demuestran la variabilidad que puede presentar la calidad del agua de lluvia por efecto de su contaminación al atravesar la atmósfera.

Tabla 2.1 Calidad del agua de lluvia
(Huber, 1988 citado por: Jiménez Gallardo, 1999; Soriano Martínez, 2015)

Parámetro	Unidades	Valor
pH	-	3 - 6
DBO ₅	mg/L	1 - 13
DQO	mg/L	4 - 22
COT	mg/L	1 - 3
C inorg.	mg/L	0 - 2
Color	PCU	5 - 10
ST	mg/L	10 - 24
SS	mg/L	2 - 10
Turbiedad	JTU	4 - 7
N org.	mg/L	0,09 – 0,15
NH ₃ -N	mg/L	0,01 – 0,04
NO ₂ -N	mg/L	0,0 – 0,01
NO ₃ -N	mg/L	0,12 – 0,73
N _{Total}	mg/l	0,29 – 0,84
Ortofosfatos	mg/L	0,01 – 0,03
P _{Total}	mg/L	0,01 – 0,05
Pesticidas	µg/L	3 - 600
Plomo	µg/L	30 - 70

Tabla 2.2 Calidad del agua de lluvia
(Thomas y Greene, 1993 citados por: Jiménez Gallardo, 1999; Beneyto, 2004; Del Río Cambeses, 2011; Rodríguez Bayón, 2013; Espín Leal, 2016)

Parámetro	Unidades	Zona rural	Zona urbana	Zona industrial
pH	-	6,9	6,8	6,7
Conductividad	µS/cm	25	30	20
Turbiedad	NTU	0,2	0,2	0,8
SS	mg/L	2,0	3,0	6,0
CF	NMP/100 ml	0,0	0,0	0,0
Nitratos	mg/L	0,23	0,21	0,05
Zinc	mg/L	0,0	0,0	0,5
Plomo	mg/L	0,0	0,0	0,0

Tabla 2.3 Calidad del agua de lluvia

Parámetro	Unidades	Valor ^(a)	Valor mínimo ^(b)	Valor máximo ^(b)
Físico/Químico	Conductividad	μS/cm	13,9	28
Físico/Químico	pH	-	5,6	3,9
Integral	SST	mg/L	-	0,2
Integral	DBO ₅	mg/L	-	1
Integral	DQO	mg/L	-	5
Nutriente	P _{Total}	mg/L	0,22	0,01
Nutriente	NH ₄	mg/L	-	0,1
Nutriente	NO ₃	mg/L	0,42	0,0
Metal pesado	Cd	μg/L	-	0,1
Metal pesado	Zn	μg/L	90	5
Metal pesado	Cu	μg/L	30	1
Metal pesado	Pb	μg/L	-	2
Metal pesado	Ni	μg/L	-	1
Metal pesado	Cr	mg/L	-	2
Ión principal	Na	mg/L	-	0,22
Ión principal	Mg	mg/L	-	0,03
Ión principal	Ca	mg/L	-	1,10
Ión principal	K	mg/L	-	0,46
Ión principal	SO ₄	mg/L	-	0,56
Ión principal	Cl	mg/L	-	0,20
Orgánico	HAPs (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	μg/L	-	0,04
Orgánico	MOH (Hidrocarburos de aceite mineral)	mg/L	-	0,29

(^a): Kim *et al.*, 2005

(^b): Varios autores citados por Göbel *et al.*, 2007

Tabla 2.4 Calidad del agua de lluvia (varios autores citados por Garaga *et al.*, 2020)

Parámetro	Unidad	EE.UU. (1992)	Japón (2009-2010)	Rusia (2009-2010)	Indonesia (2009-2010)	China (2010-2011)	India (2016-2017)
F ⁻	µeq/L	-	-	-	-	11,5 – 59,2	0,47 – 12,16
Cl ⁻	µeq/L	-	10,4	29,4	22,4	6,8 – 1.003,2	5,78 – 80,93
SO ₄ ²⁻	µeq/L	-	14,7	31,9	24,4	39,4 – 170,5	14,63 – 126,31
NO ₃ ⁻	µeq/L	-	14,8	21,9	29,8	6,2 – 34,8	30,07 – 118,61
Na ⁺	µeq/L	-	-	23,9	8,32	7,7 – 304,3	1,96 – 28,04
K ⁺	µeq/L	-	28	5,84	3,2	0,9 – 767,6	0,77 – 20,34
Ca ²⁺	µeq/L	-	95	16,9	9,25	28,9 – 812,2	8,98 – 81,09
Mg ²⁺	µeq/L	-	26	4,27	3,09	30,6 – 71,7	1,25 – 15,00
Co	µg/L	0,51	-	-	-	-	40 – 200
Cr	µg/L	-	-	-	-	-	27 – 193
Cu	µg/L	0,56	0,62	-	-	-	20 – 240
Fe	µg/L	15,3	-	-	-	-	26 – 429
Mn	µg/L	1,24	1,64	-	-	-	46 – 834
Ni	µg/L	1,12	0,26	-	-	-	24 – 730
Pb	µg/L	1,9	1,24	-	-	-	41 – 677
Sr	µg/L	-	0,13	-	-	-	69 – 464
Zn	µg/L	5,16	4,77	-	-	-	153 – 809
COT	mg/L	-	-	-	-	-	2,7 – 8,85

Sun *et al.*, 2022 investigaron la contribución de la deposición atmosférica a la contaminación por microplásticos en aguas urbanas. Encontraron que los flujos de deposición de microplásticos durante el clima húmedo y seco están correlacionados con las concentraciones de partículas en el aire, especialmente PM2,5.

Tabla 2.5 Deposición de microplásticos atmosféricos en tiempo de lluvia (Sun *et al.*, 2022)

Nº muestra	PM2,5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	Microplásticos MP (Partículas/m ² /día)
1	0,3	16,1	$1,1 \times 10^3 \pm 0,06 \times 10^3$
2	14,6	22,8	$1,5 \times 10^3 \pm 0,1 \times 10^3$
3	18,2	18,0	$1,8 \times 10^3 \pm 0,07 \times 10^3$
4	21,9	37,2	$1,4 \times 10^3 \pm 0,09 \times 10^3$
5	42,6	56,0	$3,2 \times 10^3 \pm 0,3 \times 10^3$
6	55,6	40,8	$3,5 \times 10^3 \pm 0,3 \times 10^3$
Promedio:			$2,1 \times 10^3 \pm 1,0 \times 10^3$

La materia particulada 2,5 o PM_{2,5} (por sus siglas en inglés, “*Particulate Matter*”) son partículas sólidas o líquidas, que se encuentran en suspensión aerodinámica y cuyo diámetro es de menos de 2,5 μm . Se denomina PM₁₀ a las partículas en suspensión atmosférica con un diámetro aerodinámico es igual o inferior a 10 μm . Se corresponde con la fracción fina y gruesa del material particulado de la atmósfera y pueden ser sólidas o líquidas (<https://es.wikipedia.org/wiki/PM2.5>; <https://es.wikipedia.org/wiki/PM10>).

2.1.2.- Contaminación de las superficies

El agua de lluvia una vez que se deposita sobre las superficies empieza a lavar las mismas una vez que empieza su transporte aguas abajo en forma de escorrentía. Las superficies no son limpias y mientras más días de tiempo seco previos ocurran, más acumulación de polvo y suciedad habrá sobre ellas.

En general, las fuentes de contaminación de las superficies, se debe a (Jiménez Gallardo, 1999; Malgrat, 1995 citado por Beneyto, 2004; Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente (GEAMA), 2007; Pusch, 2007; Müller *et al.*, 2020; Koutnik *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2022; Österlund *et al.*, 2023):

- Deposición atmosférica seca.
- Residuos de animales.
- Basura esparcida.
- Erosión y/o lavado de superficies:
 - ✓ Calles.
 - ✓ Zonas peatonales y accesos.
 - ✓ Fachadas, cubiertas y tejados.
 - ✓ Parques y jardines.
 - ✓ Vías interurbanas (vías férreas, carreteras, autopistas y áreas de estacionamiento).
 - ✓ Superficies no protegidas (terrenos sin edificación, terrenos con obras de edificación).
 - ✓ Zonas industriales.
 - ✓ Corrientes y cauces urbanos.
- Otras causas:
 - ✓ Tráfico rodado (desgaste de neumáticos de vehículos).
 - ✓ Lixiviados de vertederos controlados.
 - ✓ Posibles actividades agrícolas y pecuarias.
 - ✓ Uso de sal para el deshielo de la nieve.

2.1.2.1.- Deposición atmosférica seca

A grandes rasgos, los contaminantes asociados a la deposición atmosférica se pueden clasificar en los que se comportan como gases reactivos, los que no son reactivos y los que tienen propiedades de partículas pequeñas. La deposición atmosférica seca sobre

las superficies terrestres y marinas es uno de los procesos más importantes mediante los cuales se elimina la contaminación de la atmósfera. La velocidad de eliminación se describe convencionalmente en términos de velocidad de deposición. La velocidad de deposición de un contaminante en el aire una altura de referencia sobre el suelo se define como la relación entre el flujo descendente y la concentración en la altura mencionada. El conocimiento de la velocidad de deposición de muchos materiales en el aire es muy impreciso, incluso para gases estudiados de cerca, como el dióxido de azufre (*Hamilton y Harrison, 1991*).

La multitud de fuentes y las diversas formas de transporte atmosférico contribuyen a una alta variabilidad de la caracterización química de la deposición atmosférica y sus tasas de deposición tanto en el tiempo como en el espacio. Si bien, la deposición húmeda es relativamente simple de monitorear, monitorear la deposición seca y discernir entre la deposición relacionada con vehículos y la deposición atmosférica urbana ambiental es bastante difícil y plantea preguntas sobre la comparación de datos de varias investigaciones. La falta de discernimiento entre estas dos fuentes puede conducir a una doble contabilización de las contribuciones de la deposición atmosférica (*Zafra Mejía et al., 2009; Müller et al., 2020; Österlund et al., 2023*).

Dependiendo de las circunstancias locales, la deposición atmosférica puede ser una fuente ambientalmente importante de sólidos y contaminantes convencionales y emergentes transportados por las aguas pluviales urbanas, y algunos de estos contaminantes pueden incluso originarse fuera de la cuenca de captación. Si bien la deposición húmeda se puede medir fácilmente, las mediciones de la deposición seca y el arrastre de los productos químicos depositados por la escorrentía son muy inciertas. En relación con otras fuentes de contaminantes, la deposición atmosférica puede ampliar la lista de contaminantes que se encuentran en las aguas pluviales urbanas y puede controlarse eficazmente solo en el origen (*Müller et al., 2020*).

Como deposición atmosférica seca; *Pusch, 2007* reporta las siguientes cantidades anuales de metales provenientes de emisiones de vehículos: 0,09432 kg de Cd; 1,112 kg de Cr; 3,69 kg de Pb y 13,64 kg de Zn. Otro ejemplo se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 2.6 Deposición de microplásticos atmosféricos en tiempo seco (*Sun et al., 2022*)

Nº muestra	PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Microplásticos MP (Partículas/ $\text{m}^2/\text{día}$)
1	13,0	27,5	$0,91 \times 10^3 \pm 0,09 \times 10^3$
2	19,3	33,8	$1,0 \times 10^3 \pm 0,1 \times 10^3$
3	41,5	58,3	$1,1 \times 10^3 \pm 0,08 \times 10^3$
4	44,1	52,4	$1,5 \times 10^3 \pm 0,08 \times 10^3$
5	85,8	86,4	$1,6 \times 10^3 \pm 0,1 \times 10^3$
Promedio:			$1,2 \times 10^3 \pm 0,2 \times 10^3$

Se reportan otros contaminantes también como se puede observar en la tabla siguiente:

Tabla 2.7 Contribuciones de la deposición atmosférica a la calidad de las aguas pluviales urbanas (*varios autores citados por Müller et al., 2020*)

Tipo	Contaminantes	Contribución de la deposición atmosférica
Contaminantes convencionales.	• SST. • Nutrientes (N, P). • Metales asociados con el tráfico (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Ti, V, W, Zn, Zr).	Entre el 10 y 100% de las cargas de vertido de aguas pluviales.
Trazas orgánicas (en su mayoría contaminantes prioritarios).	• HAPs. • Plaguicidas. • PFCs (compuestos perfluorados) o productos químicos polifluorados. • Compuestos xenoestrogénicos.	Reportadas en cantidades bajas (solo HAPs) o trazas (otras sustancias distintas de los HAPs).

2.1.2.2.- Residuos de animales

El número de mamíferos, reptiles y anfibios que se encuentra normalmente en las ciudades es relativamente pequeño. Sólo la rata parda y el ratón casero son omnipresentes encontrando condiciones de vida ideales en alcantarillas, basureros y edificios. Entre los anfibios y reptiles, sólo las lagartijas están ampliamente introducidas en el medio urbano. Entre los mamíferos urbanos, se debe incluir a los perros y los gatos, abundantes en todas las ciudades del mundo. Las aves, más comunes palomas y gorriones, están presentes en parques y jardines (*Sukopp, 1989 citado por Jiménez Gallardo, 1999*).

Las heces de las palomas pueden tener entre el 14 y 21% de los microorganismos encontrados en la basura de las calles. En ciudades costeras, la presencia de excrementos de aves (gaviotas) puede presentar una mayor contribución de contaminación fecal a la escorrentía urbana con respecto a los desechos de las mascotas (*varios autores citados por Müller et al., 2020*).

En el caso del N, los excrementos de las mascotas pueden representar la tercera fuente (después de los fertilizantes residenciales y la deposición atmosférica) de las principales entradas de N a las cuencas hidrográficas urbanas, y con respecto a las entradas de P, la primera fuente. Generalmente se asume que el N proviene de la orina de animales y el P de las heces. Esto implica que la contribución de P de las mascotas podría ser controlada por los dueños de mascotas que recogen los excrementos, mientras que la contribución de N de las mascotas es más difícil de controlar (*varios autores citados por Müller et al., 2020*).

Se ha publicado poco sobre las prácticas de recolección de desechos de los dueños de perros. *Hobbie et al., 2017 citados por Müller et al., 2020* estimaron que el 40% de los excrementos de perros se dejaban sin recoger.

Los excrementos de animales son una fuente de bacterias fecales que pueden infectar a los humanos. La contaminación del entorno urbano por las heces de los perros es particularmente preocupante, porque tales heces pueden albergar bacterias patógenas

[e.g., *Campylobacter*, *Salmonella* y *E. coli*], parásitos que amenazan la salud humana [e.g., *Giardia* y *Cryptosporidium*] y bacterias resistentes a los antibióticos [e.g., *vancomycin-resistant enterococci* y *methicillin-resistant Staphylococcus aureus*] (Cinquepalmi *et al.*, 2013 citados por Müller *et al.*, 2020). A esto, por efectos de la pandemia global, puede añadirse también la presencia adicional del SARS-CoV-2 (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2).

Tabla 2.8 Contribuciones de los excrementos de animales a la calidad de las aguas pluviales urbanas (varios autores citados por Müller *et al.*, 2020)

Animales	Contaminantes en la escorrentía urbana	Carga unitaria (1 animal)
Perros	Excrementos (N, P, CF)	• 700 g de N por año • 90 g de P por año
Aves	Excrementos (N, P, CF)	• 40 a 400 g de N por año • 3 a 25 g de P por año

2.1.2.3.- Basura esparcida

Las zonas urbanas se caracterizan por ser fuentes de producción a gran escala de residuos sólidos. Las actividades diarias de las ciudades ocasionan el depósito sobre las superficies de las calles de materiales como papeles, cartones, residuos textiles, madera, goma, vegetales, hojas, colillas, botellas y vidrios rotos, latas, plásticos, y polvo en general. Una vez depositados, por un proceso de degradación física y/o química, dichos residuos se disgregan, facilitándose así su transporte por las aguas de escorrentía (varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999).

Robin *et al.*, 2021 investigaron las aguas pluviales en una pequeña cuenca residencial suburbana en Sucy-en-Brie (Paris, Francia) y hallaron que, en promedio, los plásticos representaron al menos el 62% en número y el 53% de la masa de todos los desechos antropogénicos encontrados en los materiales tamizados. Los artículos más comunes fueron bolsas de plástico o películas, paquetes crujientes o dulces, colillas de cigarrillos, fragmentos de plástico de origen desconocido, bolsas de basura o tiras de bolsas de basura, envoltorios de aluminio, aplicadores de tampones, vasos de plástico y artículos médicos como vendajes.

La basura que es transportada en la escorrentía superficial puede estar constituida principalmente de basura (vegetal) de jardines (41,6%), objetos plásticos (38,1%) y, papeles y cartones (20,3%) (Carleton, 1990 citado por Jiménez Gallardo, 1999).

Tirar basura intencional y no intencional da como resultado la deposición de basura tanto en las superficies de captación, donde la basura puede ser desalojada y transportada con la escorrentía, o directamente en las entradas de aguas pluviales y sumideros. Tirar basura también puede atraer a roedores y otros animales, que pueden contribuir con nutrientes y microorganismos fecales a la escorrentía de aguas pluviales (Müller *et al.*, 2020).

En la escorrentía urbana no se debe despreciar la fragmentación y degradación de la basura plástica (botellas, bolsas utilizadas para recolectar excrementos de mascotas y otros) como fuente de microplásticos para el medio ambiente marino. La basura plástica puede contener y transportar traza de metales adsorbidos y contaminantes

orgánicos que a menudo se usan como colorantes o están presentes en los colorantes (varios autores citados por Müller *et al.*, 2020).

2.1.2.4.- Erosión y/o lavado de superficies

Sobre las superficies, en períodos de tiempo seco, se acumulan muchos contaminantes que al llover son arrastrados y movilizados por la escorrentía. Dependiendo de la intensidad y duración de la precipitación, las superficies pueden también ser erosionadas por efecto del impacto de las gotas de lluvia, el lavado por la escorrentía y por reacciones químicas producto de la lluvia ácida sumando así también a la escorrentía, materiales procedentes de dicha erosión.

Dos mecanismos influyen en el lavado de los sedimentos depositados sobre las superficies durante los eventos de lluvia. El primero está relacionado con el material en forma de partículas, que se desprende como resultado del impacto directo de la lluvia. Una vez desagregadas las partículas, pueden mantenerse en un estado de pseudo suspensión debido a la turbulencia creada por las gotas adicionales de lluvia. El segundo está relacionado con la fracción soluble que se disuelve (se mezcla) por efectos de la turbulencia de la escorrentía favoreciendo su transporte. Las tasas de lavado durante los eventos de lluvia dependen de la intensidad del evento, la distribución del tamaño de las partículas, las características físicas de las superficies (pendiente, rugosidad, etc.) y en las calles, por la posible existencia de bordillos y el barrido de las calles (Rodríguez Bayón, 2008; varios autores citados por Zafra *et al.*, 2017).

2.1.2.4.1.- Calles

En las calles se acumula de manera no uniforme y aleatoria una gran cantidad de polvo y suciedad. Dicha acumulación depende del tiempo transcurrido desde la última limpieza natural (lluvia) o artificial (barrido o lavado). Por efecto del viento partículas finas de polvo pueden ser transportadas desde largas distancias y ser depositadas sobre las calles.

Estas partículas provienen de emisiones atmosféricas industriales, obras, zonas abiertas y expuestas a la erosión, el tráfico de automóviles, etc. Una fracción son de naturaleza inorgánica no reactiva, por lo que sólo incrementan la turbidez y las cargas de sólidos movilizadas, sin embargo, otras sí que pueden interactuar elevando la demanda de oxígeno, incrementando las cargas de nutrientes o de metales pesados, etc. (Sartor y Boyd, 1972 citados por Del Río Cambeses, 2011). La parte inorgánica (alrededor del 70%) es material mineral similar a arena o limo. Las partículas pequeñas son más susceptibles de ser transportadas por la lluvia por efecto del lavado de la escorrentía (varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999).

Las prácticas habituales de limpieza (barrido y/o baldeo) de las calles son fundamentalmente, para lograr propósitos estéticos. Incluso mediante una correcta operación y con unos programas de limpieza adecuados su eficiencia en la eliminación de la fracción fina de la suciedad de las calles es baja. El esfuerzo necesario en la limpieza viaria para eliminar la fracción más fina de la suciedad es varias veces superior al esfuerzo habitual en las operaciones de limpieza (Beneyto, 2004).

El barrido de calles se ha considerado un mecanismo de limpieza para eliminar los contaminantes. Sin embargo, su validez es cuestionable. El barrido de calles elimina solo el 15% de las partículas más finas de 45 μm y solo el 48% de las partículas más finas de 246 μm y, en general, las partículas entre 75 μm y 3.000 μm . La eficacia de eliminación de la limpieza vial depende de muchos factores, como el tipo de barredora, la presencia de automóviles estacionados, la cantidad de sólidos totales, el componente que se está considerando y la frecuencia relativa de los eventos de lluvia. El barrido general de calles es eficaz para eliminar las partículas grandes depositadas en las calles en lugar de las partículas finas que están asociadas con la mayoría de los contaminantes. Además, las actividades de barrido de calles pueden desintegrar las partículas grandes en partículas pequeñas, lo que aumenta la movilidad y la capacidad de adsorber más contaminantes. Por lo tanto, el barrido de calles convencional puede ejercer una influencia adversa en la calidad de las aguas pluviales (*varios autores citados por Zafra et al., 2008; varios autores citados por Ma, 2016*).

Sartor et al., 1974 citados por Ma, 2016 señalaron que las calles pavimentadas con asfalto aportan más contaminantes a las aguas pluviales que las calles de hormigón armado y que las calles en mal estado pueden contribuir hasta 2,5 veces más cantidad de contaminantes a la escorrentía de aguas pluviales en comparación con las calles en buen estado.

En la tabla siguiente se presentan valores encontrados (CMS: concentración media de suceso, *EMC* en inglés) en una cuenca de París, Francia:

Tabla 2.9 Calidad del agua de escorrentía de calles (*Gromaire-Mertz et al., 1999*)

Parámetro	Unidades	Mínima	Máxima	Mediana
SS	mg/L	49	498	92,5
DQO	mg/L	48	964	131
DBO ₅	mg/L	15	141	36
Hidrocarburos (HC)	$\mu\text{g/L}$	115	4.032	508
Cd	$\mu\text{g/L}$	0,3	1,8	0,6
Cu	$\mu\text{g/L}$	27	191	61
Pb	$\mu\text{g/L}$	71	523	133
Zn	$\mu\text{g/L}$	246	3.839	550

2.1.2.4.2.- Zonas peatonales y accesos

En las ciudades modernas cada vez más existe la tendencia a peatonalizar las zonas céntricas. En determinadas áreas de las ciudades, la incompatibilidad entre automóviles aparcados y calidad mínima del espacio público es manifiesta; sobre todo en viarios estrechos en donde el aparcamiento impide una mínima calidad peatonal cuando no un impedimento para personas con movilidad reducida. Pero, además, la existencia de plazas de aparcamiento estimula el acceso en automóvil y puede suponer la superación de la capacidad ambiental de una calle o un barrio. Por consiguiente, en

muchos barrios y ciudades procede reducir el espacio de aparcamiento, sobre todo el destinado a visitantes, y recuperar el espacio público para otros usos u otros medios de transporte como el colectivo, el peatonal o la bicicleta (*Rueda Palenzuela, 2012*).

Con respecto a la escorrentía urbana estas zonas tienen un comportamiento muy similar que las calles. La acumulación de polvo y suciedad es semejante. Las zonas peatonales son lugares donde comúnmente se tira basura y donde existe deposición de heces de mascotas (o vida silvestre). Por lo tanto, estas áreas pueden ser fuentes de bacterias fecales, nutrientes y sólidos para la escorrentía urbana.

Zhang et al., 2017 citados por Müller et al., 2020 informaron que en zonas peatonales pavimentadas con piedra natural se producían altas cargas superficiales de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) debido a su alto contenido de sólidos totales como portadores de contaminantes.

Los accesos de vehículos a viviendas, industrias, comercios, aparcamientos urbanos, etc. son zonas donde pueden estar presentes contaminantes tales como aceites, grasas de motor y partículas por desgaste frenos y neumáticos.

2.1.2.4.3.- Fachadas, cubiertas y tejados

Tejados y cubiertas están diseñadas para retirar en el menor tiempo posible el agua de lluvia que cae sobre ellas. El efecto de lavado del polvo y suciedad acumulado en los días secos previos es inmediato y favorecido por la pendiente que acompaña a estas superficies (*Jiménez Gallardo, 1999*).

Las mismas pueden desempeñar un papel importante en la ruta por la que viajan los contaminantes entre una fuente (la atmósfera) y un receptor (un arroyo o lago urbano), ya que son recolectoras eficientes de la lluvia de partículas de la atmósfera y liberadoras eficientes de esos contaminantes a la escorrentía urbana durante las tormentas (*varios autores citados por Van Metre y Mahler, 2003*).

La acción erosiva de los agentes atmosféricos provoca el deterioro de fachadas, cubiertas y tejados. Las partículas que se desprenden pueden ser arrastradas por la escorrentía (*Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente (GEAMA), 2007; de Zwart et al., 2018*).

Aunque los tejados no son una fuente importante de contaminación, sí que lo son de volumen de escorrentía (*Anta et al., 2012*).

En la tabla siguiente se presentan valores de contaminantes encontrados en la escorrentía de tejados de tres cuencas de Winsconsin, EE.UU.:

Tabla 2.10 Calidad del agua de escorrentía de tejados en zonas urbanas (*Bannerman et al.*, 1993)

Parámetro	Unidades	Residencial	Comercial	Industrial
ST	mg/L	91	112	78
SS	mg/L	27	15	41
P _{Total}	mg/L	0,15	0,20	0,11
P _{Disuelto}	mg/L	0,06	0,08	0,02
Cu	µg/L	15	9	6
Pb	µg/L	21	9	8
Zn	µg/L	149	330	1.155
CF	UFC/100 ml	294	1.117	144

En la tabla siguiente se presentan valores encontrados (CMS) en una cuenca de Paris, Francia:

Tabla 2.11 Calidad del agua de escorrentía de tejados (*Gromaire-Mertz et al.*, 1999)

Parámetro	Unidades	Mínima	Máxima	Mediana
SS	mg/L	3	304	29
DQO	mg/L	5	318	31
DBO ₅	mg/L	1	27	4
Hidrocarburos (HC)	µg/L	37	823	108
Cd	µg/L	0,1	32	1,3
Cu	µg/L	3	247	37
Pb	µg/L	16	2.764	493
Zn	µg/L	802	38.061	3.422

En ambas tablas se puede observar que las concentraciones de Zn son altas. En la escorrentía de tejados y cubiertas, el zinc es el contaminante presente usualmente más común debido a la erosión de cubiertas, canaletas y bajantes, galvanizadas (*Bannerman et al.*, 1993).

Las superficies de los tejados suelen estar formadas por Zn y Cu, pero también se utilizan Al, Pb y otros productos. Debido a la lixiviación y desintegración de los materiales de los tejados, estas sustancias se vuelven móviles y se filtran a la escorrentía (*varios autores citados por Kessler*, 2014).

Van Metre y Mahler, 2003 en su investigación, hallaron que las contribuciones de la escorrentía de los tejados a las cargas de contaminantes ligadas a partículas fueron mayores para el zinc, mercurio y plomo, para las cuales las contribuciones medias

estimadas fueron 55, 46 y 45 por ciento de la carga total de la cuenca, respectivamente. También que la escorrentía de los tejados contribuyó sólo alrededor del 13 por ciento de la carga total ligada a las partículas de HAPs de la cuenca.

2.1.2.4.4.- Parques y jardines

Son las áreas permeables, las más susceptibles de erosión, pero a su vez, las que pueden controlar y retirar de mejor forma las aguas de escorrentía. Los parques y jardines, por lo general, cuentan con una cobertura vegetal adecuada que no permite erosión alguna del suelo. La escorrentía superficial al recorrer, dichas zonas, puede contaminarse por efecto de los fertilizantes/abonos (N y P), pesticidas, herbicidas y demás químicos que se utilizan al cuidar y mantener dichas áreas verdes (*Jiménez Gallardo, 1999; Del Río Cambeses, 2011*).

En la tabla siguiente se presentan valores encontrados (CMS) en la escorrentía de jardines en una cuenca de París, Francia:

Tabla 2.12 Calidad del agua de escorrentía de jardines (*Gromaire-Mertz et al., 1999*)

Parámetro	Unidades	Mínima	Máxima	Mediana
SS	mg/L	22	490	74
DQO	mg/L	34	580	95
DBO ₅	mg/L	9	143	17
Hidrocarburos (HC)	µg/L	125	216	161
Cd	µg/L	0,2	1,3	0,8
Cu	µg/L	13	50	23
Pb	µg/L	49	225	107
Zn	µg/L	57	1.359	563

2.1.2.4.5.- Vías interurbanas (vías férreas, carreteras, autopistas y áreas de estacionamiento)

Vías férreas:

No existen muchas investigaciones sobre la incidencia que pueden tener las plataformas ferroviarias sobre la calidad del agua de la escorrentía urbana (*Vo et al., 2015*). En cuanto a la cantidad, estas áreas están diseñadas para drenar la escorrentía en el menor tiempo posible.

Sobre las vías férreas por lo general se deposita material granular que tiene por misión proteger el efecto de erosión que pueda ocasionar la lluvia y a su vez drenar rápidamente la lámina de agua acumulada al finalizar la precipitación. En países donde la nieve es muy común en época de invierno, la sal puede utilizarse para inducir el deshielo de la misma. Es entonces cuando, las aguas de escorrentía y el deshielo de la

nieve al unirse a las mismas, pueden contaminarse con dicho producto (*Jiménez Gallardo, 1999*).

Las fuentes potenciales de contaminación de la escorrentía en la industria ferroviaria se pueden dividir en dos grupos: las asociadas con el funcionamiento diario (es decir, afectados por la frecuencia de los trenes) y las independientes del volumen del tráfico ferroviario (es decir, las infraestructuras de apoyo). Las principales fuentes de contaminantes de la operación diaria incluyen: traviesas de madera, herbicidas para el control de la vegetación, abastecimiento de combustible y lubricación, procesos de desgaste y corrosión de metales, lavado de materiales de terraplenes, derrames de petróleo y actividades humanas. El ferrocarril es un medio importante de transporte de mercancías en largas distancias a un costo razonable. Es la opción preferida para el transporte de petróleo crudo. Los incidentes ferroviarios, escasos pero posibles, pueden contaminar las aguas pluviales (*Vo et al., 2015*).

Aunque las emisiones contaminantes totales de los sistemas ferroviarios son mucho menores que las de los vehículos automóviles, la contaminación de las operaciones ferroviarias no debe subestimarse (*Vo et al., 2015*).

Un defecto en la construcción de la cama de las vías puede dar lugar a una erosión de los terraplenes ferroviarios donde el lavado de sedimentos podría causar contaminación del agua.

La efectividad de una plataforma de ferrocarril disminuye si se llena de fango, perdiendo propiedades de elasticidad y drenaje. Esto sucede cuando las malas hierbas comienzan a crecer en el lecho del ferrocarril. Por lo tanto, es esencial, por razones de seguridad, eliminar malezas de las vías del tren. Las malas hierbas solían ser eliminadas en el pasado, con herramientas manuales. Al aplicar este procedimiento, en general, no era posible eliminar del todo las raíces por lo que las malezas generalmente continuaban creciendo. En la década de 1920, se empezaron a usar herbicidas (fundamentalmente clorato de sodio). Desde 1950 se han introducido nuevos herbicidas químicos (por ejemplo, ácidos fenoxicarboxílicos, triazinas, glifosatos, derivados de la urea, etc.) (*Schweinsberg et al., 1999*).

Los herbicidas utilizados para el control de malezas en las redes de transporte por ferrocarril pueden ocasionar contaminación de la escorrentía. *Schweinsberg et al., 1999* descubrieron que en Alemania antes de la década de 1990, se aplicaba una cantidad total mucho mayor de estos compuestos en las vías del tren que en la agricultura. En la actualidad, esto podría ser peor aún puesto que una estadística aproximada del Banco Mundial (2014) mostró que la longitud combinada de las líneas ferroviarias del mundo aumentó drásticamente en un 40% entre 1990 y 2012 (*Vo et al., 2015*).

En las vías ferroviarias debido a la fricción de los metales y al deterioro de las ruedas de los trenes de rodaje, se liberan metales pesados contaminando el entorno ferroviario (*Vaiškūnaitė y Jasiūnienė, 2020*). En el pasado, antes del 2003, también se podía producir contaminación por metales pesados cerca de las vías que tenían traviesas de madera impregnadas de creosota (prohibido su uso en la UE a partir del 30 de junio de 2003).

Malawska y Wilkomirski, 2001 citados por Vo et al., 2015 investigaron en Polonia concentraciones de nueve metales (Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mo, Pb, Zn) y 14 HAPs prioritarios en muestras de suelo tomadas de cuatro zonas de vías férreas: el revestimiento, la vía principal dentro de la plataforma, el muelle de limpieza y la rampa de carga.

Carreteras, autopistas:

La contaminación de aguas y suelos que se origina en carreteras y autopistas puede presentar un carácter temporal (por ejemplo, durante las fases de construcción y mantenimiento), accidental (como consecuencia de vertidos de sustancias peligrosas), estacional (aportación de sal en época de nieve) o, usualmente, crónico, como resultado de las emisiones y del desgaste de los componentes de los vehículos y de las propias calzadas (*Legret et al., 2006; Suárez López, 2014*).

Además de los sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno y nitrógeno total, los compuestos contaminantes inherentes al uso de las carreteras son fundamentalmente los hidrocarburos y algunos metales pesados, particularmente plomo, zinc, cadmio, cromo, cobre y níquel. Estos contaminantes proceden de los gases de escape, del desgaste de los neumáticos y frenos y de la corrosión de los elementos metálicos de los vehículos, así como de la erosión de los pavimentos y del lavado de los elementos de la carretera, tales como barreras de seguridad, paneles de señalización o pinturas (*Legret et al., 2006*).

Ejemplo de la presencia de metales y HAPs se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 2.13 Especificación de metales pesados y HAPs en forma disuelta y asociados a partículas en la escorrentía de carreteras. Porcentajes de contaminación asociada a partículas > 0,45 µm (*Jensen y Bisballe, 2005 citados por Rodríguez Bayón, 2008*)

	Suecia	Francia	Dinamarca	Holanda	EE.UU.
Eventos	26	50	1	3 – 6	16
Cr (µg/L)	-	-	41	85	67
Cu (µg/L)	49 – 59	44	56	74	47
Pb (µg/L)	92 – 97	93	97	98	94
Zn (µg/L)	26 – 61	38	71	76	86
HAPs (µg/L)	-	-	85	-	-

Estas superficies, muy impermeables por lo general, no son susceptibles de erosión si han sido bien diseñadas. Las aguas de escorrentía al escurrir sobre ellas lavan el polvo y suciedad acumulado en los días secos previos y pueden contaminarse (*Asplund et al., 1982 citados por Zafra Mejía et al., 2007 y por Zafra Mejía et al., 2009*).

La escorrentía y su contaminación de estas superficies dependen de algunos factores tales como (*Zafra Mejía et al., 2007; Zafra Mejía et al., 2009; Österlund et al., 2023*):

1) Datos básicos de las vías.

- Configuración (elevación, nivel del suelo, depresiones, etc.).

- Composición del pavimento, cantidad y condición.
- Tipo de pintura vial que se utilice en la señalización horizontal.
- Diseño, geometría, secciones transversales.
- Tipo de vegetación colindante con la vía.
- Características del drenaje.

2) Aspectos operacionales.

- Características del tráfico (densidad, velocidad, frenados, etc.).
- Características de los vehículos (tipo, edad, mantenimiento, etc.).
- Prácticas de mantenimiento (barrido y lavado, etc.).
- Políticas institucionales (leyes sobre: control de residuos, velocidad límite, etc.).

3) Usos del suelo circundante.

- Tipos de uso del suelo (residencial, comercial, industrial, forestal, agropecuario).
- Características geológicas (relieve, tipos de suelo, nivel freático, etc.).
- Prácticas agrícolas (cultivos, riego, etc.).

La pintura de señalización horizontal en las carreteras, también conocida como pintura vial o de demarcación, juega un papel crucial en la seguridad del tráfico al delimitar carriles, pasos peatonales y otros elementos viales. Sin embargo, su uso puede tener impactos ambientales negativos, particularmente como una fuente de contaminación de la escorrentía urbana (Burghardt *et al.*, 2022; Burghardt y Pashkevich, 2023; Järnskog *et al.*, 2024).

Las pinturas viales pueden contener diversos compuestos que pueden convertirse en contaminantes: metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, microplásticos y polímeros, compuestos orgánicos persistentes, etc. Para abordar este problema, es fundamental promover el uso de alternativas más ecológicas como por ejemplo el uso de pinturas ecológicas, pinturas fotocatalíticas, el mantenimiento y reemplazo adecuado de la pintura o mejorar las infraestructuras de drenaje y aplicar tecnologías de tratamiento de aguas pluviales para ayudar a filtrar los contaminantes antes de que lleguen a los cuerpos de agua (Burghardt *et al.*, 2022; Burghardt y Pashkevich, 2023; Järnskog *et al.*, 2024).

Áreas de estacionamiento:

Tanto en las carreteras como en los aparcamientos el aporte de contaminantes a la escorrentía por causa de los vehículos se debe a: fugas de combustible y lubricantes, óxidos y herrumbre de las carrocerías, desgaste de neumáticos y de frenos, gases de combustión, etc.

2.1.2.4.6.- Zonas industriales

La escorrentía urbana en zonas industriales arrastra una mezcla de contaminantes acumulados en superficies pavimentadas, techos y áreas de almacenamiento. Este fenómeno es particularmente preocupante debido a la presencia de contaminantes más peligrosos, como metales pesados, hidrocarburos y productos químicos industriales (*Li et al., 2015; Dević et al., 2016; Ji et al., 2023*).

La contaminación por escorrentía en áreas industriales matiza altas concentraciones de contaminantes en el agua debido a las actividades industriales en rápida expansión. Este tipo de escorrentía, particularmente en regiones industrializadas, contiene metales pesados y otros contaminantes peligrosos, afectando significativamente la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos cercanos (*Li et al., 2015; Dević et al., 2016; Ji et al., 2023*).

Los días secos antes de las tormentas permiten la acumulación de partículas contaminantes en las superficies industriales. Estas partículas incluyen polvo industrial, metales pesados y residuos químicos que, cuando llueve, son arrastradas hacia cuerpos de agua. Un estudio en China destacó que las áreas industriales, especialmente en ciudades en rápido desarrollo como Dongguan, tienen una alta concentración de contaminantes en la escorrentía. La investigación mostró niveles alarmantes de metales pesados como el zinc y el cobre, que afectan la calidad del agua en los ríos urbanos (*Li et al., 2015*).

2.1.2.5.- Superficies no protegidas

2.1.2.5.1.- Terrenos sin edificación

En muchas zonas urbanas existen terrenos en donde no existe edificación alguna o simplemente se encuentran abandonados o en espera de una nueva edificación. Es ahí donde, es acumulada gran cantidad de basura; y por lo general, el suelo está expuesto a procesos de erosión por efecto del viento, nieve, lluvia o escorrentía.

Los censos han revelado que el porcentaje de terrenos baldíos en los asentamientos urbanos es sorprendentemente alto.

Los terrenos baldíos se concentran en (*Sukopp, 1989 citado por Jiménez Gallardo, 1999*):

- Las afueras de la ciudad, donde éstos no se utilizan para la agricultura porque se ha previsto su urbanización.

- Zonas industriales y de negocios, donde éstos están pensados para ampliaciones o nuevos asentamientos.
- Viejas ciudades industriales, como resultado de los cambios económicos o también zonas donde se desarrollan actividades mineras.
- A lo largo de las vías de ferrocarril, especialmente cuando están fuera de servicio.

En las zonas urbanas es frecuente encontrar pequeños solares de menos de 1 ha repartidos por toda la ciudad.

2.1.2.5.2.- Terrenos con obras de edificación

La cantidad de sedimentos en los vertidos de aguas de tormenta que proceden de zonas con terrenos en construcción puede variar considerablemente. Estudios recientes han demostrado que en dichas zonas las cargas de sedimentos pueden ser del orden de 85 a 110 t/ha/año. Los sedimentos en las aguas de escorrentía de terrenos con obras de edificación son generalmente 10 a 20 veces de aquellos que se generan en terrenos agrícolas y 1.000 a 2.000 veces de aquellas que ocurren en zonas forestales. En un período de tiempo pequeño estos terrenos pueden contribuir con más sedimentos a los medios receptores que los que normalmente ocurrirían en varias décadas (*varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999*).

El polvo generado en estos terrenos por lo general suele estar acompañado de aceites y lubricantes de la maquinaria utilizada en la construcción; también pueden estar presentes residuos de la corrosión de los materiales y lixiviados de la basura (*Lazaro, 1990; Whipple et al., 1983 citados por Jiménez Gallardo, 1999*).

2.1.2.6.- Corrientes y cauces urbanos

El proceso de urbanización tradicional tiene un impacto negativo en el ciclo hidrológico urbano: aumenta la escorrentía superficial, aumenta la velocidad de escorrentía, disminuye el tiempo de concentración y reduce la calidad del agua (*Garmendia et al., 2022*). Efectivamente, el proceso de urbanización incrementa los caudales punta de la escorrentía superficial y estos a su vez aumentan la capacidad de transporte de sedimentos de los cauces urbanos (*Whipple et al., 1983 citados por Jiménez Gallardo, 1999*).

En las ciudades donde las atraviesan corrientes o cauces, es común observar un proceso de erosión de las riberas de estas; más aún cuando por efecto de una lluvia muy intensa y de larga duración se ha superado la capacidad máxima de transporte de esa corriente y ha ocurrido una inundación.

En general, todas las formas de erosión antes citadas se gestiona y estima mediante la ecuación universal de pérdida de suelo USLE (*“Universal Soil Loss Equation”*).

Esta ecuación, producto de un método empírico, fue desarrollada en los años 1950 en la Universidad de Purdue por el Soil Loss Data Center of the Agricultural Research Service (ARS) (Huber y Dickinson, 1992).

La ecuación puede expresarse como:

$$L = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad [C2-1]$$

donde:

L: Pérdida media anual de suelo por efecto de la erosión causada por la lluvia (t/ha/año).

R: Factor de lluvia.

K: Factor de erosión de suelo.

LS: Factor de longitud-pendiente y gradiente.

C: Factor de cobertura vegetal.

P: Factor de la práctica de control de la erosión.

2.1.3.- Otras causas

2.1.3.1.- Tráfico rodado (desgaste de neumáticos de vehículos)

Las principales fuentes de estos contaminantes son las piezas de los vehículos, las baterías, el aceite y la grasa de motor, los forros de los frenos y la abrasión de las llantas de los vehículos, el material de construcción y de construcción, la sal de las carreteras, la pintura de las carreteras y los escombros de los peatones, el material del suelo, la hojarasca y las plantas, y deposición atmosférica de partículas (Jiménez *et al.*, 2012; Legret *et al.*, 2006; Hopke *et al.*, 1980 citados por Al Mamoon, 2019; Österlund *et al.*, 2023).

Es cierto que estos valores de contaminación en relación a la concentración de aceites en la escorrentía tanto urbana como suburbana, han ido disminuyendo debido sobre todo a la mejora en el sellado de los motores de los vehículos, pero aun así las autoridades reguladoras siguen considerando al aceite una de las mayores amenazas en carreteras como en zonas de estacionamiento debido al riesgo que conllevan los vehículos ante un eventual escape accidental (CIRIA C609, 2004 citado por Rodríguez Bayón, 2008).

A continuación, se detallan tablas sobre fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía debido al tráfico rodado:

Tabla 2.14 Contaminantes liberados por el tráfico vehicular en zonas urbanas (*Müller et al., 2020*)

ORIGEN ESPECÍFICO	CONTAMINANTE LIBERADO
Funcionamiento del vehículo, gases de escape y partículas	Hidrocarburos, HAPs, NOx, Ni, BTEX
Convertidores catalíticos	Rh, Pd, Pt
Desgaste de neumáticos de vehículos	SST, Cd, Cu, Zn, HAPs, microplásticos
Pernos de los frenos de los neumáticos	W, SST, Cd, Cu, Ni, Pb, Sb, Zn, HAPs
Desgaste del motor y de la carrocería, pintura de la carrocería, contrapesos de equilibrado de ruedas	Cr, Ni, Pb, Fe (acero), Zn
Lavado de vehículos, instalaciones comerciales de lavado de vehículos	Pb, Cd, Cr, Zn, Ftalatos, nanopartículas, NPEO's
Abrasión en carretera de los neumáticos (con y sin clavos)	SST, HAPs, microplásticos

Tabla 2.15 Fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía en carreteras (*Jiménez et al., 2012*)

CONTAMINANTE	ORIGEN
PLOMO	Gasolinas con plomo, cubiertas de neumáticos, aceites lubricantes y grasas, compuestos empleados en sales de deshielo
ZINC	Caucho vulcanizado de la cubierta de los neumáticos, acero galvanizado, infraestructura, aceite del motor (aditivos estabilizantes), grasas
HIERRO	Óxidos de la carrocería del vehículo, estructuras de acero en carreteras (guardarrailes, puentes, etc.), parte móviles del motor
COBRE	Revestimientos metálicos, partes móviles del motor, pastillas de freno, fungicidas e insecticidas (operaciones de mantenimiento en carretera)
CADMIO	Neumáticos (material de relleno), insecticidas, superficies galvanizadas con zinc.
CROMO	Revestimientos metálicos, partes móviles del motor, pastillas de freno
NIQUEL	Gases de combustión del gasoil y aceites lubricantes, revestimientos metálicos, pastillas de freno y asfalto
MANGANESO	Partes móviles del motor
BROMO	Gases de combustión del vehículo
CIANURO	Compuestos anti-apelmazantes (ferricos y ferro-cianuros, etc.) empleados para mantener la sal granulada
CLORUROS	Sales de deshielo
SULFATOS	Capas de la calzada, fuel, sales de deshielo
PETRÓLEO	Derrames y pérdidas de lubricantes del motor, anticongelante, fluidos hidráulicos, lixiviados de superficies asfálticas
PCBs	Sprays empleados en cunetas, deposiciones atmosféricas, catalizadores en neumáticos
CAUCHO	Cubiertas de neumáticos
SSV (sólidos en suspensión volátiles)	Cubiertas de neumáticos y abrasión del asfalto
AMANTO	Embrague y pastillas de freno

Tabla 2.16 Estimación de las cargas contaminantes anuales unitarias para aguas de escorrentía de carreteras en Francia con IMD de hasta 10.000 vehículos/día (*SETRA, 2006 citado por Jiménez et al., 2012*)

	Carga contaminante específica anual (masa/ha impermeable.año por cada 1000 vehículos/día)	SS (kg)	DQO (kg)	Zn (kg)	Cu (kg)	Cd (g)	HC (g)	HAP (g)
< 10.000 vehículos/día	Tramos abiertos (la dispersión por vía aérea no está limitada)	40	40	0,4	0,02	2	600	0,08
	Tramos confinados (la dispersión por vía aérea está limitada por la presencia de muros, barreras, desmostes, etc.)	60	60	0,2	0,02	1	900	0,15
	Carga contaminante específica anual suplementaria por los vehículos que sobrepasan los 10.000 vehículos día (masa/ha impermeable.año por cada 1.000 veh./día)							
> 10.000 vehículos/día	Tramos abiertos y confinados	10	4	0,0125	0,011	0,3	400	0,05

Investigadores como [(Christensen, 1979 y Bannerman *et al.*, 1993) citados por Jiménez Gallardo, 1999; Councell *et al.*, 2004] demostraron que el zinc presente en los neumáticos de los vehículos es una significativa fuente de este metal en la escorrentía urbana.

El plomo y el zinc son los metales tóxicos más prevalentes en la escorrentía urbana. Por lo general, los metales pesados presentes en este tipo de aguas se derivan de fuentes tales como: el tráfico vehicular, corrosión de fachadas, cubiertas y tejados. El zinc y el plomo presentes pueden relacionarse con la cantidad de tráfico vehicular. Así, Christensen, 1979 citado por Jiménez Gallardo, 1999, encontró que se deposita en promedio alrededor de 0,0030 gramos Zn/vehículo/km y 0,0049 gramos Pb/vehículo/km.

2.1.3.2.- Lixiviados de vertederos controlados

Ocasionalmente, y en especial en ciudades no muy desarrolladas, pueden cubrirse con basura ciertos barrancos, quebradas o depresiones situadas dentro del entorno urbano con fin de utilizar estos terrenos para realizar obras civiles (edificaciones, carreteras, autopistas, etc.). Es ahí donde por un mal diseño, el agua de lluvia al filtrarse por esos terrenos y escurrir a través del vaso, se contamina y podría formar parte de la escorrentía superficial.

En un estudio realizado en los EE.UU. sobre los vertidos a medios acuáticos procedentes de vertederos de residuos sólidos, 660 de ellos de 1100 totales, reportaban problemas en la calidad de las aguas de los medios receptores. Los vertederos más antiguos son los que causan problemas más serios por cuanto disponen por lo general de los mayores volúmenes de residuos tóxicos; la razón se debe a los procedimientos muy limitados de diseño (*U.S. EPA, 1992 citada por Jiménez Gallardo, 1999*).

El Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero en su Anexo I, enfatiza la posibilidad de disponer

elementos de sellado en los vertederos clausurados cuando se aprecie la posibilidad de que las aguas pluviales y de escorrentía puedan filtrarse a la masa de residuos y generen lixiviados en el vertedero ya clausurado.

2.1.3.3.- Posibles actividades agrícolas y pecuarias

Ningún entorno urbano está completamente delimitado. En el cinturón que rodea a muchas ciudades donde éste entorno y el rural se confunden, es muy posible observar terrenos dedicados a las prácticas agrícolas e inclusive pecuarias. En dichos terrenos la utilización de fertilizantes, pesticidas, herbicidas y las propias deyecciones de los animales pueden contaminar de una u otra manera a las aguas de escorrentía superficial.

En la periferia de las ciudades (entorno semiurbano/rural) es también común que ocurran fugas o derrames de fosas o tanques sépticos que contaminan la escorrentía superficial (*U.S. EPA, 1992 citada por Jiménez Gallardo, 1999*).

2.1.3.4.- Uso de sal para el deshielo de la nieve

Las lluvias irregulares asociadas al cambio climático global han estado causando diversos problemas en las regiones urbanas. Además de la escorrentía debida a las lluvias en verano, la escorrentía del deshielo de la nieve a principios de la primavera desempeña un papel importante en el deterioro de la calidad del agua de las aguas receptoras. Debido al cambio climático global, las nevadas han aumentado gradualmente en las distintas regiones y las tormentas de nieve ocurren con mayor frecuencia, lo que conduce a un aumento del caudal de escorrentía de nieve derretida durante las temporadas de deshielo (*Zhu et al., 2012*).

La escorrentía con contenidos de sal de las carreteras plantea una amenaza cada vez mayor a los ecosistemas acuáticos por los efectos perjudiciales de la sal en la química del agua y la vida acuática (*Corsi et al., 2010*).

Efectivamente, el deshielo de la nieve es un mecanismo adicional que genera aguas de escorrentía. A pesar de que los caudales que se deducen de este fenómeno son bajos, éstos permanecen en el tiempo durante varios días y eliminan una fracción significativa de los contaminantes depositados sobre las superficies (*Huber y Dickinson, 1992*).

Los principales contaminantes que pueden acompañar a la nieve son los cloruros y el plomo. En calles y carreteras se pueden alcanzar concentraciones superiores a 20.000 mg/L de cloruros siendo su rango más común 1.000 a 10.000 mg/L (*Huber y Dickinson, 1992*).

Los cloruros son consecuencia de la sal que se lanza a las calles y aceras con el fin de provocar el deshielo de la nieve (*Huber y Dickinson, 1992; Zhu et al., 2012; Suárez López, 2014*).

La cantidad de sal que se añade a la nieve puede ser muy variable de una zona a otra y a veces se mezcla en proporción 3:1 con cloruro de calcio; sin embargo, los valores se encuentran entre los 55 a 85 kg de sal por cada km de calle, llegando a alcanzar valores máximos de 200 a 300 kg/km de calle (*Huber y Dickinson, 1992*).

Adicionalmente, en la nieve las concentraciones de plomo oscilan entre 1 a 10 mg/L y alcanzan valores extremos de 100 mg/L; su consecuencia se deriva del combustible de vehículos (Huber y Dickinson, 1992).

En general, el problema de la contaminación de la nieve está asociado a la presencia de sólidos en suspensión (Huber y Dickinson, 1992).

2.1.4.- Microplásticos (como contaminante emergente)

Los contaminantes emergentes, también llamados contaminantes de preocupación emergente, son sustancias químicas o materiales que se detectan últimamente en las aguas y cuya presencia puede suponer un riesgo para el medio ambiente y salud humana.

La problemática de la contaminación por microplásticos en las ciudades y sus aguas residuales es alarmante y compleja, afectando diversos entornos urbanos y acuáticos. Las ciudades son una fuente significativa de microplásticos debido a la liberación de estos contaminantes desde diversas fuentes como productos de consumo, desgaste de neumáticos, textiles sintéticos y residuos plásticos gestionados inadecuadamente. Estos microplásticos ingresan al medio ambiente a través de diferentes flujos de agua (Lenka *et al.*, 2021; Koutnik *et al.*, 2022; Obermaier y Pistocchi, 2022; Sun *et al.*, 2022):

Aguas pluviales: Las aguas de lluvia que fluyen sobre superficies impermeables como techos y calles arrastran microplásticos hacia el sistema de drenaje urbano. Estos contaminantes suelen llegar a ríos y cuerpos de agua sin ser tratados, lo que los convierte en una vía importante para la dispersión de microplásticos en el ambiente acuático.

Aguas de escorrentía: Se refiere al flujo de agua superficial que ocurre durante y después de las lluvias, principalmente sobre áreas urbanizadas. La escorrentía recoge microplásticos de carreteras, parques y otras superficies, transportándolos hacia sistemas de drenaje o directamente hacia cuerpos de agua, contribuyendo a la contaminación de ecosistemas cercanos.

Aguas residuales: Las aguas residuales urbanas provienen de actividades domésticas, industriales y comerciales. A pesar del tratamiento en plantas de tratamiento de aguas residuales, los sistemas actuales no son completamente efectivos para eliminar microplásticos, lo que permite que una porción de estos contaminantes se libere al medio ambiente acuático. Además, los lodos de depuradora, que contienen microplásticos, a menudo se utilizan como fertilizantes en suelos agrícolas, facilitando la dispersión de microplásticos en la tierra.

En conjunto, estos flujos de agua transportan grandes cantidades de microplásticos desde las ciudades hacia ríos, mares y suelos, representando una amenaza creciente para los ecosistemas y la salud humana.

La magnitud de este problema varía entre los países europeos, dependiendo de la infraestructura de tratamiento de aguas y las prácticas de gestión de residuos de cada país.

2.1.4.1.- El problema de los microplásticos

2.1.4.1.1.- Definición y origen de los microplásticos

Los microplásticos son contaminantes emergentes de origen antropogénico, presentes en el medio ambiente. Los microplásticos primarios se fabrican intencionalmente para aplicaciones industriales y productos de cuidado personal, mientras que los secundarios se generan por la degradación de residuos plásticos (*Lenka et al.*, 2021).

Los microplásticos (MP) se definen como partículas de plástico con un tamaño < 5 mm (*Cole et al.*, 2011; *Wu et al.*, 2017; *Laskar y Kumar*, 2019; *Unice et al.*, 2019; *Funck et al.*, 2021; *Tirkey y Upadhyay*, 2021; *Perumal y Muthuramalingam*, 2022) o, entre 1 y 1.000 μm , según la norma UNE-CEN ISO/TR 21960:2020 *Plásticos en el medio ambiente. Estado actual de los conocimientos y las metodologías*. Estas partículas provienen de la fragmentación de productos plásticos más grandes y de fuentes como el desgaste de neumáticos, la ropa sintética, y los productos de consumo.

Obermaier y Pistocchi, 2022 señalan que el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET, en inglés “*Polyethylene Terephthalate*”), así como partículas de desgaste de neumáticos (TWP, en inglés “*Tire Wear Particles*” ó TRWP, “*Tire & Road Wear Particles*”) son los tipos más comunes de microplásticos detectados en Europa. Su presencia en el ambiente se ha convertido en una preocupación creciente debido a su impacto en la salud ambiental y humana.

2.1.4.1.2.- Fuentes de microplásticos en entornos urbanos

En entornos urbanos, los microplásticos provienen de diversas fuentes, como la degradación de plásticos grandes, el desgaste de neumáticos, el lavado de ropa sintética, pastas de dientes, y la liberación de microperlas de plásticos de productos cosméticos (*Wu et al.*, 2017; *Laskar y Kumar*, 2019; *Tirkey y Upadhyay*, 2021; *Österlund et al.*, 2023; *Zhang et al.*, 2023). La escorrentía urbana y las aguas residuales transportan estas partículas hacia las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR's) y los cuerpos de agua.

2.1.4.2.- Microplásticos como contaminantes en la lluvia

2.1.4.2.1.- Transporte atmosférico y deposición de microplásticos a través de la lluvia

Los microplásticos pueden ser transportados a través de la atmósfera y depositarse en el suelo y cuerpos de agua mediante la lluvia (*Sun et al.*, 2022; *Wang et al.*, 2022; *Österlund et al.*, 2023). Este fenómeno puede afectar la calidad del agua y contribuir a la contaminación de ecosistemas acuáticos. *Obermaier y Pistocchi*, 2022 mencionan que la deposición atmosférica de microplásticos, aunque no cuantificada en muchos casos, es una fuente importante de contaminación en ambientes tanto urbanos como rurales.

2.1.4.2.2.- Impacto en la calidad del agua de lluvia y el suelo

El impacto de los microplásticos en el agua de lluvia puede alterar su calidad, afectando tanto los ecosistemas acuáticos como terrestres. Estudios como el de *Funck et al., 2021* sugieren que la deposición de microplásticos en áreas urbanas y rurales tiene efectos de largo alcance, ya que estas partículas pueden ser transportadas a través de la escorrentía hacia cuerpos de agua.

2.1.4.3.- Microplásticos en la escorrentía urbana

En entornos urbanos, los microplásticos se acumulan en la escorrentía superficial y llegan a ríos y océanos. Esta forma de contaminación puede afectar a los cuerpos de agua y a las especies que viven en ellos.

2.1.4.3.1.- Fuentes de microplásticos en áreas urbanas

Las principales fuentes de microplásticos en áreas urbanas incluyen el desgaste de neumáticos (*TWP*), fragmentos de plásticos y productos industriales (*Unice et al., 2019*). Estos microplásticos se acumulan en las superficies urbanas y son arrastrados por la escorrentía durante los eventos de lluvia hacia los sistemas de alcantarillado y eventualmente descargadas en ríos y océanos. *Wagner et al., 2018* estiman que en la Unión Europea se generan alrededor de 1.327.000 toneladas de partículas de desgaste de neumáticos anualmente, las cuales contribuyen significativamente a la carga total de microplásticos en el medio ambiente.

2.1.4.3.2.- Impacto de la escorrentía en cuerpos de agua superficiales

La escorrentía urbana puede transportar grandes cantidades de microplásticos a cuerpos de agua superficiales, como ríos, lagos y océanos. Estos microplásticos pueden tener efectos nocivos en la vida acuática (*Cole et al., 2011; Koutnik et al., 2022; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2023*). *Unice et al., 2019* citados por *Obermaier y Pistocchi, 2022* realizaron un estudio detallado del río Sena y concluyeron que alrededor del 2% de las partículas de desgaste de neumáticos generadas alcanzan los estuarios, lo que resalta la magnitud de la contaminación de las aguas superficiales por la escorrentía urbana.

2.1.4.4.- Impacto en medios acuáticos receptores y estaciones depuradoras de aguas residuales

Los microplásticos afectan tanto a los ecosistemas acuáticos al ser ingeridos por la fauna como al funcionamiento de las estaciones de tratamiento de aguas residuales, donde pueden causar obstrucciones y otros problemas operacionales.

2.1.4.4.1.- Efectos de los microplásticos en ecosistemas acuáticos

Los microplásticos que alcanzan los cuerpos de agua pueden tener efectos devastadores en los ecosistemas acuáticos, afectando la fauna marina a través de la ingestión y la toxicidad química. Los microplásticos pueden ser ingeridos por organismos acuáticos, lo que provoca efectos tóxicos y alteraciones en la cadena

alimentaria. Según *Obermaier y Pistocchi, 2022*, las EDAR's son una fuente importante de microplásticos que ingresan a los ecosistemas acuáticos, ya que, aunque retienen una parte significativa de estos contaminantes, una fracción considerable de estos se vierte en cuerpos de agua receptores.

2.1.4.4.2.- Retención y liberación de microplásticos en estaciones depuradoras

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR's) eliminan solo parcialmente los microplásticos, lo que las convierte en una de las principales fuentes de estos en el medio ambiente acuático (*Lenka et al., 2021*). Así pues, los microplásticos representan un desafío técnico y operacional para el tratamiento de las aguas residuales.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales pueden retener hasta el 90% de los microplásticos que reciben, principalmente en los lodos de depuración (*Bayo et al., 2020 citados por Obermaier y Pistocchi, 2022*). Sin embargo, una parte significativa de los microplásticos, especialmente las partículas más pequeñas, pasa a través de los sistemas de tratamiento y se vierte en los cuerpos de agua. La eficacia de la retención depende de las tecnologías utilizadas en las estaciones de tratamiento. *Talvitie et al., 2017 citados por Obermaier y Pistocchi, 2022* encontraron que el uso de tecnologías avanzadas, como la filtración con discos y la flotación por aire disuelto, puede aumentar la eficiencia de la retención de microplásticos.

2.1.4.4.3.- Problemas asociados con el uso de lodos residuales en la agricultura

Además de las EDAR's, fuentes terrestres no puntuales, como escorrentías agrícolas y urbanas, también contribuyen significativamente a la presencia de microplásticos en el agua (*Lenka et al., 2021*).

Las EDAR's retienen una cantidad considerable de microplásticos en los lodos, que posteriormente se pueden utilizar en la agricultura, devolviendo los microplásticos al ambiente terrestre. Una parte considerable de los microplásticos retenidos en las estaciones depuradoras termina en los lodos de depuración, que a menudo se utilizan como fertilizantes en la agricultura. Esto representa un riesgo de reintroducción de microplásticos en el ambiente terrestre, y eventualmente en los cuerpos de agua. Los procesos de estabilización de lodos, como la digestión anaerobia, no eliminan los microplásticos, lo que permite su retorno al ambiente a través de la aplicación de lodos en suelos agrícolas. Dado el riesgo de reintroducción de microplásticos en el medio ambiente a través del uso de lodos en suelos agrícolas, sería recomendable establecer restricciones más estrictas en la aplicación de estos lodos en la agricultura, hasta que los métodos de tratamiento mejoren significativamente (*Obermaier y Pistocchi, 2022*).

2.1.4.5.- Medidas y estrategias para mitigar la contaminación por microplásticos

Para abordar el problema de los microplásticos, se necesitan medidas preventivas y correctivas que incluyen tanto la reducción en la fuente como la mejora en las tecnologías de tratamiento.

2.1.4.5.1.- Estrategias de reducción en origen

La reducción de la liberación de microplásticos en el medio ambiente requiere intervenciones en la fuente u origen de estos, como la mejora de los procesos industriales y la promoción del uso de materiales alternativos.

La implementación de mejores prácticas de gestión y el desarrollo de tecnologías más limpias pueden reducir significativamente la generación de microplásticos en los entornos urbanos, por ejemplo:

- Innovación en el diseño de productos y materiales: Se propone impulsar la investigación y desarrollo de materiales alternativos que sean menos propensos a liberar microplásticos, como textiles sintéticos mejorados y neumáticos más duraderos. También se sugiere la creación de incentivos para la industria que promuevan la innovación en el diseño de productos más sostenibles.
- Prohibición o limitación de productos que generan microplásticos: Políticas similares a las prohibiciones de uso de microperlas de plásticos en cosméticos podrían extenderse a otros productos que generan microplásticos, como ciertos tipos de plásticos de un solo uso o materiales que contribuyan significativamente a la liberación de microplásticos durante su ciclo de vida.

2.1.4.5.2.- Mejoras en el tratamiento de aguas residuales y gestión de lodos

Las mejoras en los procesos de tratamiento de aguas residuales, como la incorporación de filtros de arena o membranas de ultrafiltración, filtración con discos, la flotación por aire disuelto y las membranas de ultrafiltración, pueden aumentar la retención de microplásticos en las plantas de tratamiento. *Funck et al., 2021* demostraron que el uso de filtros de arena como tratamiento terciario puede reducir considerablemente la cantidad de microplásticos que llegan a los cuerpos de agua receptores.

Es necesario diseñar e implementar sistemas de drenaje urbano más efectivos que incluyan tecnologías para la captura y filtración de microplásticos antes de que lleguen a los cuerpos de agua. Esto incluye el almacenamiento de la escorrentía urbana en tanques de tormenta, sistemas de barrido de calles más eficientes y vegetación urbana que ayude a retener las partículas.

También se debe implementar sistemas de tratamiento de aguas pluviales en áreas urbanas para reducir el flujo de microplásticos hacia ríos y océanos. Además, se pueden explorar tecnologías para la retención de partículas de desgaste de neumáticos en sistemas de drenaje.

2.1.4.5.3.- Políticas y regulaciones relevantes

La implementación de políticas y regulaciones efectivas es clave para mitigar la contaminación por microplásticos. *Obermaier y Pistocchi, 2022* destacan la importancia de desarrollar normativas a nivel europeo que regulen tanto la producción como la gestión de residuos plásticos. También mencionan que es crucial desarrollar sistemas de monitoreo para identificar y mitigar la liberación de microplásticos desde fuentes urbanas hacia el medio ambiente. Efectivamente, sería adecuado la creación

de sistemas de monitoreo estandarizados para evaluar el impacto de los microplásticos en el medio ambiente y la eficacia de las medidas de mitigación.

Algunas políticas relevantes serían (*Laskar y Kumar, 2019; Burghardt et al., 2022; Perumal y Muthuramalingam, 2022; Wang et al., 2022; Österlund et al., 2023*):

- Creación de normativas específicas para microplásticos: Proponer nuevas políticas que aborden específicamente la gestión de microplásticos, desde su producción hasta su disposición final. Estas regulaciones deben basarse en un enfoque de ciclo de vida y cubrir todas las etapas, desde la fabricación hasta el reciclaje o eliminación.
- Incentivos para la reducción de microplásticos en la industria: Introducir incentivos fiscales o subvenciones para las industrias que adopten medidas proactivas para reducir la liberación de microplásticos en el medio ambiente. También se puede promover la adopción de certificaciones ambientales que incluyan criterios de reducción de microplásticos.
- Campañas de sensibilización pública: Desarrollar campañas educativas que informen a la población sobre las fuentes de microplásticos y cómo reducir su impacto, incentivando cambios en el consumo y la disposición de productos plásticos.

2.1.4.6.- Investigaciones futuras

Aspectos importantes a investigar pueden ser (*Laskar y Kumar, 2019; Burghardt et al., 2022; Perumal y Muthuramalingam, 2022; Wang et al., 2022; Österlund et al., 2023*):

- Investigación sobre la biodegradabilidad de microplásticos: Se necesita investigar más a fondo la biodegradabilidad de diferentes tipos de microplásticos y cómo se pueden modificar para ser menos persistentes en el ambiente acuático y terrestre.
- Efectos a largo plazo de los microplásticos en la salud humana y los ecosistemas: Aunque hay estudios que demuestran los efectos perjudiciales de los microplásticos en la fauna, es crucial realizar investigaciones más detalladas sobre sus efectos a largo plazo en la salud humana, particularmente a través de la cadena alimentaria.
- Estudio de la eficiencia de tecnologías emergentes: Se deben realizar estudios piloto sobre nuevas tecnologías de tratamiento de aguas que prometen una mayor retención de microplásticos, como la biofiltración y la nanotecnología aplicada a sistemas de tratamiento de aguas.

2.2.- CARACTERÍSTICAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA URBANA

Después de identificar las principales fuentes de contaminación de la escorrentía urbana, es crucial describir sus características fundamentales para entender el impacto que tienen en el medio ambiente y la salud humana.

2.2.1.- Composición de la contaminación

La contaminación de la escorrentía urbana es diversa y puede causar efectos ambientales significativos tanto a corto como a largo plazo. La escorrentía urbana transporta una gran variedad de contaminantes cuya concentración y presencia en sus aguas varía en función del grado de urbanización (tipo de uso de los suelos, densidad vehicular, población animal, grado de contaminación atmosférica, etc.) y las actividades industriales presentes en la ciudad.

Los contaminantes presentes en la escorrentía urbana pueden agruparse en varias categorías principales según su impacto en el medio ambiente, los que ejercen un efecto puntual y los que ejercen un efecto acumulativo (*Christian et al., 2020*). Un efecto puntual está caracterizado por ser un suceso corto (minutos, horas e inclusive de unos pocos días) acompañado de por lo general concentraciones altas y flujos máxicos elevados (ejemplos de ello son: la contaminación bacteriana, sustancias orgánicas biodegradables, contaminantes tóxicos, etc.). El efecto acumulativo es ocasionado por sucesos de contaminación de larga duración (estación, meses, años) en los que la importancia está dada por la cantidad total de contaminación que se vierte en el agua receptora independientemente de los valores que tomen las concentraciones y los flujos máxicos. Lo que prima es el análisis de las cargas totales vertidas.

Se incluyen sedimentos, nutrientes, metales pesados, compuestos tóxicos, grasas y aceites, bacterias, virus y microplásticos. Esta categorización facilita el análisis específico de los impactos de cada grupo de contaminantes en los ecosistemas acuáticos y la salud pública (*Liu et al., 2018; Christian et al., 2020*).

En concreto, la contaminación que puede transportar la escorrentía urbana puede ocasionar (*varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999; Cho y Lee, 2017; Liu et al., 2018*):

- Impacto estético y visual negativo.
- Consumo parcial o total del oxígeno disponible en corrientes o medios receptores.
- Efectos acumulativos y tóxicos sobre plantas acuáticas y animales.
- Crecimiento de microorganismos indeseables tales como algas y otro tipo de plantas acuáticas que afectan directamente a la calidad del agua y a su aspecto estético.

Los tipos de contaminantes presentes en las aguas de escorrentía pueden ser (varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999; Malgrat, 1995 citado por Beneyto, 2004; Trauth y Shin, 2005; Wong y Kerkez, 2016; Cho y Lee, 2017; Pusch, 2007; Wong y Kerkez, 2016; Cho y Lee, 2017; Tran *et al.*, 2019; Müller *et al.*, 2020; Koutnik *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2022; Österlund *et al.*, 2023):

- Sedimentos, principalmente en estado de suspensión.
- Sustancias o materia que demanda oxígeno.
- Nutrientes (N, P).
- Metales pesados.
- Contaminantes tóxicos (pesticidas, PCB).
- Grasas y aceites (Hidrocarburos/derivados del petróleo).
- Bacterias y virus.
- Ácidos y bases.
- Sustancias húmicas precursoras de los trihalometanos.
- Gases malolientes.
- Cloruros y sodio.
- Microplásticos
- etc.

2.2.1.1.- Contaminantes principales

2.2.1.1.1.- Sedimentos

Los sedimentos son una de las formas más comunes de contaminación en las escorrentías urbanas, y su impacto es ampliamente reconocido en la literatura. Según estudios realizados por la *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), la erosión y la construcción de infraestructuras en zonas urbanas y la agricultura contribuyen significativamente a la sedimentación en los cuerpos de agua. Estos sedimentos pueden transportar contaminantes como metales pesados y nutrientes, lo que amplifica su efecto adverso en el ecosistema acuático (Deletic, 2005; Alias, 2013; Luo *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2023).

El incremento de la escorrentía en zonas urbanas afecta la estabilidad del suelo transportando sólidos. Los sedimentos transportados, compuestos por material

particulado, se originan principalmente por la erosión del suelo y la actividad de construcción en zonas urbanas (*Alias, 2013*).

Los sólidos pueden estar en estado de suspensión y pueden ser de fácil sedimentación. Los sólidos en suspensión afectan a las aguas receptoras disminuyendo su aspecto estético y su uso con fines recreativos. Incrementan la turbiedad en la columna de agua y una vez depositados en el fondo de los cauces, pueden transformarse en acumuladores de contaminantes tóxicos (*Alias, 2013*).

Los sedimentos pueden colmatar los cauces, ocasionar la disminución de la calidad del agua, reducir su claridad impidiendo el paso de la luz dificultando la fotosíntesis de las plantas acuáticas, provocar pérdida de hábitats acuáticos (*Paul y Meyer, 2001*). Los sedimentos pueden destruir el hábitat de los peces al entorpecer el desove, ocultar sus zonas de alimentación, y eliminar organismos potencialmente comestibles; también ocasionan la abrasión de sus branquias y la destrucción de sus aletas.

Otro problema importante asociado a los sólidos en suspensión que transporta la escorrentía urbana es el posible impacto químico que pueden producir, ya que los metales pesados, los hidrocarburos y los nutrientes tienden a adsorberse en el material particulado de los mismos. Estos contaminantes a menudo se asocian con la fracción más pequeña de partículas sólidas suspendidas. Esto se debe a que las partículas finas tienen un área superficial relativamente grande por unidad de masa en comparación con las partículas gruesas, por lo tanto, pueden adsorber más contaminantes en comparación con las partículas grandes (*varios autores citados por Alias, 2013*).

2.2.1.1.2.- Sustancias que demandan oxígeno

La materia orgánica presente en la escorrentía urbana, como restos de vegetación o residuos de alimentos, demanda oxígeno al descomponerse. Esto puede reducir los niveles de oxígeno disuelto en el agua, afectando negativamente a los organismos acuáticos (*Paul y Meyer, 2001; Alias, 2013*). La falta de oxígeno afecta a la vida acuática que utiliza el oxígeno disuelto para su metabolismo. Además, se pueden crear olores indeseables y reducir el potencial valor recreativo de las aguas receptoras (*Alias, 2013*).

Las escorrentías urbanas están altamente contaminadas; la demanda de oxígeno de la contaminación que transportan puede ser mucho mayor que la de las aguas residuales domésticas no tratadas (*Taebe y Droste, 2004*).

La disminución del oxígeno disuelto, medida como demanda biológica de oxígeno (DBO), es un indicador clave para evaluar la contaminación del agua. Cuando los niveles de oxígeno bajan, se pueden producir condiciones anóxicas que afectan gravemente a la vida acuática (*Paul y Meyer, 2001*).

El carbono orgánico total se adopta comúnmente como indicador de la materia orgánica en un cuerpo de agua. Sin embargo, en términos de gravedad, el impacto del carbono orgánico disuelto es más significativo en comparación con el carbono orgánico total. El carbono orgánico disuelto (COD) se refiere a la materia orgánica de menos de 0,45 μm . El COD juega un papel importante en el transporte y la

biodisponibilidad de metales pesados a través de reacciones de formación de complejos (*varios autores citados por Alias, 2013*).

2.2.1.1.3.- Nutrientes

Los nutrientes son elementos químicos que influyen en la productividad de todos los ecosistemas. El nitrógeno y el fósforo son dos nutrientes esenciales para el crecimiento y la supervivencia de las plantas y los animales. No obstante, están presentes habitualmente en la escorrentía urbana y los niveles excesivos de estos en la misma pueden ocasionar impactos negativos en las aguas receptoras.

El impacto significativo del exceso de nutrientes particularmente nitrógeno y fósforo (principalmente fosfatos, nitratos, y nitrógeno Kjeldahl) es uno de los principales factores responsables de la eutrofización en los cuerpos de agua receptores. Este proceso puede resultar en el crecimiento descontrolado de algas lo que reduce el nivel de oxígeno disuelto causando "zonas muertas" en lagos y ríos provocando la muerte de organismos acuáticos y afectando la biodiversidad. Esta disminución de la calidad de las aguas crea olores desagradables, mata plantas y animales acuáticos y también conduce a la pérdida del posible uso recreativo de las aguas receptoras. Por lo tanto, es importante garantizar que el nivel de nutrientes en la escorrentía no exceda los límites estipulados (*varios autores citados por Alias, 2013*).

Las fuentes de nutrientes en la escorrentía de aguas pluviales urbanas incluyen la deposición atmosférica, fertilizantes, detergentes, desechos animales, fugas de fosas sépticas y vertidos industriales. La aplicación de fertilizantes en céspedes residenciales y áreas de césped, como campos de golf, campos y parques se han identificado como las principales fuentes de nutrientes en las áreas urbanizadas (*Alias, 2013*).

2.2.1.1.4.- Metales pesados

Los metales pesados, como el plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu) y cromo (Cr), son contaminantes tóxicos comunes en las escorrentías urbanas, provenientes de diversas fuentes como el desgaste de vehículos (neumáticos, revestimientos, cojinetes, pastillas de freno y otras piezas móviles), corrosión de materiales de construcción (tuberías, revestimientos de los edificios) y emisiones industriales (fugas y derrames) (*varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999; Davis et al., 2001; Zafra Mejía et al., 2007; Alias, 2013*).

A diferencia de otros contaminantes, los metales pesados son tóxicos, persistentes y no degradables. Esto los convierte en una amenaza significativa tanto para la salud humana como para la vida biológica, ya que permanecen en el agua receptora tras ser transportados por la escorrentía, acumulándose en sedimentos y organismos acuáticos. Esta bioacumulación puede generar riesgos importantes para la salud humana al introducir contaminantes en la cadena alimentaria, así como afectar negativamente el medio ambiente (*Davis et al., 2001; Adedeji y Olayinka, 2013*).

La presencia de metales pesados en las escorrentías urbanas está estrechamente relacionada con actividades antropogénicas. Se observa que las concentraciones de estos metales son más elevadas en áreas industriales y comerciales en comparación

con zonas residenciales, siendo el Cu, Ni, Pb y Zn los más afectados. Por ejemplo, un estudio realizado en Houston, Texas, reveló que las emisiones industriales derivadas de la refinación de petróleo, la producción petroquímica y el uso de productos forestales liberaron metales pesados a la atmósfera, lo que provocó que las concentraciones de Cu y Zn en el agua de lluvia superaran los estándares de calidad de agua dulce (*Chang et al., 2004*). Aunque es evidente que la refinación de petróleo y las fábricas petroquímicas son fuentes importantes de metales pesados, también se ha planteado preocupación por la industria de productos forestales. Según *Davis et al., 2001* y *Chang et al., 2004* los conservantes utilizados para preservar productos de madera que contienen compuestos de cobre y zinc podrían ser una fuente adicional de estos contaminantes.

Las concentraciones de metales pesados en las aguas de escorrentía urbana pueden ser de 10 a 100 veces superiores a las encontradas en aguas residuales urbanas, lo que resalta la acumulación y persistencia de estos metales en el ambiente (*varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999*).

2.2.1.1.5.- Contaminantes tóxicos e hidrocarburos

Los hidrocarburos y otros compuestos tóxicos, como pesticidas y herbicidas, en la escorrentía urbana son una amenaza significativa para la salud ambiental. Estos contaminantes, que provienen principalmente de actividades industriales y de transporte, pueden causar toxicidad aguda en organismos acuáticos y efectos cancerígenos en humanos tras una exposición prolongada (*Jiménez Gallardo, 1999*).

La persistencia de los hidrocarburos en el medio ambiente y su capacidad de bioacumulación en la cadena alimentaria generan riesgos adicionales para la salud. Según *Sanchez Filho et al., 2017*, los hidrocarburos en la escorrentía urbana provienen del aceite de motor y otros productos derivados del petróleo. Además, los vehículos y equipos de construcción contribuyen a la contaminación con aceites y grasas, depositándolos en superficies como aparcamientos y calles. *Nekhavhambe et al., 2014* destacan que la principal fuente de hidrocarburos alifáticos es el aceite de motor, especialmente en zonas comerciales.

Investigaciones de *Pitt y Army, 1973 citados por Jiménez Gallardo, 1999* indican que en áreas industriales pueden ocurrir cargas contaminantes de aceites y grasas de hasta 9,26 kg/km de cuneta/día, mientras que en áreas residenciales son 5,25 kg/km de cuneta/día y en zonas comerciales 1,38 kg/km de cuneta/día.

Los compuestos tóxicos pueden afectar a organismos acuáticos y bioacumularse en peces, lo que puede causar daños severos a la salud humana (*U.S. EPA, 1993a citada por Jiménez Gallardo, 1999*). Debido a su potencial tóxico agudo y crónico, es crucial controlar rigurosamente estos contaminantes en los vertidos. Además, compuestos como pesticidas, herbicidas y policlorobifenilos (PCBs) son críticos en la escorrentía urbana y pueden ser altamente persistentes, causando efectos tóxicos en diversas especies, incluidos los humanos (*Chen et al., 2019*).

2.2.1.1.6.- Bacterias y virus

La urbanización, industrialización y actividad agrícola han deteriorado gravemente la calidad del agua superficial a nivel global, introduciendo patógenos acuáticos como virus y bacterias en el ciclo hídrico urbano (*Goh et al., 2019*).

Las bacterias, virus y protozoos patógenos pueden encontrarse en la escorrentía de aguas pluviales y posteriormente transportarse a los cuerpos de agua a través de reboses de alcantarillado, sistemas sépticos defectuosos, escorrentía agrícola, desechos de mascotas, aves y otros animales y vertidos de aguas residuales tratadas lo cual puede generar brotes de enfermedades en comunidades cercanas (*varios autores citados por Ahmed et al., 2019*).

Investigaciones en el Nationwide Urban Runoff Program (NURP) en los EE.UU. han identificado niveles alarmantes de coliformes fecales en las aguas de escorrentía, lo que representa un riesgo significativo para la salud pública. En dicho programa se encontró que en las aguas de escorrentía podían encontrarse, como potenciales indicadores de patógenos, entre 10.000 a 100.000 CF por cada 100 ml (*U.S. EPA citada por Jiménez Gallardo, 1999*).

Los patógenos presentes en diversas fuentes fecales animales serán diferentes de los presentes en las aguas residuales y por lo tanto es probable que las aguas pluviales contengan un perfil de patógenos diferente al de las aguas residuales (*Ahmed et al., 2019*).

2.2.1.1.7.- Cloruros y sodio

El uso de sal en carreteras durante el invierno es una fuente importante de contaminación por cloruros y sodio en las escorrentías urbanas. Estos contaminantes pueden alterar la calidad del agua potable y afectar a los ecosistemas de agua dulce. La sal también puede acelerar la corrosión de la infraestructura, como puentes y alcantarillas.

Los cloruros y el sodio, que provienen principalmente de la sal utilizada en carreteras para el deshielo en invierno, son contaminantes comunes en la escorrentía urbana. *Kelly et al., 2008* advierten que estos contaminantes pueden afectar negativamente la calidad del agua potable y provocar la corrosión de infraestructuras, además de alterar el equilibrio ecológico de cuerpos de agua.

Los vertidos de sodio y cloruros a los medios receptores provienen del uso de la sal en calles para eliminar la nieve en invierno y el deshielo de las mismas, al inicio de la primavera. Estos vertidos pueden afectar al sabor de las aguas con fines potables alterando a las personas que necesitan dietas, bajas en sodio. La presencia de sal puede inclusive producir corrosión. En general, los cloruros y el sodio afectan principalmente a las masas de agua destinadas al consumo humano (*U.S. EPA, 1993a citada por Jiménez Gallardo, 1999*).

2.2.1.1.8.- Microplásticos

En los últimos años, los microplásticos se han identificado como un contaminante emergente en las escorrentías urbanas. Estos pequeños fragmentos de plástico, originados por el desgaste de productos plásticos y textiles, pueden ser transportados a través de las aguas pluviales hacia los cuerpos de agua, donde son ingeridos por la fauna acuática. La persistencia de los microplásticos en el ambiente representa un desafío para los sistemas de gestión de aguas.

Los microplásticos son un contaminante emergente en la escorrentía urbana, formado por pequeñas partículas de plástico que pueden ingresar en los sistemas acuáticos y acumularse en los organismos. Los microplásticos son transportados por la escorrentía desde zonas urbanas hacia los océanos, donde representan una amenaza creciente para los ecosistemas marinos. Estos fragmentos plásticos son ingeridos por organismos acuáticos, lo que puede provocar efectos adversos en la salud de los animales y, potencialmente, en los humanos (Cole *et al.*, 2011; Obermaier y Pistocchi, 2022; Perumal y Muthuramalingam, 2022).

Los microplásticos, fragmentos de plástico de menos de 5 mm, representan una creciente amenaza para los ecosistemas acuáticos. Estos contaminantes ingresan a las vías fluviales a través de la escorrentía urbana, provenientes de diversas fuentes como el desgaste de neumáticos, fibras textiles y microesferas utilizadas en productos de cuidado personal. Estudios recientes han demostrado que los microplásticos pueden ser ingeridos por una amplia variedad de organismos acuáticos, desde zooplancton hasta peces, lo que puede generar efectos adversos en su salud y en la cadena alimentaria (Perumal y Muthuramalingam, 2022).

2.2.2.- Valores característicos

Los valores característicos de la contaminación de la escorrentía urbana dependen del tipo de zona o área de donde se origina la escorrentía. Diferentes estudios han proporcionado datos que varían en función de factores como la densidad de tráfico, el uso del suelo y las actividades industriales. A continuación, se presentan tablas que muestran algunos de los valores característicos de diferentes tipos de áreas urbanas.

A continuación, se presentan varias tablas con valores característicos de los contaminantes presentes en las aguas de escorrentía.

Tabla 2.17 Principales contaminantes presentes en la escorrentía urbana
[(¹Sartor y Boyd, 1974 y ²Manning *et al.*, 1977); citados por Jiménez Gallardo, 1999]

Parámetro	Unidades	Rango	Valor medio	Referencia
ST	kg/km cuneta/día	-	395,25	1
		1 a 423	45	2
DBO ₅	kg/km cuneta/día	-	3,81	1
		0,001288 - 6,15	0,2263	2
DQO	kg/km cuneta/día	-	26,82	1
		0,0183 - 210,82	2,075	2
SV	kg/km cuneta/día	-	28,23	1
Fosfatos	kg/km cuneta/día	-	0,31055	1
		0,00009 - 0,14382	0,00765	2
Nitratos	kg/km cuneta/día	-	0,02653	1
		0,00001 - 0,014805	0,00108	2
NTK	kg/km cuneta/día	-	0,6211	1
		0,00023 - 0,7571	0,0288	2
Zn	kg/km cuneta/día	-	0,1835	1
		0,00009 - 1,286	0,02115	2
Cu	kg/km cuneta/día	-	0,05646	1
		0,000025 - 0,34263	0,00405	2
Pb	kg/km cuneta/día	-	0,1609	1
		0 - 3,215	0,08865	2
Ni	kg/km cuneta/día	-	0,014111	1
		0,000001 - 0,07191	0,00279	2
Hg	kg/km cuneta/día	-	0,020609	1
Cr	kg/km cuneta/día	-	0,031055	1
		0,00001 - 0,18189	0,0081	2
p,p-DDD	kg/km cuneta/día	-	18,92 x 10 ⁻⁶	1
p,p-DDT	kg/km cuneta/día	-	17,22 x 10 ⁻⁶	1
Dieldrin	kg/km cuneta/día	-	6,77 x 10 ⁻⁶	1
PCB	kg/km cuneta/día	-	310,56 x 10 ⁻⁶	1
CT	Nº/km cuneta	-	61,49 x 10 ⁹	1
CF	Nº/km cuneta	-	3,48 x 10 ⁹	1

Tabla 2.18 Características principales de las aguas de escorrentía urbana [(Wanielista, 1979; Collins, 1980); citados por Jiménez Gallardo, 1999]

Parámetro	Unidades	Rango
DBO ₅	mg/L	1 - 700
COT	mg/L	150
DQO	mg/L	5 – 3.100
SS	mg/L	2 – 11.300
ST	mg/L	200 – 14.600
STV	mg/L	12 – 1.600
S sed.	mg/L	0,5 – 5.400
N orgánico	mg/L	0,01 - 16
NTK	mg/L	0,01 - 4,5
NH ₃ -N	mg/L	0,1 - 2,5
NO ₃ -N	mg/L	0,01 - 1,5
PO ₄ soluble	mg/L	0,1 - 10
PO ₄ total	mg/L	0,1 - 125
Cloruros	mg/L	2 – 25.000
Aceites	mg/L	0 - 110
Fenoles	mg/L	0 - 0,2
Plomo	mg/L	0 - 1,9
CT	Nº/100 ml	200 - 146 x 10 ⁶
CF	Nº/100 ml	55 - 112 x 10 ⁶
EF	Nº/100 ml	200 - 1,2 x 10 ⁶

Temprano et al., 1996 realizaron una extensa revisión bibliográfica de los valores de contaminación de la escorrentía urbana, llegando a obtener la tabla siguiente:

Tabla 2.19 Características principales de las aguas de escorrentía urbana
(Temprano *et al.*, 1996)

Parámetro	Unidades	Rango	Valor medio
DBO ₅	mg/L	9 - 38	20
DQO	mg/L	60 - 200	105
SS	mg/L	100 - 450	195
N total	mg/L	1,2 - 6,0	2,7
P total	mg/L	0,1 - 1,7	0,5
CF	Nº/100 ml	10 ⁴ - 10 ⁶	10 ⁵

Tabla 2.20 Características de las aguas de escorrentía urbana
(Stockholm Vatten, 2001; tomada de Suárez López, 2016)

Parámetro	Unidades	Orden de magnitud de concentraciones	
		Bajas	Altas
DQO	(mg/L)	25 - 60	
SST	(mg/L)	< 50	> 175
N total	(mg/L)	< 1,25	> 5,0
P total	(mg/L)	< 0,1	> 0,2
Pb	(µg/L)	< 3,0	> 15,0
Cd	(µg/L)	< 0,3	> 1,5
Hg	(µg/L)	< 0,04	> 0,20
Cu	(µg/L)	< 9,0	> 45,0
Zn	(µg/L)	< 60,0	> 300
Ni	(µg/L)	< 45,0	> 225
Cr	(µg/L)	< 15,0	> 75
Aceites	(mg/L)	< 0,5	> 1,0
HAP	(µg/L)	< 1,0	> 2,0

Tabla 2.21 Características de las aguas de escorrentía urbana en diferentes ciudades españolas (*Ministerio de Medio Ambiente, 2000; tomada de Becerril y Lastra, 2005*)

Parámetro	Unidades	Sevilla	Madrid	Barcelona	Vitoria	Valencia
DQO	mg/L	1.716,6	1.344,4	1.394,4	3.846,3	5.68,7
DBO ₅	mg/L	759,0	792,1	56,3	1.170,0	340,7
COT	mg/L	58,9	100,5	62,7	61,8	62,5
NTK	mg/L	86,3	72,1	40,9	46,0	53,0
NH ₄ ⁺	mg/L	45,9	37,6	12,6	18,1	19,7
P total	mg/L	5,0	7,5	17,4	11,1	6,2
SS	mg/L	1.722,2	1.189,2	1.268,3	1.332,9	560,7
SSV	mg/L	1.266,6	744,8	–	770,8	331,4
SD	mg/L	551,2	893,5	7.321,2	2.482,2	1.496,0
SDV	mg/L	304,0	572,2	–	1.971,6	483,5
ST	mg/L	2.200,8	1.801,8	8.306,2	3.247,9	1.941,2
Turbidez	NTU	356,8	323,4	445,4	264,8	226,1
Conductividad	mS/cm	0,8	0,9	8,9	0,7	1,5
Temperatura	°C	20,3	17,5	22,4	19,6	20,1
pH	-	8,4	8,4	7,6	7,8	8,1
Cu (dis)	mg/L	0,032	0,050	0,147	0,026	0,019
Zn (dis)	mg/L	0,378	0,316	0,138	0,928	0,156
Pb (dis)	mg/L	0,393	0,098	0,107	0,091	0,038
HC (dis)	mg/L	11,0	10,7	8,8	6,0	8,5

También se puede detallar a los contaminantes por su origen:

Tabla 2.22 Origen de los contaminantes en la escorrentía urbana
(Barro y Suárez, 2004 tomada de Andrés-Doménech, 2010)

CONTAMINANTE	EROSIÓN DEL SUELO	DETERIORO DE VEHÍCULOS	EMISIONES GASEOSAS DE VEHÍCULOS	PRODUCTOS INDUSTRIALES	COMBUSTIBLES FÓSILES	QUÍMICOS USADOS EN CÉSPED Y JARDINES	AVES Y MASCOTAS
SS	M	M			m		
Materia orgánica	M	M	m				M
N	m		M		M	M	M
P	M		m			M	M
Hidrocarburos		M	M	M			
Bacterias y virus							M
Fe	M						
Mn	M						
Zn	m	M		m		m	
Pb			M	m			
Cu		M		M			
Cr		M		M			
Ni		m		M			
Cd		m		M			
Sulfuro			m		M		M
Ácido nítrico			M		M		
Ácido sulfúrico					M		
Pesticidas, insecticidas, herbicidas						M	

M: Mayor fuente de contaminación

m: Menor fuente de contaminación

Un estudio muy interesante fue realizado por *Rodríguez Hernández et al., 2013*. Hicieron una revisión de 37 artículos seleccionados de un total de 169 artículos consultados sobre la calidad de las aguas de escorrentía en todo el mundo (América, Asia y Europa). Los resultados presentados en esos 37 artículos fueron revisados y analizados estadísticamente para evaluar la influencia de las características de la cuenca (ubicación, tamaño, tráfico promedio diario y tipo de uso del suelo) en la contaminación por escorrentía de aguas pluviales. Sus principales conclusiones fueron:

- Las CMS (CMS: concentración media de suceso, *EMC* en inglés) de SST, Zn y Cu tuvieron una distribución logarítmica, mientras que las CMS de DQO y aceites y grasas, distribuciones normales;
- Las CMS de SST calculadas a partir de estudios centrados en América, Asia y

Europa no presentaron diferencias estadísticamente significativas, por lo que fue posible hacer comparaciones entre las concentraciones medidas en diferentes lugares de estos continentes;

- Las CMS de SST en cuencas de menos de 200 ha no dependían del tamaño de la cuenca, del tráfico (intensidad media diaria de vehículos IMD) o del tipo de uso del suelo;
- Las CMS de aceites y grasas no mostraron una diferencia estadística entre Asia y América. En este caso, no se contó con información de Europa porque los sistemas de alcantarillado analizados eran principalmente combinados y, en el caso de sistemas separados, los artículos no contenían información sobre los aceites y grasas;
- El tamaño de la cuenca y el tipo de uso del suelo no tuvieron influencia estadísticamente significativa en las CMS de aceites y grasas en Asia y América;
- Las CMS de Zn fueron mayores en Asia que en América o Europa; El tamaño de la cuenca y el tráfico (IMD) no tuvieron influencia en las CMS de Zn en América y Europa. En el caso del tipo de uso del suelo, el análisis no fue concluyente;
- Las CMS de Cu y DQO fueron similares para los continentes estudiados; y
- El tamaño de la cuenca no tuvo influencia en la concentración de Cu y DQO. Sin embargo, el IMD presentó diferencias para Cu y el uso del suelo mostró diferencias para DQO.

2.2.2.1.- Por áreas o zonas

2.2.2.1.1.- Residencial y comercial

En las zonas residenciales y comerciales, los principales factores que determinan las cargas de contaminación derivadas de la escorrentía superficial son el grado de impermeabilidad del suelo y la cantidad de precipitación pluvial. En los centros urbanos con alta densidad edificada y elevados niveles de impermeabilidad, como pavimentos y superficies duras, se registran mayores cargas de contaminantes por unidad de superficie. De hecho, estudios han demostrado que, en áreas con altos niveles de impermeabilización, como las zonas comerciales, se presenta un aumento significativo en la concentración de contaminantes en la escorrentía (Roy *et al.*, 2008; Walsh *et al.*, 2005; Rodríguez Hernández *et al.*, 2016).

En particular, las zonas comerciales suelen tener un grado de impermeabilización aún mayor, lo que incrementa las cargas contaminantes en esas áreas (Booth *et al.*, 2002). El uso de materiales impermeables, junto con la densidad de actividades comerciales, facilita la acumulación y rápida evacuación de contaminantes hacia las vías hídricas cercanas.

La escorrentía en estas áreas urbanas y comerciales tiende a arrastrar una variedad de contaminantes, como nutrientes (nitratos y fosfatos), hidrocarburos, bacterias patógenas y residuos sólidos (Roesner y Bledsoe, 2003). Factores como la densidad vehicular y el uso intensivo de fertilizantes en espacios verdes son dos de los principales contribuyentes a la composición de estos contaminantes. Estudios recientes han identificado que los vehículos y el uso agrícola urbano son fuentes clave de contaminantes que afectan la calidad del agua en entornos urbanos (Hatt *et al.*, 2004).

Además, el desarrollo urbano intensivo y la falta de espacios permeables aumentan la capacidad de retención de contaminantes, lo que agrava la calidad del agua en las cuencas receptoras. Para mitigar estos impactos ambientales, se están promoviendo soluciones como los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS, en inglés “Sustainable Urban Drainage Systems”), que buscan reducir el efecto negativo de la escorrentía a través de técnicas de infiltración y vegetación urbana (Castro Fresno *et al.*, 2005; Fletcher *et al.*, 2015; Madrazo-Uribeetxebarria *et al.*, 2021; Garmendia *et al.*, 2022; Madrazo-Uribeetxebarria *et al.*, 2023).

Tabla 2.23 Valores típicos de contaminación de la escorrentía urbana en zonas residenciales y comerciales (ASCE, 1992 tomada de Jiménez Gallardo, 1999)

Parámetro	Concentración media (mg/L)	Concentración media ponderada (mg/L)	Concentración de diseño según el NURP (mg/L)
SST	23,9	180	180 - 548
DBO	12	12	12 - 19
DQO	94	82	82 - 178
P total	0,5	0,42	0,42 - 0,88
P soluble	0,15	0,15	0,15 - 0,28
NTK	2,3	1,9	1,90 - 4,18
(NO ₂ +NO ₃)-N	1,4	0,86	0,86 - 2,2
Cu	53 µg/L	43 µg/L	43 - 138 µg/L
Pb	238 µg/L	182 µg/L	182 - 443 µg/L
Zn	353 µg/L	202 µg/L	202 - 633 µg/L

NURP: Nationwide Urban Runoff Program de EE.UU.

La escorrentía en áreas residenciales tiende a mostrar mayores concentraciones de coliformes fecales en comparación con las zonas comerciales e industriales. Esto se debe principalmente a la presencia de animales, especialmente mascotas, que son comunes en los entornos residenciales. En contraste, en las zonas comerciales e industriales, la presencia de fauna es mucho menor debido a la falta de hábitats adecuados (Zoppou, 2001).

Aunque la cantidad total de materia presente en la escorrentía de zonas residenciales es baja, su contenido orgánico es significativamente mayor en comparación con las áreas industriales, donde predominan los materiales inorgánicos. Esto se debe a la

mayor presencia de residuos vegetales y animales en las áreas residenciales (Göbel *et al.*, 2007).

Por otro lado, las concentraciones de plomo y zinc son considerablemente más bajas en las áreas residenciales en comparación con las industriales, donde se encuentran niveles más altos de estos metales. Esto se debe en gran parte a que las áreas residenciales suelen tener un mantenimiento más frecuente, lo que incluye la limpieza regular de las superficies, disminuyendo así la acumulación de metales pesados (Nabizadeh *et al.*, 2005; Jiménez Gallardo, 1999)

En cuanto a la generación de polvo y suciedad, estudios recientes indican que las zonas residenciales generan en promedio 395 kg de polvo y suciedad por kilómetro de cuneta, mientras que en áreas comerciales esta cifra es de 81,8 kg/km, y en zonas industriales puede alcanzar hasta 790 kg/km. Además, se ha identificado que en las áreas industriales se acumulan hasta 16,9 kg de polvo y suciedad por kilómetro de cuneta al día (varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999).

Tabla 2.24 Valores característicos de contaminantes en escorrentías de áreas residenciales y comerciales (U.S. EPA, 1983 tomada de Cagiao Villar, 2002)

Contaminante	Zona Residencial	Zona comercial	Zona mixta
DBO ₅	10	9	7
DOO	73	57	65
SST	101	69	67
Pb	0,144	0,104	0,114
Cu	0,033	0,029	0,027
Zn	0,135	0,226	0,154
NTK	1,900	1,180	1,290
NO ₂ ⁻ +NO ₃ ⁻	0,736	0,572	0,558
P-Total	0,383	0,201	0,263

2.2.2.1.2.- Calles y autovías

Las concentraciones de contaminantes en la escorrentía urbana en estas zonas son generalmente superiores a las que ocurren en áreas comerciales y residenciales. Los contaminantes más comunes son: aceites, combustibles, fluidos hidráulicos (líquido de frenos), polvo, arena, y sal.

El deterioro de los pavimentos contribuye sólo con una pequeña fracción de masa contaminante en las autovías y el tipo de contaminante generado depende de la composición de la mezcla de hormigón y asfalto. Si se utiliza asfalto la correlación con la producción de contaminantes como DQO, COT, aceites y grasas es superior que

con el hormigón como material constituyente de las vías (*varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999*).

En áreas de poca precipitación, el viento generado por el tráfico vehicular y el restregamiento que ocasionan las ruedas de los coches, ocasionan el transporte de los sólidos hacia afuera de las autovías. En un estudio realizado en Sacramento (EE.UU.) se encontró que aproximadamente el 87% de la masa de sólidos totales se localizaba en la mitad y en las partes externas de las autovías; además, se estimó que se requería una lluvia de 25,4 mm con una punta de intensidad de 13 mm/h de al menos una hora de duración para eliminar el 90% de los sólidos depositados. Esta energía que transmite la lluvia correspondía aproximadamente a la transferida por 1.300 vehículos en una hora para restregar el suelo por acción de sus ruedas (*Asplund et al., 1982; citados por Jiménez Gallardo, 1999*).

Del uso y deterioro de los vehículos pueden generarse también residuos de plástico y vidrio.

Las concentraciones medias de contaminantes en la escorrentía de calles urbanas y autovías pueden ser tres veces más altas que las que ocurren en vías y zonas rurales.

El mantenimiento de las vías, eliminación de vegetación indeseable, protección de taludes, y la eliminación de la nieve, producen contaminación en la escorrentía superficial.

Las calles y autovías son una fuente significativa de metales pesados y contaminantes orgánicos, principalmente debido al desgaste de neumáticos, la liberación de aceites de motor y la emisión de gases de escape de los vehículos.

Tabla 2.25 Cargas medias de contaminación (kg/km cuneta/día)
en la escorrentía urbana de calles y autovías
(*Wanielista, 1979 tomada de Jiménez Gallardo, 1999*)

Contaminante	Calle urbana	Calle rural	Autovía
DBO ₅	0,85	0,140	0,9
DQO	5,0	4,30	10,0
Ortofosfatos	0,06	0,15	0,08
Nitratos	0,015	0,025	0,015
N	0,150	0,055	0,20
Cr	0,015	0,019	0,067
Cu	0,007	0,003	0,015
Fe	1,360	2,02	7,62
Mn	0,026	0,076	0,134
Ni	0,002	0,009	0,038
Pb	0,093	0,006	0,178
Sr	0,012	0,004	0,018
Zn	0,023	0,006	0,070

2.2.2.1.3.- Industrial

Se conoce que la escorrentía de áreas industriales contiene cantidades significativas de los mismos tipos de contaminantes que se encuentran en las aguas residuales urbanas; y que causan problemas similares de calidad de aguas. En principio se pensaba que los vertidos de procesos industriales eran responsables de poca degradación de la calidad del agua en función de que eran relativamente fáciles de detectar y controlar; pero una vez instalados sistemas de medición se comprobó que era evidente que existía otra fuente de contaminación (mayor mientras más extensa era el área analizada) que ocasionaba problemas similares en la calidad de las aguas. Dicha fuente era referida como una contaminación difusa atribuible netamente al fenómeno de la escorrentía superficial (*U.S. EPA, 1991b; citada por Jiménez Gallardo, 1999*).

Ciertamente, en áreas industriales son usados, producidos, almacenados o transportados una gran variedad y cantidad de materiales tóxicos. Malas prácticas de control de materiales pueden dar como resultado niveles significantes de contaminantes en la escorrentía, debido a vertidos, fugas, conexiones ilícitas, etc.; además, si se suma el hecho de que muchas áreas muy industrializadas son altamente impermeables (lo que da como resultado volúmenes grandes de escorrentía) se entiende la extensa variedad posible de contaminantes a verse en los sistemas de alcantarillado. Así, ésta variedad puede incluir, metales pesados (cromo, cadmio, cobre, plomo, níquel, zinc), pesticidas, herbicidas, y compuestos orgánicos tales como, combustibles, aceites, solventes, lubricantes, y grasas. Estos contaminantes causan problemas a la salud humana y a los organismos acuáticos (*U.S. EPA, 1991b; citada por Jiménez Gallardo, 1999*).

Las aguas de escorrentía asociadas con la actividad industrial y sus vertidos pueden o no contener las aguas de escorrentía estrictamente pluviales. Esto dependerá de si es tiempo seco, húmedo, o de lluvia, y además de la tipología y características de la industria; como por ejemplo: antigüedad y propósito de la misma, superficie ocupada y usos del suelo, transporte y destino final de las aguas de escorrentía, etc.

Dentro de la actividad industrial puede haber un sinnúmero de posibles contaminantes asociados a la contaminación atmosférica; por una parte, por propio efecto de la calidad atmosférica que predomina en el área analizada, y por otro, por las emisiones gaseosas que pueden producir las industrias. No necesariamente los contaminantes atmosféricos generados en los procesos industriales serán atrapados por la lluvia en su caída y/o depositados sobre las superficies de la industria ya que el viento puede influir en este fenómeno.

En general, las áreas expuestas en una industria a los fenómenos de corrosión, erosión y/o lavado pueden ser:

- cubiertas y tejados.
- calles y vías.
- áreas de estacionamiento.

- zonas peatonales y accesos.
- jardines.
- áreas desocupadas.
- áreas con obras en construcción.

Prácticamente casi toda actividad industrial genera una gran cantidad de residuos sólidos. Papel, cartón, plásticos, textiles, frutas, vegetales, metales, vidrios, madera, goma, polvo, residuos de animales, etc.; son generados en la industria y dispuestos en áreas o sitios específicos de almacenamiento previa a su evacuación y transporte a vertederos. Muchas veces debido a múltiples causas los residuos o, mejor dicho, fracciones de los mismos, pueden ser transportados principalmente en estado de suspensión por las aguas de escorrentía alterando así la calidad de las mismas.

En las industrias, debido a una inadecuada o negligente manipulación y transporte de materias primas, suministros, productos terminados, etc.; pueden ocurrir derrames o pérdidas de estos que en principio se depositarán sobre las superficies. De acuerdo con las prácticas de limpieza de estos derrames puede que éstos pasen a formar o no parte de la escorrentía del agua pluvial que drenará dentro de la industria hacia su destino final (red, o corriente receptora). Cosa igual ocurre con las fugas de dichos materiales durante su almacenamiento por deterioro de sus envases (*INSTITUT CERDA, 1992; citado por Jiménez Gallardo, 1999*).

Las operaciones de limpieza de equipos, filtros, reactores, centrífugas, etc., puede sumarse a los efectos anteriores, complicando aún más el problema. También los equipos y maquinaria utilizados pueden tener imperfecciones por un mal diseño o construcción o porque están sujetos a corrosión y deterioro. Reactores, conducciones, controles, servicios, etc., pueden aportar continua o intermitentemente contaminantes (metales pesados, aceites, grasas, suciedad, etc.) al incorporarse a la escorrentía superficial.

Existen factores que están directa o indirectamente relacionados entre sí y que en conjunto dan como resultado la cantidad y calidad de la contaminación de las aguas de escorrentía asociadas con la actividad industrial. Estos factores se pueden agrupar en dos grupos (*varios autores citados por Jiménez Gallardo, 1999*):

- factores ligados con el entorno físico en general donde se desarrollan las actividades industriales, y
- factores propios de cada industria.

Dentro del primer grupo, se pueden citar a los siguientes:

- variaciones temporales/estacionales del clima.
- curva IDF, (T_f), de la lluvia.

- deshielo de la nieve.
- velocidad y dirección predominante del viento.
- número de días secos antecedentes al aguacero.

En el segundo grupo se pueden citar:

- usos del suelo (áreas impermeables, áreas permeables (tasas de infiltración), erosión).
- prácticas de control de la escorrentía.
- prácticas de limpieza (lavado, barrido de superficies, gestión de residuos sólidos).
- variaciones en el tiempo de los ciclos de producción y de la actividad industrial en general.

La acumulación y el posterior lavado y transporte de los contaminantes se deriva del análisis integral o simplificado de los factores antes citados. Mención especial merece el fenómeno del primer flujo; aspecto muy importante en la contaminación de las aguas de escorrentía.

Durante el primer flujo, al inicio del aguacero, ocurren las mayores concentraciones de contaminantes que con el tiempo tenderán a disminuir (*Temprano et al., 1996*). Esto se debe a que en ese instante ocurre un lavado brusco de los contaminantes depositados y acumulados en las superficies.

Es indudable que hablar de la contaminación de la escorrentía industrial conlleva a citar necesariamente en conjunto, y de ninguna manera por separado, su cantidad y calidad; aspecto que *Durchschlag, 1990; citado por Jiménez Gallardo, 1999*, corrobora al enunciar dos tipos de procesos, a los que él llama:

- proceso de precipitación, escorrentía, transporte.
- proceso de contaminación, transporte, purificación.

El primero de ellos relacionado con la cantidad de contaminación, y el segundo con la calidad. Estos procesos ocurren paralelamente y al mismo tiempo a nivel de la atmósfera y a nivel de superficies.

Existe en general poca información referente a la calidad de las aguas de escorrentía en zonas industriales. Los efluentes líquidos industriales presentan una gran variedad y dispersión en cuanto a sus características y composición, más aún lo serán los de las aguas de escorrentía en zonas industriales; esto se debe de manera fundamental a que cada industria constituye un caso particular; inclusive entre industrias que se piensa son similares porque elaboran un mismo tipo de producto, pueden existir muchas

diferencias como por ejemplo: uso de distintas tecnologías y maquinarias, diferentes condiciones de entorno físico, mejores o peores sistemas de control, etc.

Un ejemplo de los valores que toman los contaminantes en las aguas de escorrentía de zonas industriales se presenta a continuación:

Las zonas industriales suelen presentar las mayores concentraciones de contaminantes en la escorrentía debido a la presencia de sustancias químicas, metales pesados y otros compuestos tóxicos. La actividad industrial contribuye significativamente a la carga contaminante en los cuerpos de agua receptores.

Tabla 2.26 Concentraciones de contaminantes en la escorrentía de zonas industriales (varios autores; tomada de Jiménez Gallardo, 1999)

Parámetro	Unidades	Valor
DBO ₅	mg/L	8 - 12
SS	mg/L	45 - 375
N total	mg/L	0,2 – 1,1
P total	mg/L	-
Pb	mg/L	0,02 – 1,1
CT	Nº/100 ml	10

Agrupando lo mencionado anteriormente podemos encontrar la siguiente tabla que describe las posibles concentraciones de contaminantes de la escorrentía urbana según los tipos de zonas (residencial, comercial, industrial, etc.):

Tabla 2.27 Comparación de concentraciones (P₅₀) en mg/L de escorrentías de diferentes cuencas y usos de suelo (varios autores citados por Espín Leal, 2016)

Lugar	Uso del suelo	SS	DQO	N total	P total	Zn	Pb
China	Calle con tráfico	394	319	7,3	0,9	0,732	0,58
	Calle residencial	31	31	2,9	0,1	0,136	0,546
	Zona comercial	85	129	7,2	0,46	0,42	0,55
	Tejado de hormigón	30	59	4,9	0,15	0,225	0,53
	Tejado de tejas	20	31	3,7	0,06	-	-
	Campus universitario	52	95	7,2	0,18	-	-
Francia	Tejado	17	27	-	-	2,98	0,39
	Patio	40	63	-	-	0,58	0,11
	Calle	97	135	-	-	0,56	0,14
	Salida alcantarillado	221	331	-	-	1,53	0,21

Lugar	Uso del suelo	SS	DQO	N total	P total	Zn	Pb
EE.UU.	Residencial	28	-	-	-	103	0,008
	Comercial	18	-	-	-	156	0,005
	Industrial	73	-	-	-	550	0,019
	Agrícola	88	-	-	-	234	0,01
	Espacios libres	135	-	-	-	23	0,001
Finlandia	Centro ciudad	334,52	19,85	1,71	0,41	260,86	8,78
	Calles	348,33	58,67	1,66	0,34	205	11
	Autovías	330	31,36	1,7	1,01	102	33,4
	Industrial	278,43	19,85	1,71	0,36	260,86	8,78
	Comercial	278,43	19,85	1,71	0,36	260,86	8,78
	Residencial (multifamiliar)	156,71	11,72	1,76	0,23	231,89	11,4
	Residencial (unifamiliar)	49,93	13,14	1,79	0,09	41,6	1,07

2.2.3.- Relación con las aguas residuales urbanas

Del estudio NURP realizado por la U.S. EPA se concluyó que al comparar las cargas anuales de contaminantes presentes en las aguas de escorrentía superficial de zonas residenciales y comerciales con las de los vertidos de los efluentes de tratamiento secundario de las depuradoras se podía afirmar *que (ASCE, 1992; citada por Jiménez Gallardo, 1999):*

- Los sólidos en suspensión en la escorrentía urbana tenían valores semejantes e inclusive superiores.
- Las DQO de la escorrentía eran del mismo orden de magnitud.
- Los nutrientes en la escorrentía presentaban valores un poco menores.

Sin embargo, se sabe que los vertidos de la escorrentía urbana son más intermitentes.

Chebbo, 1992 citado por Jiménez Gallardo 1999, propone las siguientes proporciones entre aguas de escorrentía, residuales y depósitos en red unitaria:

Tabla 2.28 Proporción másica en % de contaminación anual aportada por las diversas fuentes de contaminación de los reboses de alcantarillado unitario
(Chebbo, 1992; tomada de Jiménez Gallardo 1999)

Fuente	SS	DQO	DBO₅	Pb
Aguas de escorrentía	56	45	23	63
Aguas residuales	20	33	55	9
Depósitos en red	24	22	22	28

A continuación, se presentan dos tablas donde se comparan los valores de las concentraciones que pueden tener los contaminantes presentes en la escorrentía urbana con respecto a los que pueden presentarse en las aguas residuales urbanas y en las aguas de los reboses de alcantarillado unitario.

Tabla 2.29 Comparación de concentraciones
(agua residual urbana, escorrentía superficial y rebose de alcantarillado unitario)
(Suárez, 1994; tomada de Jiménez Gallardo 1999)

Parámetro	Agua residual urbana (mg/L)	Escorrentía superficial urbana (mg/L)	Rebose de alcantarillado unitario (mg/L)
SS	220	190	425
DBO ₅	220	11	90
DQO	500	85	380
N amoniacal	25	1,45	6,0
N total	40	3,2	8,3
P total	8	0,34	10
Pb	0,11	0,21	0,25
Zn	0,43	0,30	0,87
Aceites	100	0,4	-
CF	10 ⁶ - 10 ⁷ /100 ml	6.430 /100 ml	10 ⁵ - 10 ⁸ /100ml

Tabla 2.30 Comparación de concentraciones (agua de lluvia, escorrentía superficial, rebose de alcantarillado unitario, agua residual urbana)
(Metcalf&Eddy, 1991; tomada de Jiménez Gallardo 1999)

Parámetro	Unidades	Agua de lluvia	Escorrentía superficial	Rebose de alcantarillado unitario	Agua residual urbana
SS	mg/L	-	67 - 101	270 - 550	100 - 350
DBO ₅	mg/L	1 - 13	8 - 10	60 - 220	110 - 400
DQO	mg/L	9 - 16	40 - 73	260 - 480	250 - 1000
N total	mg/L	-	-	4 - 17	20 - 85
NTK	mg/L	-	0,43 - 1,0	-	20 - 85
Nitratos	mg/L	0,05 - 1,0	0,48 - 0,91	-	0
P total	mg/L	0,02 - 0,15	0,67 - 1,66	1,2 - 2,8	4 - 15
Cu	µg/L	-	27 - 33	-	-
Pb	µg/L	30 - 70	30 - 144	140 - 600	-
Zn	µg/L	-	135 - 226	-	-
CF	Nº/100 ml	-	1.000 – 21.000	200.000 – 1.100.000	10 ⁶ - 10 ⁷

La contaminación de la escorrentía urbana y las aguas residuales urbanas comparten características similares en cuanto a la presencia de nutrientes, materia orgánica y contaminantes tóxicos. Sin embargo, las escorrentías urbanas suelen contener mayores concentraciones de metales pesados y contaminantes derivados de actividades industriales y el tráfico vehicular (Paul y Meyer, 2001). Las aguas residuales urbanas, por su parte, contienen una mayor proporción de materia orgánica biodegradable y nutrientes derivados de las actividades domésticas (Smith *et al.*, 1999).

Una comparación entre los niveles de contaminantes en la escorrentía urbana y las aguas residuales urbanas muestra que, en algunas ocasiones, los niveles de ciertos contaminantes pueden ser más altos en la escorrentía debido a la falta de tratamiento previo antes de su vertido en los cuerpos de agua receptores (Davis y Shokouhian, 2001). Además, la escorrentía urbana presenta un desafío adicional debido a su naturaleza difusa y a la variabilidad en las concentraciones de contaminantes según las condiciones climáticas y el uso del suelo.

Como resumen se puede afirmar que los valores característicos de la contaminación de la escorrentía urbana varían significativamente en función del tipo de área de donde provienen. Las zonas industriales y las calles y autovías tienden a ser las que presentan las concentraciones más altas de contaminantes tóxicos y metales pesados, mientras que las áreas residenciales y comerciales también contribuyen a la carga total de nutrientes y materia orgánica en los cuerpos de agua receptores. La relación entre la contaminación de la escorrentía urbana y las aguas residuales urbanas subraya la necesidad de enfoques integrales en la gestión de las aguas pluviales para minimizar los impactos ambientales.

2.3.- EL PRIMER LAVADO (“FIRST FLUSH”)

2.3.1.- Introducción al fenómeno del “First Flush”

2.3.1.1.- Definición del “First Flush”

El fenómeno del “First Flush” se refiere al arrastre de una alta concentración de contaminantes en las primeras fases de un evento de escorrentía pluvial. Este fenómeno ha sido ampliamente reconocido en áreas urbanas debido a la acumulación de partículas y sustancias contaminantes en superficies impermeables, como calles y techos, que son lavadas durante los primeros momentos de una tormenta (*Di Modugno et al.*, 2015). La intensidad del primer lavado varía dependiendo de factores como la duración de los periodos secos previos, la intensidad de la lluvia, y el tipo de superficie sobre la cual se acumulan los contaminantes.

La escorrentía generada durante este fenómeno puede transportar contaminantes como sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), que impactan negativamente la calidad de las aguas receptoras (*Gorgoglione et al.*, 2019).

En estudios recientes, se ha identificado que la mayoría de los contaminantes son arrastrados en el primer 30% del volumen de escorrentía, lo que convierte al primer lavado en un tema crucial para la gestión de aguas pluviales urbanas (*Saget et al.*, 1996).

Existen diversas formas de definir el primer lavado. Una de las definiciones más usadas es la de la curva M(V), que representa la relación entre la masa acumulada de contaminantes y el volumen de escorrentía. Esta curva permite clasificar la intensidad del primer lavado y evaluar su impacto en la calidad del agua (*Bertrand-Krajewski et al.*, 1998).

La importancia del fenómeno radica en que, si no se gestionan adecuadamente los volúmenes de escorrentía iniciales, se puede comprometer significativamente la salud de los cuerpos de agua receptores. Las partículas que son arrastradas en el primer lavado contienen una alta proporción de metales pesados, nutrientes y otros contaminantes que pueden afectar la vida acuática y la calidad del agua potable (*Egodawatta et al.*, 2009; citados por *Perera et al.*, 2021).

Por este motivo, la previsión y control del primer lavado se ha vuelto una prioridad en la planificación urbana. Medidas como la creación de sistemas de almacenamiento y tratamiento de aguas pluviales se han implementado en ciudades para mitigar el impacto negativo de este fenómeno (*Di Modugno et al.*, 2015).

2.3.1.2.- Impacto en las áreas urbanas

El aumento de la urbanización ha intensificado el impacto del primer lavado en las áreas metropolitanas. Con el incremento de las superficies impermeables, como asfalto y cemento, la capacidad de las áreas urbanas para infiltrar agua se ha reducido drásticamente. Esto genera un mayor volumen de escorrentía superficial, que transporta los contaminantes acumulados en dichas superficies [*Rodríguez Hernández*

et al., 2010; Rodríguez Hernández *et al.*, 2016; (Guan *et al.*, 2015; citados por Russo, *et al.*, 2023)]. El resultado es una mayor frecuencia e intensidad de eventos de primer lavado.

Este fenómeno afecta directamente la calidad de los recursos hídricos en zonas urbanas. Las aguas que reciben el primer lavado suelen tener concentraciones muy altas de contaminantes que exceden los límites permitidos para la vida acuática y el uso recreativo de los cuerpos de agua (Liu *et al.*, 2016; citados por Perera *et al.*, 2019). Por ejemplo, se ha encontrado que, en muchas ciudades, la escorrentía inicial contiene hasta un 80% de la carga total de contaminantes arrastrada por un evento de lluvia (Sartor *et al.*, 1974; citados por Russo, *et al.*, 2023).

Un desafío clave en la gestión del primer lavado es la variabilidad de su impacto, que depende de varios factores como el tamaño de la cuenca, la pendiente del terreno, y las características del evento de lluvia. Esta variabilidad dificulta la creación de soluciones universales aplicables a todas las áreas urbanas, y requiere un enfoque local y contextualizado (Perera *et al.*, 2019).

El primer lavado también afecta la infraestructura urbana, incluyendo los sistemas de alcantarillado, que pueden verse sobrecargados por el aumento repentino en el volumen de escorrentía. Además, la acumulación de sedimentos y otros materiales en las redes de drenaje puede obstruir las tuberías, lo que aumenta el riesgo de inundaciones urbanas (Hur *et al.*, 2018; citados por Russo, *et al.*, 2023).

Por tanto, la implementación de sistemas de gestión de aguas pluviales se ha vuelto crítica en muchas ciudades. Soluciones como tanques de retención, biofiltros, y otras tecnologías basadas en la naturaleza pueden ayudar a reducir el impacto del primer lavado en áreas urbanas (Rodríguez *et al.*, 2021; citados por Russo, *et al.*, 2023).

2.3.1.3.- Importancia de la gestión de aguas pluviales

La gestión del primer lavado forma parte integral de los programas de control de calidad del agua en áreas urbanas. Los sistemas de tratamiento de aguas pluviales están diseñados para capturar y tratar la primera porción del volumen de escorrentía, que contiene las concentraciones más altas de contaminantes. Esto es especialmente importante en áreas densamente pobladas donde el control de la calidad del agua es crucial para proteger la salud pública (Di Modugno *et al.*, 2015).

Entre las estrategias más efectivas para mitigar los efectos del primer lavado se encuentran los sistemas de almacenamiento y retención, que permiten tratar el agua antes de que llegue a los cuerpos receptores. Estos sistemas se basan en la premisa de que, al capturar los primeros milímetros de escorrentía, es posible remover una parte sustancial de la carga contaminante (Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998).

Las soluciones basadas en la naturaleza, como los humedales artificiales y los techos verdes, también han mostrado ser efectivas en la reducción del impacto del primer lavado. Estas estrategias no solo mejoran la calidad del agua, sino que también ayudan a reducir el volumen total de escorrentía, al fomentar la infiltración y la evapotranspiración (Perera *et al.*, 2019).

Otro aspecto importante de la gestión del primer lavado es la monitorización continua de los eventos de lluvia y escorrentía. Mediante el uso de sensores y modelos predictivos, es posible anticipar eventos de alta intensidad y ajustar los sistemas de tratamiento de manera proactiva (Rodríguez *et al.*, 2021; citados por Russo, *et al.*, 2023).

Por último, es crucial la integración de políticas de gestión del primer lavado dentro de los marcos normativos y de planificación urbana. Las ciudades deben adoptar regulaciones que obliguen a la implementación de medidas de control de escorrentía en nuevas construcciones y proyectos de renovación urbana (Regione Puglia, 2013; citado por Russo, *et al.*, 2023).

2.3.2.- Curvas M(V) en el análisis del “First Flush”

2.3.2.1.- Definición de las curvas M(V)

El primer lavado es claramente relevante para el diseño de los sistemas de retención de contaminantes de los reboses de alcantarillado unitarios [(Deletic, 1998; Gupta & Saul, 1996); citados por Diaz-Fierros T. *et al.*, 2002]. Si las primeras fases de un evento de rebose de alcantarillado unitario contienen una proporción muy alta de la carga contaminante, entonces la interceptación de este volumen inicial será proporcionalmente más eficiente para reducir el impacto de ese evento [(Bertrand-Krajewski, 1998; Chebbo, & Saget, 1998); citados por Diaz-Fierros T. *et al.*, 2002].

Las curvas M(V) son herramientas utilizadas para evaluar la relación entre la cantidad acumulada de contaminantes y el volumen acumulado de escorrentía durante un evento de lluvia. Fueron introducidas inicialmente por Helsel *et al.*, 1979 y popularizadas en los estudios sobre el primer lavado como un método gráfico para determinar si un evento de lluvia está concentrando contaminantes en la fase inicial de la escorrentía (Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998). Esta curva, cuando se encuentra por encima de la línea 1:1, indica la presencia de un primer lavado, ya que muestra que la masa contaminante se está liberando de manera desproporcionada en los primeros momentos del evento pluvial (Di Modugno *et al.*, 2015).

Una de las ventajas de la curva M(V) es su capacidad para representar eventos de lluvia de diferentes intensidades y duraciones, lo que la convierte en una herramienta flexible para evaluar el impacto del primer lavado en diversos contextos urbanos. Los investigadores han ajustado la curva M(V) utilizando funciones de potencia, donde el coeficiente "b" permite clasificar la intensidad del primer lavado en diferentes categorías (Gorgoglione *et al.*, 2021).

Las curvas M(V) (Saget *et al.*, 1996, citados por Suárez y Puertas, 2005) permiten una evaluación cuantitativa de la existencia del primer lavado mediante el denominado exponente "b", un parámetro de forma que ajusta los datos usando una expresión $Y = X^b$ (función potencial). Valores del parámetro de forma "b" menores que 1 indican la existencia de un primer lavado. Cuanto menor sea el valor de "b", más intenso será el primer lavado.

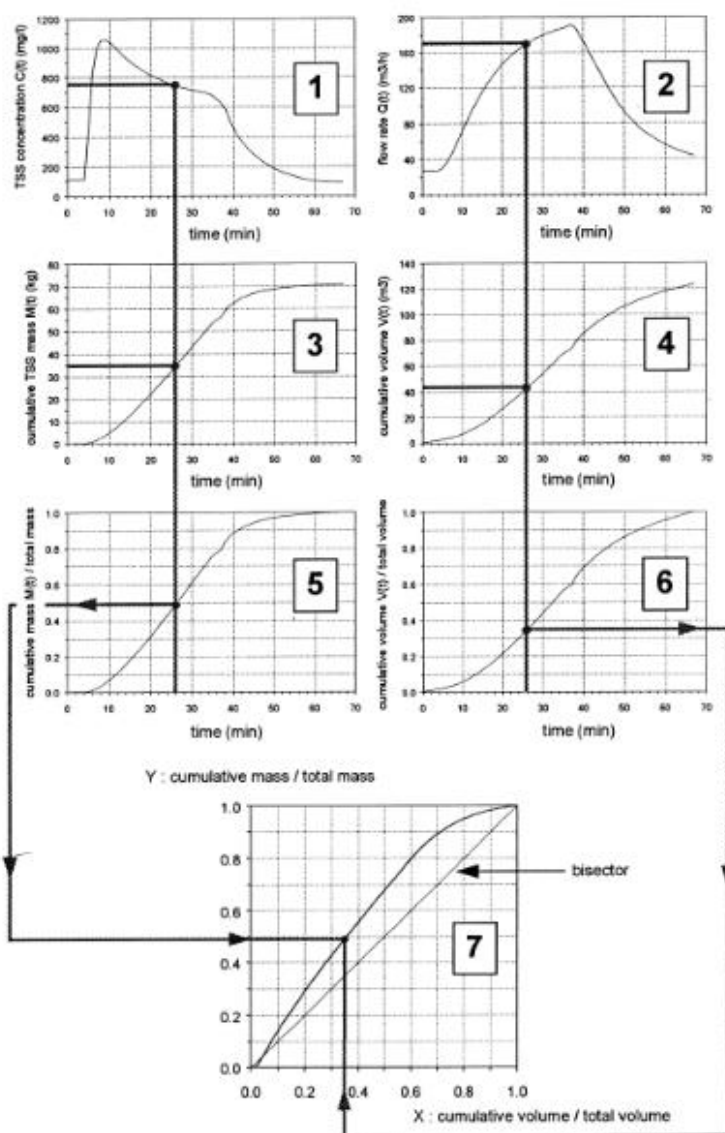


FIG.2.1 Ejemplo de obtención de una curva M(V) para SST
(Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998)

Las curvas M(V) no solo permiten identificar si se está produciendo un primer lavado, sino que también proporcionan una medida cuantitativa de su intensidad. En la metodología desarrollada por Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998, se establecen cuatro clases de intensidad del primer lavado según el valor de "b", con categorías que van desde "sin primer lavado" hasta "primer lavado fuerte" (Egodawatta *et al.*, 2007; citados por Al Mamoon *et al.*, 2019).

2.3.2.2.- Relación entre carga contaminante y volumen de escurrentía

La curva M(V) se utiliza para visualizar cómo la carga de contaminantes acumulada varía en relación con el volumen de escurrentía. Esta relación es clave para comprender el comportamiento de los contaminantes durante un evento de lluvia. El estudio

realizado por *Saget et al.*, 1996 mostró que, en muchos casos, más del 80% de los contaminantes arrastrados en un evento de escorrentía son transportados por el primer 30% del volumen total de agua. Esto es lo que se conoce como el "criterio 30/80", y se considera una medida estándar para definir la ocurrencia del primer lavado (*Bertrand-Krajewski et al.*, 1998).

El método de las curvas M(V) ha sido ampliamente adoptado en estudios de calidad del agua debido a su simplicidad y capacidad para identificar variaciones significativas en la concentración de contaminantes. Sin embargo, este enfoque puede ser limitado en ciertas condiciones, como cuando el volumen de escorrentía no se corresponde directamente con la carga de contaminantes, lo que requiere un análisis más detallado utilizando modelos adicionales (*Gorgoglione et al.*, 2021).

2.3.2.3.- Premisas y supuestos en el uso de curvas M(V)

El uso de curvas M(V) en el análisis del *primer lavado* se basa en varias premisas clave. Una de las más importantes es la suposición de que los contaminantes acumulados en las superficies urbanas están disponibles para ser transportados por la primera porción de la escorrentía (*Di Modugno et al.*, 2015). Además, se asume que existe una relación directa entre el volumen de escorrentía y la masa de contaminantes movilizados, aunque esta relación puede verse afectada por factores como la intensidad de la lluvia, el tipo de superficie y la presencia de sistemas de retención (*Perera et al.*, 2019).

Otra premisa importante es que los contaminantes no están distribuidos uniformemente en las superficies urbanas. Estudios han demostrado que factores como el tiempo transcurrido desde el último evento de lluvia, la pendiente del terreno y la proporción de superficies impermeables influyen en la concentración de contaminantes (*Liu et al.*, 2016; citados por *Perera et al.*, 2019). Esto significa que el uso de las curvas M(V) debe ser ajustado en función de las características locales de la cuenca.

Las curvas M(V) se han aplicado en diversas áreas geográficas para evaluar el fenómeno del primer lavado. En un estudio realizado en una cuenca urbana en el sur de Italia, los investigadores utilizaron esta metodología para clasificar la intensidad de los eventos de primer lavado y evaluar su impacto en la calidad del agua. Los resultados mostraron que las áreas con mayores porcentajes de superficie impermeable experimentan eventos de primer lavado más frecuentes y más intensos (*Gorgoglione et al.*, 2019b; citados por *Russo, et al.*, 2023).

El uso de las curvas M(V) también ha sido criticado por su simplicidad, ya que no siempre captura la complejidad del proceso de transporte de contaminantes. Por ejemplo, algunos estudios han demostrado que la intensidad del primer lavado puede verse subestimada en áreas con alta vegetación o donde existen sistemas de tratamiento previos que retienen parte de la escorrentía (*Perera et al.*, 2019).

2.3.2.4.- Aplicaciones y desafíos del uso de las curvas M(V)

A pesar de sus limitaciones, las curvas M(V) siguen siendo una herramienta útil en el análisis y gestión del primer lavado. En particular, su uso ha permitido el desarrollo de sistemas de tratamiento específicos para capturar y tratar la escorrentía inicial, lo que reduce significativamente la cantidad de contaminantes que llegan a los cuerpos de agua receptores (*Di Modugno et al.*, 2015). Estos sistemas incluyen tanques de retención, filtros vegetales y tecnologías basadas en la naturaleza, que han demostrado ser eficaces en la reducción del impacto del primer lavado (*Perera et al.*, 2019).

En conclusión, aunque las curvas M(V) proporcionan un enfoque simplificado para el análisis del primer lavado, su capacidad para representar gráficamente la relación entre el volumen de escorrentía y la carga de contaminantes las convierte en una herramienta valiosa para los gestores del agua. Sin embargo, es importante tener en cuenta las particularidades de cada área de estudio y complementar el análisis con modelos más complejos si es necesario (*Bertrand-Krajewski et al.*, 1998).

2.3.3.- Metodología para la evaluación del “First Flush”

2.3.3.1.- Recopilación de datos de lluvia y escorrentía

La primera etapa en la evaluación del primer lavado consiste en la recopilación de datos precisos sobre las características de los eventos de lluvia y la escorrentía generada. Generalmente, estos datos se obtienen mediante estaciones de monitoreo equipadas con pluviómetros y medidores de flujo, los cuales permiten registrar variables clave como la intensidad de la precipitación, la duración del evento y el volumen total de escorrentía (*Di Modugno et al.*, 2015). Estas estaciones también pueden incluir muestreadores automáticos de agua para analizar la concentración de contaminantes como sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo.

Un aspecto importante en la recopilación de estos datos es la frecuencia del muestreo. Debido a la naturaleza dinámica del primer lavado, es crucial que los datos sean recolectados en intervalos cortos durante los primeros minutos del evento de lluvia, ya que es en este periodo cuando se movilizan la mayoría de los contaminantes (*Gorgoglione et al.*, 2021). Por ejemplo, en estudios recientes, los datos se han recolectado a intervalos de 5 a 15 minutos para capturar la variabilidad en la concentración de contaminantes y el volumen de escorrentía (*Liu et al.*, 2016; citados por *Perera et al.*, 2019).

El tipo de contaminantes que se monitorean también varía según el objetivo del estudio. En áreas urbanas, los contaminantes más comunes incluyen sólidos suspendidos totales (SST), metales pesados, nutrientes como nitrógeno y fósforo, y productos químicos orgánicos (*Sartor et al.*, 1974; citados por *Russo, et al.*, 2023). Estos contaminantes se transportan principalmente en la fase inicial de la escorrentía, lo que refuerza la necesidad de un muestreo intensivo durante el comienzo del evento pluvial (*Gorgoglione et al.*, 2019b; citados por *Russo, et al.*, 2023).

2.3.3.2.- Técnicas de monitoreo de calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua durante un evento de lluvia se realiza utilizando diferentes técnicas y equipos. Los muestreadores automáticos son uno de los métodos más comunes para recolectar muestras de agua en intervalos regulares. Estos dispositivos permiten capturar muestras representativas de la escorrentía a medida que el volumen de agua aumenta durante el evento de lluvia (*Di Modugno et al.*, 2015). Estas muestras luego se analizan en laboratorio para determinar las concentraciones de contaminantes.

Otro enfoque utilizado en la evaluación del primer lavado es el monitoreo continuo de la calidad del agua, que implica el uso de sensores in situ que miden parámetros como la turbidez, la conductividad y la concentración de nutrientes en tiempo real. Este método es particularmente útil en estudios donde se requiere una respuesta rápida o donde los eventos de lluvia son impredecibles (*Gorgoglione et al.*, 2021). Además, el monitoreo continuo permite capturar los picos en la concentración de contaminantes, que son característicos del primer lavado.

El análisis de las muestras de agua recolectadas se realiza utilizando métodos estandarizados, como los descritos en el manual de la APHA (*American Public Health Association*). Estos incluyen procedimientos para medir SST, nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y otros contaminantes relevantes. La precisión en el análisis es crucial para obtener una representación fiel del fenómeno del primer lavado (*Baird et al.*, 2017; citados por Russo, *et al.*, 2023).

2.3.3.3.- Simulación y modelado de eventos de lluvia

Además de la recopilación de datos en campo, la simulación de eventos de lluvia es una metodología fundamental para predecir y analizar el primer lavado. El modelo *SWMM* (*Storm Water Management Model*) es uno de los más utilizados en este contexto, ya que permite simular tanto la cantidad de escorrentía generada como la concentración de contaminantes transportados durante un evento pluvial (*Rossmann*, 2015; citado por Wang *et al.*, 2023; Madrazo-Uribeetxebarria *et al.*, 2021; Madrazo-Uribeetxebarria *et al.*, 2023). Este modelo toma en cuenta factores como las características de la cuenca, la infraestructura de drenaje, y la intensidad de la lluvia.

Los modelos como el *SWMM* requieren de datos meteorológicos detallados y características físicas del área de estudio, como el porcentaje de superficies impermeables, el tipo de suelo y la pendiente del terreno (*Gorgoglione et al.*, 2019b; citados por Russo, *et al.*, 2023). Una vez que se recopilan estos datos, el modelo simula la generación de escorrentía y su comportamiento durante un evento de lluvia, proporcionando información valiosa sobre el volumen de agua y la cantidad de contaminantes arrastrados.

Además del *SWMM*, en estudios recientes se ha comenzado a utilizar técnicas de aprendizaje automático, como el “*Random Forest*”, para mejorar la precisión de las

predicciones del primer lavado en áreas donde los datos son limitados. Estas técnicas permiten analizar grandes volúmenes de datos y extraer patrones que pueden ser difíciles de identificar utilizando modelos tradicionales (*Perera et al.*, 2019).

2.3.3.4.- Técnicas de calibración y validación de modelos

Para que los modelos predictivos, como el *SWMM*, produzcan resultados confiables, es necesario calibrarlos y validarlos con datos reales. La calibración implica ajustar los parámetros del modelo para que sus resultados coincidan con las observaciones empíricas. Esto se hace típicamente utilizando un subconjunto de datos de lluvia y escorrentía registrados en eventos anteriores (*Di Modugno et al.*, 2015). Una vez calibrado, el modelo se valida comparando sus predicciones con un conjunto de datos independiente para garantizar su precisión en condiciones variadas.

En el caso del modelo *SWMM*, los parámetros clave que se ajustan durante la calibración incluyen el coeficiente de escorrentía, la capacidad de infiltración del suelo y la tasa de acumulación de contaminantes en las superficies impermeables. Un buen ajuste de estos parámetros es crucial para obtener predicciones precisas sobre la generación de escorrentía y la concentración de contaminantes (*Rossmann, 2015; citado por Wang et al.*, 2023).

La validación del modelo se realiza evaluando su capacidad para predecir correctamente la ocurrencia del primer lavado en eventos de lluvia no utilizados en la calibración. Esta validación es esencial para determinar la aplicabilidad del modelo en diferentes contextos geográficos y climatológicos (*Perera et al.*, 2019).

2.3.3.5.- Técnicas de análisis de datos

Una vez que se recopilan los datos de campo y se ejecutan las simulaciones, es necesario realizar un análisis estadístico para identificar patrones en la ocurrencia del primer lavado. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la regresión lineal y no lineal, que permiten analizar la relación entre variables como la intensidad de la lluvia, el volumen de escorrentía y la concentración de contaminantes (*Gorgoglione et al.*, 2021).

Además, se utilizan análisis de correlación para evaluar la fuerza de la relación entre las diferentes variables meteorológicas y de escorrentía. Estos análisis ayudan a identificar las variables que tienen un mayor impacto en la ocurrencia del primer lavado, lo que a su vez puede guiar el diseño de sistemas de gestión de aguas pluviales (*Bertrand-Krajewski et al.*, 1998).

2.3.3.6.- Métodos de predicción del primer lavado

Una de las áreas emergentes en el análisis del primer lavado es el uso de métodos de predicción basados en datos. Estos métodos incluyen algoritmos de aprendizaje automático, como los bosques aleatorios “*Random Forest*”, que permiten predecir la ocurrencia del primer lavado basándose en un conjunto de variables meteorológicas y

de escorrentía (Jeung *et al.*, 2019; citados por Gao *et al.*, 2023). Estos enfoques son especialmente útiles en áreas donde los datos son escasos o donde el comportamiento de la escorrentía es muy variable.

El uso de modelos de predicción basados en datos permite no solo identificar cuándo ocurrirá un evento de primer lavado, sino también predecir su intensidad. Esto es particularmente importante para diseñar sistemas de tratamiento de aguas pluviales que sean capaces de gestionar eficazmente el volumen y la carga contaminante de los primeros momentos de la escorrentía (Gorgoglione *et al.*, 2021).

2.3.4.- Aplicaciones y condicionantes en el estudio del “First Flush”

2.3.4.1.- Variables clave para predecir el “First Flush”

En la predicción del primer lavado, algunas variables meteorológicas y características de la cuenca son fundamentales para determinar la intensidad y frecuencia del fenómeno. Entre estas variables, la duración del periodo seco antecedente (*ADP*, *Antecedent Dry Period*), la intensidad máxima de lluvia (*Imax*), y el volumen total de escorrentía juegan un papel clave (Gorgoglione *et al.*, 2019b; citados por Russo, *et al.*, 2023). Investigaciones han demostrado que eventos de lluvia con un periodo seco prolongado suelen generar un primer lavado más intenso debido a la mayor acumulación de contaminantes en las superficies impermeables (Egodawatta *et al.*, 2009; citados por Perera *et al.*, 2019).

Además, la intensidad de la lluvia durante un evento pluvial también afecta directamente la movilización de contaminantes. Lluvias intensas con cortos periodos de duración suelen generar un mayor primer lavado al arrastrar rápidamente los contaminantes que se han acumulado en las superficies urbanas (Gnecco *et al.*, 2005; citados por Perera *et al.*, 2019). Por otro lado, lluvias prolongadas, pero de baja intensidad tienden a diluir la concentración de contaminantes, reduciendo la intensidad del primer lavado (Kang *et al.*, 2006; citados por Perera *et al.*, 2019).

Otra variable importante es el porcentaje de superficie impermeable en la cuenca. Cuanto mayor es el área impermeable, mayor es la cantidad de contaminantes que pueden ser arrastrados durante los primeros momentos de la escorrentía (Rodríguez Hernández *et al.*, 2010; Perera *et al.*, 2019). Estudios han demostrado que cuencas urbanas con más del 70% de su área cubierta por superficies impermeables presentan eventos de *primer lavado* más frecuentes y severos (Gorgoglione *et al.*, 2019b; citados por Russo, *et al.*, 2023).

2.3.4.2.- Aplicaciones en el diseño de sistemas de tratamiento

El análisis del primer lavado tiene aplicaciones directas en el diseño de sistemas de tratamiento de aguas pluviales, los cuales buscan capturar y tratar el volumen inicial de escorrentía, que suele contener las concentraciones más altas de contaminantes. Una de las soluciones más implementadas son los tanques de retención, que almacenan el

agua de lluvia para su tratamiento posterior, permitiendo reducir la carga de contaminantes que llega a los cuerpos de agua receptores (*Di Modugno et al.*, 2015).

Los sistemas basados en la naturaleza, como los humedales construidos y los biofiltros, también han demostrado ser eficaces en la reducción del impacto del primer lavado. Estos sistemas permiten la infiltración del agua de lluvia, promoviendo la eliminación de contaminantes a través de procesos naturales de filtración y degradación biológica (*Perera et al.*, 2019). Además, su diseño puede ser adaptado para retener el volumen de agua esperado en el primer tercio de la escorrentía, lo que maximiza su eficiencia en el tratamiento del primer lavado (*Gorgoglione et al.*, 2021).

Otro enfoque utilizado en áreas urbanas es el de los techos verdes, que permiten reducir tanto el volumen de escorrentía como la concentración de contaminantes en el agua. Estos sistemas funcionan reteniendo el agua de lluvia en su sustrato, lo que reduce la cantidad de agua que fluye hacia los sistemas de drenaje urbanos (*Liu et al.*, 2016; citados por *Perera et al.*, 2019). De esta forma, los techos verdes ayudan a mitigar los efectos del primer lavado al reducir tanto la escorrentía como la carga contaminante.

2.3.4.3.- Factores Limitantes y condicionantes en el análisis

A pesar de los avances en la modelización y predicción del primer lavado, existen varios factores que pueden limitar la precisión de los análisis. Uno de los principales condicionantes es la disponibilidad de datos meteorológicos y de escorrentía, especialmente en áreas donde el monitoreo es escaso o inexistente. En estos casos, los modelos tradicionales pueden tener dificultades para proporcionar predicciones precisas (*Rodríguez et al.*, 2021; citados por *Russo, et al.*, 2023). Por esta razón, el uso de técnicas de aprendizaje automático ha ganado popularidad, ya que permiten realizar predicciones basadas en datos limitados, siempre y cuando se tenga acceso a un conjunto de datos inicial adecuado (*Gorgoglione et al.*, 2021).

Otro factor limitante es la complejidad inherente del fenómeno *primer lavado*. Debido a la variabilidad en las características de la lluvia y la superficie de la cuenca, el comportamiento del primer lavado puede variar significativamente entre eventos pluviales, lo que dificulta la creación de modelos universales que se apliquen a todas las condiciones (*Perera et al.*, 2019). Por ejemplo, la presencia de vegetación o sistemas de almacenamiento intermedios puede reducir significativamente la intensidad del primer lavado en áreas urbanas con alta infraestructura verde (*Di Modugno et al.*, 2015).

2.3.4.4.- Influencia de la infraestructura urbana

La infraestructura urbana tiene una influencia directa sobre la intensidad y la frecuencia del primer lavado. Las áreas con una mayor densidad de carreteras y edificios presentan una mayor acumulación de contaminantes, lo que aumenta el riesgo de un primer lavado intenso durante los eventos de lluvia (*Egodawatta et al.*, 2009; citados por *Perera et al.*, 2019). Además, las redes de alcantarillado pueden verse

sobrecargadas por el aumento repentino en el volumen de escorrentía, lo que aumenta el riesgo de desbordamientos y contaminación de los cuerpos de agua (*Hur et al., 2018; citados por Russo, et al., 2023*).

Sistemas de drenaje diseñados adecuadamente, que incluyan medidas de retención y filtración, pueden mitigar estos efectos. Por ejemplo, la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles SUDS (“*Sustainable Drainage Systems*”), en áreas urbanas ha demostrado ser efectiva para reducir tanto el volumen de escorrentía como la cantidad de contaminantes transportados durante un evento de primer lavado (*Madrazo-Uribeetxebarria et al., 2021; Garmendia et al., 2022; Madrazo-Uribeetxebarria et al., 2023; Gorgoglione et al., 2019b; citados por Russo, et al., 2023*).

2.3.4.5.- Condicionantes geográficos y climáticos

El análisis del primer lavado también se ve condicionado por factores geográficos y climáticos. En áreas con suelos altamente permeables, la infiltración del agua de lluvia puede reducir significativamente el volumen de escorrentía superficial, lo que a su vez disminuye la cantidad de contaminantes arrastrados (*Gorgoglione et al., 2019b; citados por Russo, et al., 2023*). Por el contrario, en regiones con suelos compactados o arcillosos, la escorrentía superficial es mucho mayor, lo que aumenta el riesgo de un primer lavado intenso.

El clima local también juega un papel importante en la ocurrencia del primer lavado. En regiones donde las lluvias son frecuentes, pero de baja intensidad, el fenómeno tiende a ser menos pronunciado, ya que la acumulación de contaminantes es limitada. Sin embargo, en áreas con eventos de lluvia intensos y poco frecuentes, el primer lavado suele ser más severo debido a la mayor acumulación de contaminantes entre eventos (*Kang et al., 2006; citados por Perera et al., 2019*).

2.3.4.6.- Aplicaciones futuras y recomendaciones

Con el creciente enfoque en la sostenibilidad y la gestión de los recursos hídricos, el estudio del primer lavado se ha convertido en un área clave para el diseño de soluciones de infraestructura urbana resilientes. En el futuro, la integración de tecnologías avanzadas de monitoreo y modelización, como los sistemas de información geográfica (SIG) y las herramientas de inteligencia artificial, puede mejorar significativamente nuestra capacidad para predecir y gestionar el primer lavado (*Gorgoglione et al., 2021*).

Es crucial que los responsables de la planificación urbana adopten enfoques integrados que consideren tanto la mitigación del primer lavado como la adaptación al cambio climático, ya que se espera que los patrones de precipitación cambien en muchas regiones del mundo. Soluciones basadas en la naturaleza, combinadas con tecnologías avanzadas de tratamiento, serán esenciales para asegurar la resiliencia de las ciudades frente a los desafíos hídricos futuros (*Perera et al., 2019*).

2.4.- CARENCIAS ENCONTRADAS EN EL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Las siguientes áreas pueden señalarse como puntos clave donde el conocimiento actual aún es limitado o donde se pueden desarrollar mejoras:

2.4.1.- Caracterización del "First Flush" y su variabilidad espacial y temporal

Carencia: Aunque el fenómeno del "First Flush" ha sido ampliamente estudiado, las metodologías tradicionales se basan en ajustes de regresión que no capturan completamente la variabilidad espacial y temporal de este fenómeno en distintas cuencas urbanas. En particular, falta una evaluación detallada que incluya parámetros innovadores extraídos de las curvas M(V) en vez de las metodologías tradicionales.

Necesidad: Profundizar en la cuantificación del "First Flush" mediante nuevas metodologías estadísticas y matemáticas que consideren no solo su magnitud, sino también su dinámica en diferentes tipos de eventos de lluvia y en cuencas de características diversas.

2.4.2.- Simulación y evaluación de polutogramas

Carencia: Aunque los polutogramas se generan para distintos eventos críticos, las investigaciones suelen enfocarse en contaminantes tradicionales; faltan estudios que exploren otros contaminantes emergentes (por ejemplo, microplásticos, fármacos y metales pesados), especialmente en áreas urbanas con actividades industriales o comerciales cercanas a cuerpos de agua. Tampoco existen métodos para evaluar la desfavorabilidad de los polutogramas desde el punto de vista de su contaminación.

Necesidad: Ampliar el rango de contaminantes evaluados y perfeccionar los modelos de simulación para incluir contaminantes emergentes en polutogramas de eventos de tormenta urbana. También crear herramientas metodológicas para poder valorar a los polutogramas y establecer criterios técnicos que permitan comparar distintos sucesos de contaminación por la escorrentía urbana.

2.4.3.- Impacto de contaminantes en cuencas urbanas y medios receptores fluviales

Carencia: Existen estudios sobre el impacto de ciertos contaminantes en medios receptores, pero se carece de evaluaciones longitudinales que consideren la acumulación de contaminantes a lo largo del tiempo, así como los efectos de eventos de lluvia repetitivos en la calidad del agua. Las metodologías actuales no logran capturar cómo los patrones de lluvia cambiantes debido al cambio climático afectan la carga contaminante en cuencas urbanas.

Necesidad: Desarrollar estudios longitudinales (estudios observacionales que recogen datos cualitativos y cuantitativos y se encargan de emplear medidas continuas o repetidas para dar seguimiento a sucesos particulares durante un período prolongado de tiempo, a menudo años o décadas) que evalúen el impacto acumulativo de los contaminantes en medios receptores a lo largo del tiempo y que modelen el impacto del cambio climático en la frecuencia e intensidad de los eventos de contaminación.

2.4.4.- Eficiencia de modelos de simulación hidrológica como SWMM

Carencia: Si bien el SWMM es una herramienta ampliamente usada, hay limitaciones en cuanto a la calibración y validación de sus resultados para áreas específicas con condiciones complejas (p. ej., áreas con diferentes usos del suelo dentro de la cuenca). Existen pocos estudios que exploren cómo mejorar los algoritmos del SWMM para proporcionar resultados más precisos en zonas urbanas densamente construidas o en regiones con pendientes pronunciadas.

Necesidad: Mejorar los algoritmos de simulación en modelos como el SWMM, incluyendo aspectos de calibración y validación más precisos para diferentes tipos de cuencas urbanas y variables hidrológicas no tradicionales.

2.4.5.- Carencias en la aplicación de criterios Dosis-Tiempo de exposición para evaluar polutogramas desde el punto de vista de la contaminación

2.4.5.1.- Limitación en la evaluación del impacto de la Dosis-Tiempo de exposición en la calidad del agua

Carencia: A nivel mundial, la mayoría de los estudios que utilizan polutogramas para evaluar la contaminación se enfocan principalmente en concentraciones instantáneas de contaminantes, sin considerar adecuadamente el efecto acumulativo de la dosis y el tiempo de exposición en los organismos acuáticos o en el medio receptor. La falta de estudios que integren criterios de Dosis-Tiempo en el análisis de polutogramas es una carencia significativa.

Necesidad: Se requiere un mayor desarrollo de modelos que consideren el impacto acumulativo de la exposición prolongada a contaminantes en combinación con las concentraciones pico. Estos modelos deberían integrar la variabilidad de la calidad del agua a lo largo del evento de lluvia y su efecto acumulativo a través del tiempo para proporcionar una visión más completa de la contaminación.

2.4.5.2.- Insuficiente aplicación de modelos matemáticos complejos para evaluar la Dosis-Tiempo

Carencia: Aunque existen modelos de simulación como el SWMM para generar polutogramas, estos no incorporan adecuadamente los efectos del tiempo de exposición a diferentes concentraciones de contaminantes en función de los parámetros Dosis-Tiempo. Este es un campo poco explorado en la modelación ambiental.

Necesidad: Es necesario integrar criterios Dosis-Tiempo en los modelos de simulación de escorrentía urbana, para que se consideren tanto los niveles de concentración como el tiempo de exposición, proporcionando así una evaluación más precisa del impacto de los contaminantes en el medio receptor.

2.4.5.3.- Falta de criterios internacionales uniformes para el análisis Dosis-Tiempo

Carencia: A nivel mundial, no existe un criterio normativo claro o uniforme que regule el análisis Dosis-Tiempo de exposición en la evaluación de polutogramas. Las metodologías varían entre países y áreas de estudio, lo que dificulta la comparación de resultados y la implementación de políticas ambientales coherentes.

Necesidad: Se deben desarrollar directrices y marcos normativos internacionales que estandaricen el uso de criterios Dosis-Tiempo en la evaluación de la contaminación en sistemas urbanos. Estas directrices deberían incluir metodologías para la implementación de estos parámetros en la gestión del agua urbana y los sistemas de drenaje.

2.4.6.- Carencias en el diseño de tanques de tormenta tomando en cuenta hietogramas de precipitación y período de retorno de lluvias críticas

2.4.6.1.- Falta de uso de hietogramas rectangulares (I-D) aislados para evaluar lluvias críticas

Carencia: Aunque el diseño de tanques de tormenta a menudo se basa en el uso de series continuas de datos de lluvia a largo plazo (registros anuales pluviométricos), existe una notable carencia en el análisis específico de lluvias críticas mediante matrices de lluvias que utilicen hietogramas rectangulares (intensidad-duración) aislados, cada uno con su respectivo período de retorno. Este enfoque sería útil para evaluar eventos extremos de lluvia de forma más precisa.

Necesidad: Se requiere implementar un enfoque más sistemático que combine matrices de lluvias con hietogramas rectangulares y períodos de retorno. Esto permitiría evaluar de manera más detallada el impacto de lluvias críticas sobre los sistemas de drenaje y tanques de tormenta, en lugar de depender únicamente de datos pluviométricos continuos que pueden no representar adecuadamente los eventos más extremos.

2.4.6.2.- Insuficiente evaluación del impacto de los hietogramas críticos sobre el diseño de tanques de tormenta

Carencia: Los estudios actuales no exploran suficientemente cómo el uso de hietogramas rectangulares críticos (I-D) con distintos períodos de retorno puede influir en el dimensionamiento y diseño de los tanques de tormenta. Se tiende a emplear datos continuos que no necesariamente capturan el impacto de eventos específicos de corta duración, pero de alta intensidad, que son relevantes para los diseños urbanos.

Necesidad: Se debe realizar una evaluación más profunda del impacto de los hietogramas rectangulares (I-D) sobre los diseños de infraestructura de retención. Esto proporcionaría una visión más robusta y precisa de las necesidades de capacidad de los tanques de tormenta en función de lluvias críticas, ayudando a mejorar la gestión de inundaciones en áreas urbanas.

2.4.6.3.- Falta de aplicación sistemática de períodos de retorno en el diseño de tanques de tormenta

Carencia: Aunque los períodos de retorno se consideran en algunos análisis de eventos de lluvia, rara vez se aplican de manera sistemática en combinación con hietogramas rectangulares para optimizar el diseño de tanques de tormenta. Los estudios tienden a centrarse en períodos de retorno promedio, sin una matriz completa de eventos con diferentes combinaciones de intensidad y duración. Muchos estudios se centran en la generación de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a partir de datos pluviométricos a largo plazo, pero no hay suficiente investigación sobre cómo integrar hietogramas rectangulares con períodos de retorno en estas curvas para mejorar la precisión del diseño de tanques de tormenta. Esto es particularmente relevante en regiones donde la frecuencia e intensidad de las lluvias ha cambiado debido al cambio climático, lo que afecta.

Necesidad: Es crucial implementar una metodología que considere diferentes combinaciones de intensidad-duración (I-D) con sus respectivos períodos de retorno en el diseño de los tanques de tormenta. Este enfoque permitiría dimensionar los sistemas de retención con mayor precisión, basándose en eventos de lluvia más críticos y con diferentes probabilidades de ocurrencia.

2.4.7.- Conclusiones:

Las carencias identificadas muestran que, aunque se han realizado avances significativos en la modelación de escorrentía urbana y la caracterización de contaminantes, hay áreas en las que se requieren enfoques más robustos y exhaustivos.

El diseño de tanques de tormenta a partir de series continuas de datos de lluvia a largo plazo ya es una práctica común. Sin embargo, existe una carencia importante en la aplicación de matrices de lluvias críticas que utilicen hietogramas rectangulares aislados (I-D) con sus respectivos períodos de retorno. La falta de este enfoque puede ayudar a evaluar y diseñar adecuadamente los sistemas de retención de escorrentía para eventos extremos.

Una de las principales carencias es la falta de análisis sistemáticos que exploren cómo los hietogramas de eventos extremos pueden integrarse de manera más efectiva en el diseño de tanques de tormenta y sistemas de drenaje urbano. La mayoría de los estudios actuales se centran en datos históricos continuos, lo que no siempre proporciona una representación precisa de los eventos extremos futuros.

Otra carencia importante es que no se han explorado lo suficiente soluciones alternativas como el uso de infraestructura verde (p. ej., techos verdes, jardines de lluvia, pavimentos permeables) que podrían complementar los tanques de tormenta. Todavía existe mucha incertidumbre en su diseño e implementación: costes, ciclo de vida, modelización, etc. (*Garmendia et al.*, 2022).

Mejorar la precisión en la simulación, expandir los contaminantes considerados, integrar nuevas metodologías de caracterización y abordar el impacto a largo plazo del cambio climático y la variabilidad hidrológica son áreas clave que podrían beneficiar

futuras investigaciones. Así como también, investigar métodos alternativos y combinaciones de infraestructura gris y verde para la retención y gestión de escorrentía en áreas urbanas, considerando también los costos de implementación y mantenimiento.



CAPÍTULO 3

Planteamiento

3.- PLANTEAMIENTO

3.1.- OBJETIVO

El desarrollo de este capítulo tiene por finalidad la consecución de los objetivos planteados en el apartado 1.2 de este documento. Fundamentalmente:

- Estudiar el suceso del primer lavado (*"First Flush"* en inglés) para su tipificación y categorización en función de su intensidad buscando variables novedosas como alternativas al uso de "b" obtenido de la regresión lineal como herramienta para aproximar la forma de la curva adimensional $M(V)$ real a una de tipo potencial.
- Obtener polutogramas e hidrogramas asociados que caractericen o reflejen lo mejor posible el fenómeno de la contaminación de la escorrentía superficial urbana estableciendo una metodología de selección y clasificación de los mismos según varios criterios de valoración.
- A partir de la selección anterior, determinar polutogramas de cálculo y sus hidrogramas asociados, evaluando su incidencia sobre la calidad del agua de un medio receptor en concreto: un río.
- Establecer variables y criterios ambientales que permitan evaluar la condición de desfavorabilidad de los sucesos de contaminación.
- Para tres contaminantes específicos ST, DBO_5 y NH_3 , evaluar y comparar su impacto contaminante mediante definición y cálculo de "variables-criterio" bajo distintas posibles situaciones de estado del sistema (Siendo el sistema: Un número de días de tiempo seco previos a un aguacero; cuencas de distinta área, impermeabilidad, y pendiente; y un medio receptor con distinto caudal y concentración inicial). Las "variables-criterio" pueden, por ejemplo, ser representadas por volúmenes de almacenamiento y valores de criterios ambientales tipo Dosis-Tiempo.
- Para los contaminantes mencionados, determinar la influencia y la incidencia prioritaria de las variables del sistema sobre las "variables-criterio".
- Establecer las lluvias más desfavorables definidas a través de su Intensidad "I" y su duración "D" que ocasionen las peores situaciones de contaminación, situaciones representadas por los valores máximos de las "variables-criterio".

3.2.- ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

El objetivo global del desarrollo de la metodología ha obligado al diseño de la siguiente estrategia de investigación:

- Selección de la herramienta matemática o modelo a utilizar en el análisis.
- Definición y descripción del sistema a modelizar.
- Estudio particularizado del sistema por medio de un caso en concreto.

3.3.- SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA MATEMÁTICA O MODELO A UTILIZAR EN EL ANÁLISIS

Desde la década de los 70's ha existido un continuo interés en el desarrollo de modelos de la escorrentía superficial urbana como parte del estudio de los sistemas de drenaje por lo que se han desarrollado y posteriormente perfeccionado muchos modelos que tienen en cuenta nuevos resultados de la investigación en hidráulica e hidrología computacional (*Whipple et al.*, 1983 citados por *Jiménez Gallardo*, 1999).

Existen algunos modelos matemáticos asistidos por ordenador utilizados en el estudio de la escorrentía superficial. Entre ellos se puede citar: DR3M.QUAL, FFC-QUAL, HSPF, ILLUDAS, HYDROCOMP, BATELLE, PTR, TR20, MITCAT, PENN STATE, STATISTICAL, TR55, CAREDAS, MARA, HEC1, HEC2, STORM, MOUSE, SPIDA, SWMM, HYSTEM-EXTRAN, HVQM-QQS, UWMB, etc. (*Jiménez Gallardo*, 1999; *Koustas*, 2000; *Temprano et al.*, 2006; *Del Río Cambeses*, 2011; *Hur et al.*, 2018).

De la serie de modelos que contemplan la simulación de la escorrentía superficial, específicamente, aquella que ocurre en áreas urbanas, el modelo que ofrece las mejores alternativas tanto de cara a su comprensión y simulación es el SWMM (*Stormwater Management Model*) de la U.S.EPA. Este modelo es el más completo en el análisis de sistemas de drenaje, tanto para el estudio de la cantidad como de la calidad de las aguas de escorrentía.

El SWMM es un modelo completo de simulación, de cantidad y de calidad de aguas de escorrentía superficial, desarrollado en principio para cuencas urbanas. El modelo fue desarrollado entre 1969 a 1971 por tres grupos: Metcalf&Eddy, Inc.; la Universidad de Florida, y la Water Resources Engineers, Inc. Originalmente fue diseñado para la evaluación de RAU's reboses de alcantarillado unitario (CSO's, *Combined Sewer Overflows* en inglés) (*Koustas*, 2000; *Niemczynowicz, J.*, 1984 citado por *Elsayed et al.*, 2001; *Rossmann et al.*, 2004; *Del Río Cambeses*, 2011; *Huber y Roesner*, 2012; *Rathnayake y Tanyimboh*, 2012; *Anta et al.*, 2019; *Hossain et al.*, 2019). La versión original ha sido mejorada en repetidas ocasiones.

La utilización del SWMM ha sido y es en la actualidad muy amplia puesto que, al ser un programa completo de planificación y previsión tanto para redes de alcantarillado

unitarias como redes separativas y para cuencas urbanas o rurales, se constituye en el favorito de muchos investigadores. Su difusión por todo el mundo también se ha debido a su costo gratuito y al sinnúmero de publicaciones que se han derivado del uso de este programa (*Rossman et al., 2004; Temprano et al., 2006; Del Río Cambeses, 2011; Anta et al., 2019; Niazi et al., 2017 citados por Behrouz et al., 2020; Madrazo-Uribeetxebarria et al., 2021; Madrazo-Uribeetxebarria et al., 2023*).

En la práctica el modelo permite; además, modificar tanto su entorno de trabajo como, su entrada de datos y su presentación de resultados. Esta modificación es factible puesto que el usuario tiene la posibilidad de cambiar los códigos fuente del programa y compilar de nuevo el mismo y así personalizar su uso y aplicación. En efecto, la ventaja de que el programa se ofrezca a los usuarios juntamente con los códigos fuente del mismo permite inclusive la corrección de errores de pequeña importancia que puedan existir en las versiones del SWMM.

Son éstas las razones por las que el presente estudio se ha basado en la utilización del modelo en cuestión.

3.4.- DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La escorrentía superficial urbana está sujeta a múltiples factores que de una manera u otra influyen tanto en su calidad como en su cantidad. Así pues, entre otros estarían:

a) Factores ligados al entorno físico:

- Variaciones temporales/estacionales del clima.
- I,D,F, (Tr), de la lluvia.
- Fusión de la nieve.
- Velocidad y dirección predominante del viento.
- Número de días secos antecedentes al aguacero.

b) Factores ligados a los hábitos:

- Usos del suelo (áreas impermeables, áreas permeables (tasas de infiltración), erosión).
- Prácticas de control de la escorrentía.
- Prácticas de limpieza (lavado, barrido de superficies, gestión de residuos sólidos).
- En las industrias: variaciones en el tiempo de los ciclos de producción y de la actividad industrial en general.

Como se puede apreciar, son muchos los factores que afectan al proceso de la escorrentía y a su calidad en general. Por tal motivo, como estrategia de estudio, y para poder abordar la problemática en cuestión se ha creído conveniente partir de una serie de simplificaciones que permitan categorizar las variables que intervienen de acuerdo a su importancia e influencia. Esta categorización se irá consolidando a medida que se desarrolle la investigación y se plasme en los apartados siguientes.

No obstante, es necesario metodológicamente a partir de este instante definir de manera global el término SISTEMA que para objeto de la presente investigación se definirá como el conjunto de variables principales que influyen en las características (tanto hidráulicas como de contaminación) de la escorrentía superficial urbana. A su vez, dichas características a la postre se verán reflejadas en los hidrogramas y polutogramas que posteriormente serán evaluados en cuanto a su desfavorabilidad ambiental por el impacto que ocasionan (en este caso particular, a un río).

Así, el SISTEMA queda por tanto constituido por:

- 1) Un número de días de tiempo seco previos a un suceso de lluvia.
- 2) Cuencas urbanas de distinta, área, impermeabilidad, y pendiente; y
- 3) Un medio receptor (río) con distinto caudal y concentración inicial.

A la variable días de tiempo seco (Dts); a las variables de la cuenca (área A , impermeabilidad I , y pendiente P); y a las variables del río (caudal medio $Q_{m_{río}}$ y concentración media $Co_{río}$) a partir de este instante se les denominará "variables-sistema".

Esta investigación se ha centrado en el estudio particularizado del SISTEMA por medio de un caso en concreto dejando como futura línea de investigación el estudio generalizado del mismo por parte del Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.



CAPÍTULO 4

Estudio particularizado del sistema por medio de un caso en concreto

4.- ESTUDIO PARTICULARIZADO DEL SISTEMA POR MEDIO DE UN CASO EN CONCRETO

El desarrollo de la investigación planteó las siguientes tareas a realizar:

- Enunciado del caso en particular sometido a análisis; o lo que es lo mismo, elección de la celda tipo con sus características físicas e hidrológicas necesarias (cuenca urbana ficticia pero representativa).
- Puesta a punto del modelo.
(Modelo seleccionado en el apartado 3.3)
- Estudio previo de polutogramas e hidrogramas y análisis de las principales variables.
- Definición del concepto de polutograma de diseño más desfavorable.
- Establecimiento de criterios de valoración de polutogramas.
- Aplicación de los criterios de valoración.
- Determinación de polutogramas más desfavorables (de diseño).
- Aplicación al caso de vertido a río.

Tareas que encajan en un objetivo más amplio, el cual será, aplicar la metodología así establecida con el fin de generalizarla a cuencas de distintas características (estudio generalizado del sistema).

4.1.- DATOS Y SIMULACION MATEMÁTICA

4.1.1.- Datos generales - Cuenca (30 ha)

A continuación, se detalla las características físicas e hidrológicas de la celda tipo a ser modelizada de acuerdo con lo que demanda el SWMM para la preparación del fichero de datos de entrada del bloque RUNOFF.

La utilización del modelo, por ser tan completo y detallado, implica una laboriosa tarea, empezando con la preparación del fichero de datos de entrada.

La cuenca vertiente elegida tiene las siguientes características:

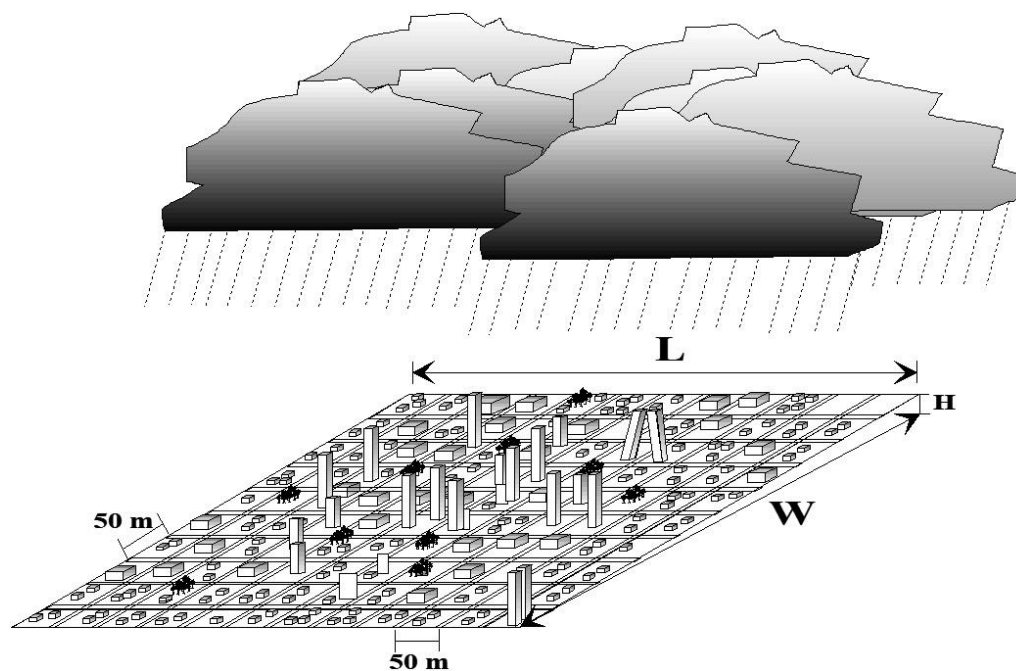


FIG.4.1 Cuenca vertiente seleccionada

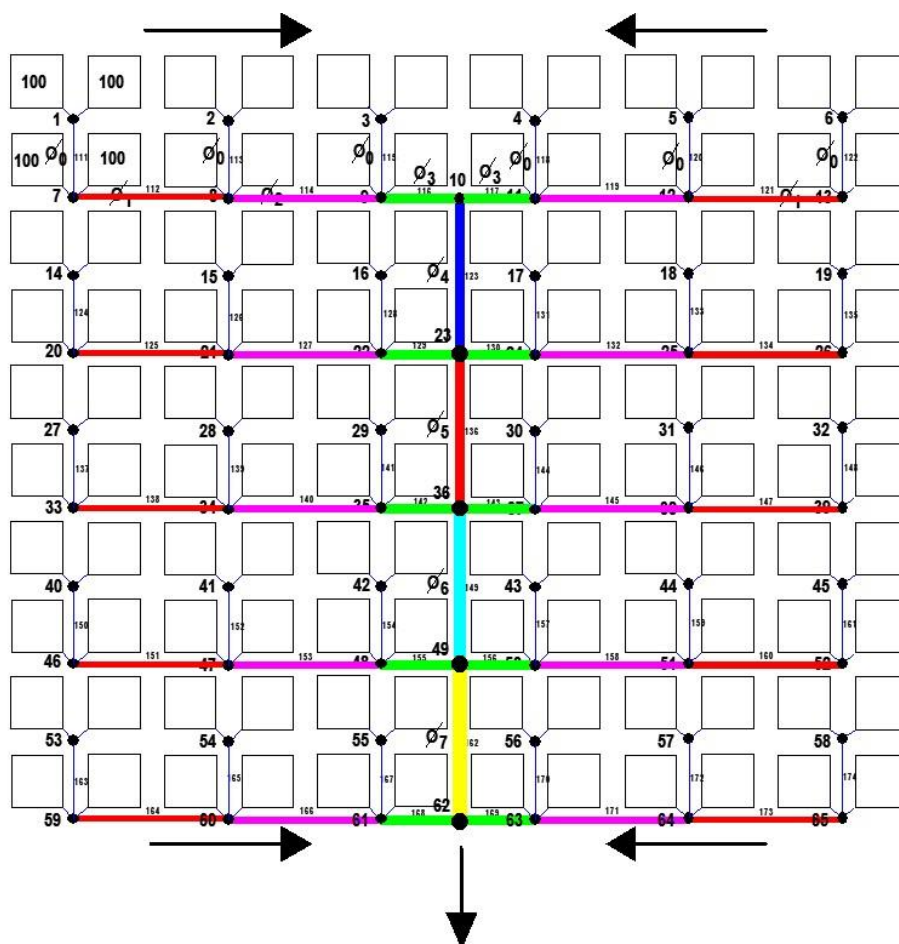


FIG.4.2 Alternativa de red de drenaje para la cuenca vertiente seleccionada

Se ha seleccionado una cuenca urbana que permita, como continuación de la investigación, el análisis de la contaminación de las redes unitarias en tiempo de lluvia por parte del Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.

- Área: $W \times L = 300.000 \text{ m}^2 = 30 \text{ ha} = 74,13 \text{ acres}$

$$W = 600 \text{ m}, L = 500 \text{ m}$$

- Pendiente: $H / L = 0,005 = 0,5 \% = 5 \text{ ‰}$

$$H = 2,5 \text{ m}$$

Por simple referencia y a pesar de no ser necesarias, se describen otras características generales de la cuenca citándolas como no fundamentales para la presente investigación.

- Longitud de calles: Calles cada 50 m en cada sentido.

$$11 \text{ calles} \times 500 \text{ m/calle} = 5.500 \text{ m}$$

$$9 \text{ calles} \times 600 \text{ m/calle} = 5.400 \text{ m}$$

- Longitud de cunetas: 2 cunetas por calle.

$$2 \times 5.500 \text{ m} = 11.000 \text{ m}$$

$$2 \times 5.400 \text{ m} = 10.800 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{total} &= 21.800 \text{ m} = 21,8 \text{ km} = 71.504 \text{ ft} = 715,04 \text{ ft}/100 \text{ ft} \\ &= 13,54 \text{ millas} \end{aligned}$$

- Longitud de tuberías (no fundamental):

Se asume que, en la periferia de la cuenca, a excepción de la arista inferior, las tuberías llegan hasta la mitad de las calles.

$$11 \times (500 - 25) \text{ m} = 5.225 \text{ m}$$

$$9 \times (600 - 50) \text{ m} = 4.950 \text{ m}$$

$$\text{total} = 10.175 \text{ m} = 10,175 \text{ km} = 33.374 \text{ ft}$$

- Uso del suelo: Residencial-Comercial
- Impermeabilidad: 60% (*Jiménez et al.*, 1996; pág.151; *Temprano et al.*, 1998, *Hernández*, 1990; págs.162-163).

Con carácter no fundamental:

Población de Santander: 172.655 hab. [Instituto Nacional de Estadística (INE), 2023].

Área de Santander: Ciudad = $23 \text{ km}^2 = 2.300 \text{ ha}$
 Suburbana = $13 \text{ km}^2 = 1.300 \text{ ha}$
 total: Municipio = $36 \text{ km}^2 = 3.600 \text{ ha}$

Lo que da una densidad poblacional urbana aproximada de 75 hab./ha. Sin embargo, se toma un valor superior:

- Densidad poblacional (no fundamental): 100 hab./ha (Suárez López, 1994; pág.C9-13, Jiménez *et al.*, 1996; pág.151; Temprano *et al.*, 1996; pág.906; Temprano *et al.*, 2006; pág.56).
- Población (no fundamental): $30 \text{ ha} \times 100 \text{ hab./ha} = 3.000 \text{ hab.}$
- Dotación (no fundamental): 250 L/hab.día (para cuenca urbana Residencial-Comercial) (Jiménez *et al.*, 1996; pág.151; Temprano *et al.*, 1996; pág.906).
- Caudal de aguas residuales (no fundamental):

$$3.000 \text{ hab.} \times 250 \text{ L/hab.día} = 75.0000 \text{ L/día} = 0,00868 \text{ m}^3/\text{s} \\ = 0,306316 \text{ cfs}$$

4.1.2.- Datos caso particular - Cuenca (1 ha)

Para el caso particular se ha elegido una cuenca urbana representativa de ciudades como Santander (España) de 1 hectárea de superficie definida por una celda de 100 m por 100 m. Para esta cuenca se asumió una impermeabilidad del 60% y una pendiente del 0,5%.

Se utilizó el programa U.S. EPA SWMM 5.2.4 para obtener hidrogramas y polutogramas. Con este modelo se ajustó el coeficiente de rugosidad de Manning “n” para áreas impermeables de manera que el caudal máximo del hidrograma (en ausencia de evaporación, infiltración y almacenamiento en depresión) coincidiera aproximadamente con el obtenido por el método racional (asumiendo que el porcentaje de impermeabilidad es aproximadamente igual al coeficiente de escorrentía “C”). Se obtuvo un valor de n igual a 0,00479. Para la zona permeable se utilizó un valor de 0,4 (Temprano *et al.*, 2006; pág.59).

Para estimar el almacenamiento en depresiones en el área impermeable, se utilizó la fórmula detallada en Huber y Dickinson, 1992, obteniendo un valor de 1,080889 mm (0,042554 in) a partir de una pendiente de 0,5%. Para la zona permeable se asumió un valor de 6,35 mm (0,25 in) (Huber y Dickinson, 1992; pág.103).

Para el cálculo de la infiltración se utilizó el modelo de Horton para un suelo arcilloso predominante en Santander con una tasa máxima de 36 mm/h (1,4713 in/h), una tasa

mínima de 3,84 mm/h (0,1512 in/h) y con una constante de decaimiento igual a $0,00116 \text{ s}^{-1}$; valores tomados de *Monte y Marco, 1992*.

El mes de simulación fue agosto y la evaporación se simuló eligiendo un valor arbitrario de 3,75 mm/día = 0,148 in/día (un aumento del 25% sobre el valor predeterminado del SWMM) aunque tiene poca influencia en eventos discretos. Su influencia es mayor en la simulación continua (*Huber y Dickinson, 1992*).

4.1.3.- Curvas de acumulación y lavado de contaminantes

Se eligió una curva de acumulación de DD (polvo y suciedad) de tipo exponencial y dependiente de la longitud de los bordillos en la cuenca:

$$MaxDD = Max.Buildup \cdot Curb\ length \quad [C4-1]$$

Max.Buildup: Factor limitante de acumulación (kg/km) de DD (polvo y suciedad).

Curb length: Longitud de bordillo (km).

$$DD = MaxDD \cdot (1 - e^{-Rate\ Constant \cdot ADD}) \quad [C4-2]$$

MaxDD: Máxima acumulación (kg) de polvo y suciedad en la cuenca urbana.

ADD: Días de tiempo seco previos (días).

Rate Constant: Tasa constante, coeficiente arbitrario (día^{-1})

DD: Acumulación (kg) de polvo y suciedad durante el tiempo ADD.

Para una cuenca similar a una tipo residencial-comercial (*Huber y Dickinson, 1992*), se supuso: Max.Buildup = 197,65 kg/km (13,257 lb/100 ft). Tasa Constante = 1 día^{-1} .

Adicionalmente, para la cuenca ficticia simulada se supuso: Longitud de bordillo = 0,7267 km (23,83467 ft/100 ft).

Resumiendo:

$$DD = 143,626 \cdot (1 - e^{-ADD}) \quad [C4-3]$$

La curva de acumulación asumida presenta una asíntota a los 10 días, por lo que se decidió tomar el valor de ADD = 7 días (> 90% de acumulación) para todas las simulaciones resultando así un valor de DD₇ igual a 143,495 kg.

Se simularon los siguientes contaminantes como fracción de DD: Demanda bioquímica/biológica de oxígeno a los 5 días DBO₅, en inglés BOD₅ = 5,03/1000 de DD, Sólidos totales ST, en inglés TS = 1000/1000 de DD, Nitrógeno total NT, en inglés, TN = 0,48/1000 de DD. Las fracciones utilizadas son citadas por *Huber y Dickinson, 1992*, tabla 4-19 pp. 145 en donde los valores medios asumidos

corresponden al mayor número de experiencias realizadas. Para simular cualquier otro contaminante específico, simplemente se debe multiplicar su fracción por el valor correspondiente de polvo y suciedad DD acumulado.

Para el lavado de contaminantes se utilizó en el programa SWMM una función exponencial con un valor de Coefficient = 2 y un valor de Exponent = 0,84. Estos valores de obtuvieron al realizar pruebas con el modelo y ajustar el % de eliminación de DD aproximadamente a los citados por *Lazaro, 1990*, tabla 3-4 pp.48. Para ello se asumió como hipótesis que la duración de la escorrentía se aproximaba a la duración de la lluvia (válido cuanto menor sea la cuenca modelada) y que la intensidad de escorrentía era similar a la intensidad de la lluvia afectada por el coeficiente C del método racional. Una vez aceptados estos supuestos y en ausencia de evaporación, infiltración y almacenamiento en depresiones, se utilizó las intensidades y duraciones de lluvia así estimadas, para obtener mediante el modelo (SWMM) los porcentajes de eliminación que se sugieren en la tabla mencionada ajustando los valores de la función exponencial de lavado.

No se simuló presencia de nieve en la cuenca ni su fusión. Tampoco se simuló contaminación del agua de lluvia, ni se consideró eliminación de suciedad por barrido de calles. No se simuló erosión (en cuencas urbanas el porcentaje de suelo susceptible de ser erosionado es bajo y será aún menor a medida que el grado de urbanización aumente). Así pues; utilizar el término de tormenta en el ámbito de este estudio es incorrecto puesto que las lluvias analizadas carecen de fenómenos asociados a las mismas tales como: hielo, granizo, electricidad, nieve o vientos fuertes.

4.1.4.- Matriz de lluvias

Las lluvias pueden ser representadas por su intensidad media y su duración. En este estudio la precipitación se introdujo a través de un hietograma de diseño rectangular al que le corresponde una intensidad I y una duración D. Para la calibración de la función de lavado se utilizaron un conjunto de lluvias I-D. Se seleccionó un rango de valores en el que, la combinación [altas intensidades-cortas duraciones] y [bajas intensidades-largas duraciones] cause un % de eliminación de DD igual o mayor al 90%. En este estudio los rangos fueron: Intensidades de lluvia: de 0 a 300 mm/h. Duraciones de lluvia: de 0 a 300 min. Una vez seleccionados los rangos respectivos, se procede a discretizarlos para constituir una matriz donde los elementos de esta sean lluvias de distinta intensidad y duración. En esta investigación se seleccionó la siguiente matriz:

Como filas, a las siguientes intensidades (mm/h): 0, 1, 3, 5, 7, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 300. Como columnas, a las siguientes duraciones (min): 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 50, 80, 120, 180, 240, 300. La discretización del rango de intensidades tiene un menor peso que la discretización del rango de las duraciones, puesto que el porcentaje de eliminación de DD, crece de manera exponencial con la duración.

Una adecuada selección de lluvias (eventos de diseño) que constituirán la matriz de precipitaciones, recogerá prácticamente todas las opciones que pueden constituir un

patrón temporal de sucesión de precipitaciones discutido por *Clar et al.*, 2004 citado por *Andrés-Doménech*, 2010.

4.1.5.- Simulación y obtención de hidrogramas y polutogramas

Con la matriz de intensidades-duraciones fija, aplicando el modelo SWMM 5.2.4 (Tools/Console mode, *Yang and Chui*, 2018) se procedió a simular cada una de las lluvias mediante la lectura de un fichero de datos externo que contenía los hietogramas comentados, obteniendo de esta manera los datos necesarios para continuar con el análisis. Se utilizó siempre 360 min como tiempo de simulación y 1 min como paso de tiempo en la misma. El modelo de enrutamiento fue el de onda cinemática obteniéndose los mismos resultados que con la onda dinámica. Puesto que la hipótesis simulada es muy simple bastó con utilizar la onda cinemática. Con cada lluvia simulada se obtuvo un reporte por objeto en forma de tabla para cada tiempo de paso de simulación con los resultados del caudal de escorrentía y concentraciones respectivas de los contaminantes. Como duración efectiva de cada evento se tomó la duración de la escorrentía hasta el momento en que el caudal de escorrentía se convierte en cero, recortando los valores del hidrograma y los polutogramas con esa duración. Esto es muy importante puesto que influye en el cálculo de las concentraciones medias ponderadas de los contaminantes simulados como se explicará posteriormente. La concentración media ponderada se denomina en inglés EMC “*Event Mean Concentration*”.

4.1.5.1.- Fichero de datos de entrada SWMM

Con todos los datos anteriores se preparó el fichero de datos de entrada siguiendo las instrucciones y ejemplos que se detallan en la página Web de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) sobre el Software Storm Water Management Model (SWMM). Toda la información necesaria se encuentra en esta página Web:

<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

En esta página, además de poder descargar el propio programa actualizado e incluso sus códigos fuente “*Source Code*”, se puede acceder en la pestaña de Manuales y Guías “*Manuals and Guides*” también al Manual de usuario del programa:

<https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf>

En la misma pestaña también se tiene acceso a un Manual de aplicaciones del programa SWMM.

https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-05/epaswmm5_apps_manual.zip

El objetivo de este Manual de aplicaciones es servir como guía de aplicación práctica para los usuarios de SWMM que ya hayan recibido formación previa en hidrología e hidráulica. Contiene nueve ejemplos prácticos que ilustran cómo se puede utilizar SWMM para modelar algunos de los tipos más comunes de problemas de diseño y gestión de aguas pluviales que se encuentran en la práctica.

Haciendo uso de toda esta información y siguiendo los ejemplos detallados se preparó el fichero de datos de entrada. Existen dos opciones para introducir los datos de lluvia para la simulación:

- 1) Detallando la lluvia a simular desde el propio fichero de datos de entrada.
- 2) Detallando la lluvia a simular con la ayuda de un fichero adicional. La lectura de los datos de la lluvia se hace desde el fichero de datos de entrada mediante una “llamada” al fichero adicional.

En el Anexo A4.1 EJEMPLO DE FICHERO DE DATOS se pueden encontrar el detalle de los contenidos de los ficheros correspondientes a ambos casos.

4.1.5.2.- Fichero de salida SWMM

Utilizando el fichero de datos de entrada para la simulación del SWMM se puede ejecutar el programa de dos maneras. Desde la propia aplicación informática SWMM 5.2.4 instalada en el ordenador en la plataforma de Windows o mediante el uso del programa ejecutable “runswmm.exe” que viene dentro del paquete del programa al instalarlo. El fichero ejecutable es un archivo informático que contiene instrucciones (en código fuente compilado) que se pueden ejecutar directamente por el sistema operativo (en este caso, MS-DOS) o por otro programa (por ejemplo: una llamada desde un fichero tipo “batch”).

En esta investigación se ha utilizado la segunda opción por su mayor rapidez para procesar los resultados.

En el Anexo A4.2 EJEMPLO DE RESULTADOS se pueden encontrar el detalle de los contenidos de los ficheros de salida correspondientes a ambos casos detallados en el apartado anterior.

4.1.5.3.- Ficheros necesarios para la simulación

- a) En el Anexo A4.3 DATOS DE LLUVIA EN FICHERO CASE1622.INP se pueden encontrar los ficheros necesarios para la simulación con los datos de lluvia en el fichero de datos de entrada.

En la carpeta de este Anexo se encuentran los siguientes ficheros:

Case1622 (leer).txt (Con instrucciones para ejecutar la simulación).

Case1622.inp (Fichero de entrada de datos).

runswmm.exe (Fichero SWMM 5.2.4 ejecutable código fuente compilado).

swmm5.dll (Biblioteca de SWMM 5.2.4 que requiere el fichero anterior para ejecutarse).

Simula.bat (Fichero tipo “batch” que ejecuta la simulación con los datos del fichero .inp).

Case1622.rpt (Fichero de salida al ejecutar la simulación).

El fichero Case1622.inp es el fichero que contiene los datos de entrada.

La lluvia simulada para el Caso N°1622 es la lluvia I140D4 que se encuentra detallada en la línea [RAINGAGES] TIMESERIES en el fichero .inp

Mediante el fichero "batch" Simula.bat se ejecuta el fichero runswmm.exe (que requiere la presencia en el mismo directorio del fichero swmm5.dll) dando lugar al fichero de salida Case1622.rpt (nombre especificado en el fichero Simula.bat).

El fichero Case1622.rpt contiene los resultados de la simulación.

- b) En el Anexo A4.4 DATOS DE LLUVIA EN FICHERO RAINS.DAT se pueden encontrar los ficheros necesarios para la simulación con lectura de datos de lluvia desde el fichero de datos de entrada mediante una "llamada" a fichero adicional.

En la carpeta de este Anexo se encuentran los siguientes ficheros:

Case1622 (leer).txt (Con instrucciones para ejecutar la simulación).
Case1622.inp (Fichero de entrada de datos).
Rains.dat (Fichero adicional con los datos de lluvia).
runswmm.exe (Fichero SWMM 5.2.4 ejecutable código fuente compilado).
swmm5.dll (Biblioteca de SWMM 5.2.4 que requiere el fichero anterior para ejecutarse).
Simula.bat (Fichero tipo "batch" que ejecuta la simulación con los datos del fichero .inp).
Case1622.rpt (Fichero de salida al ejecutar la simulación).

El fichero Case1622.inp es el fichero que contiene los datos de entrada.

La lluvia simulada para el Caso N°1622 es la lluvia I140D4 que se lee desde el fichero Rains.dat mediante la línea [RAINGAGES] en el fichero .inp

Mediante el fichero "batch" Simula.bat se ejecuta el fichero runswmm.exe (que requiere la presencia en el mismo directorio del fichero swmm5.dll) dando lugar al fichero de salida Case1622.rpt (nombre especificado en el fichero Simula.bat).

El fichero Case1622.rpt contiene los resultados de la simulación.

4.1.5.4.- Hidrogramas y polutogramas obtenidos en la simulación de todos los eventos de la matriz de lluvias elegida

Mediante la metodología descrita anteriormente se realiza la simulación de todos los eventos de lluvia descritos en el apartado 4.1.4.- Matriz de lluvias, obteniendo para cada caso su fichero de salida .rpt con los datos de los hidrogramas y polutogramas respectivos.

Por facilidad y ayuda para cálculos posteriores, todos los resultados de cada simulación se han extraído de los ficheros .rpt y llevados a hojas de cálculo. En el Anexo A4.5

4.2.- ANÁLISIS TEÓRICO DE POLUTOGRAMAS DE ESCORRENTÍA URBANA. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN E IMPACTO

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
ADD	Días de tiempo seco previos (días)
BOD₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (mg/L)
C	Coeficiente de escorrentía del método racional
C	Concentración (mg/L)
CA	Análisis de conglomerados
Cd	Concentración (mg/L) de vertido de agua de escorrentía
Cfp	Concentración (mg/L) a la que ocurre el Fp
Ci	Concentración (mg/L) al tiempo i
Clast	Última concentración (mg/L)
Cm	Concentración media (mg/L)
Cp	Concentración punta (mg/L)
C(t)	Variación de la concentración C en función del tiempo t dando lugar al polutograma
Cr	Concentración (mg/L) en el río en el punto de mezcla
Cr_{Fm}	Concentración (mg/L) en el río en el punto de mezcla debido al vertido de Fm y Qmean
Cr_{Fp}	Concentración (mg/L) en el río en el punto de mezcla debido al vertido de Fp y Qfp
Cro	Concentración inicial (mg/L) en el río
D	Duración de lluvia (min)
DBO₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (mg/L)
DD	Acumulación (kg) de polvo y suciedad durante el tiempo ADD
DD₇	Acumulación de polvo y suciedad (kg) durante 7 días
Dif.P90Vstorage	Valor absoluto (m ³ /ha imp) de la diferencia entre Vstorage y P90
EDAR	Estación depuradora de agua residual
EMC	Concentración media ponderada (mg/L)
F	Frecuencia asociada al período de retorno de una lluvia de una intensidad "I" y una duración "D"
F	Flujo másico (kg/min)
Fd	Flujo másico (mg/s) de agua de escorrentía
Fi	Flujo másico (kg/min) al tiempo i
Fm	Flujo medio (kg/min)
Fp	Flujo punta (kg/min)
Fro	Flujo másico inicial (mg/s) en el río
ha imp	Hectárea impermeable
I	Intensidad de lluvia (mm/h)
I-D	Intensidad, duración
IDF	Intensidad, duración, frecuencia
IEV	Variable de evaluación de impacto
iev	Valor de la variable de evaluación de impacto IEV

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
I, D	Valor de la variable de evaluación de impacto IEV para una intensidad “I” y una duración “D” de la matriz de lluvias
$\widehat{iev}$	
Kj	Coefficiente de ponderación (“peso” o importancia) de cada variable de caracterización elegida
MaxDD	Máxima acumulación (kg) de polvo y suciedad en la cuenca urbana
Mt	Carga total de contaminante de la escorrentía (kg)
Mt/DD ₇ (%)	Porcentaje (%) de carga total de contaminante de la escorrentía con respecto a la acumulación de polvo y suciedad durante 7 días
(maxVAR) _j	Valor máximo de la variable de caracterización seleccionada, de toda la matriz de lluvias elegida
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
NT	Nitrógeno total (mg/L)
P	Precipitación (mm)
P90	Percentil 90
PC1	Primer componente principal
PC2	Segundo componente principal
PC3	Tercer componente principal
PCA	Análisis de componentes principales
P(t)	Variación de la precipitación P en función del tiempo t
Q	Caudal (L/s)
Qd	Caudal de vertido (L/s) de agua de escorrentía
Qdw	Caudal medio (L/s/ha) de tiempo seco
Qfp	Caudal (L/s) al que ocurre el Fp
Qi	Caudal (L/s) al tiempo i
Qmax	Caudal máximo (L/s)
Qmean	Caudal medio (L/s)
Qro	Caudal inicial (L/s) del río
Q(t)	Variación del caudal Q en función del tiempo t dando lugar al hidrograma
Q _{WWTP}	Caudal (L/s) de agua de escorrentía que se admite a tratamiento en la EDAR
R	Coefficiente de correlación
R ²	Coefficiente de determinación
RVF	Fracción (%) de volumen retenido de Vstso
ST	Sólidos totales (mg/L)
SST	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
T	Número de variables de caracterización elegidas para hallar la variable IEV
Tclast	Tiempo (min) al que ocurre la Clast
Tcp	Tiempo (min) al que ocurre la Cp
Tfp	Tiempo (min) al que ocurre el Fp
TN	Nitrógeno total (mg/L)
Tqmax	Tiempo (min) al que ocurre el Qmax
Tr	Período de retorno (años)
Tr _{ssd}	Periodo de retorno de diseño de alcantarillado pluvial (años)
TS	Sólidos totales (mg/L)

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
TSS	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Tt	Duración de la escorrentía (min)
VAR_j	Cualquier variable de caracterización de los polutogramas
$\overbrace{VAR_j}^{I,D}$	Valor de la variable de caracterización “j” para una intensidad “I” y una duración “D” de la matriz de lluvias
Vloss	Volumen de pérdidas (m ³)
Vrain	Volumen de precipitación (m ³)
Vstorage	Volumen (m ³ /ha imp) del depósito de almacenamiento del rebose de alcantarillado pluvial
Vstso	Rebose de alcantarillado pluvial (m ³ /ha imp)
Vt	Volumen total de escorrentía (m ³)
WWTP	Estación depuradora de agua residual

4.2.1.- Resumen

En este apartado se utiliza el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM, por sus siglas en inglés) para generar hidrogramas y polutogramas de escorrentía de una cuenca urbana ficticia de una hectárea. Se simulan tres contaminantes [Sólidos Totales (ST), Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅) y Nitrógeno Total (NT)] para un conjunto de lluvias determinado, analizando los valores tomados por las variables de caracterización de los polutogramas obtenidos de la escorrentía de cada uno de ellos.

Se analizan los coeficientes de correlación y determinación que existen entre las diferentes variables, a la vez que se realiza una caracterización multivariante utilizando análisis de componentes principales (PCA, en inglés, “*Principal Component Analysis*”) y análisis de conglomerados (CA, en inglés “*Cluster Analysis*”). Utilizando las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) de la ciudad de Santander, se asigna una probabilidad de ocurrencia (Tr) a los valores tomados por estas variables de caracterización.

Para evaluar el impacto e identificar los polutogramas más desfavorables dentro del conjunto de lluvias seleccionadas, se establecen variables de evaluación de impacto IEV's (*Impact Evaluation Variable* en inglés), conformadas con la evaluación de diferentes variables de caracterización. Además, se establecen IEV's adicionales simulando la descarga a un medio receptor de agua (río con concentración inicial y caudal constante).

Finalmente, se simula un desbordamiento del sistema de alcantarillado pluvial, derivando un caudal máximo para la purificación a EDAR), dimensionando así tanques de tormenta para diferentes fracciones del volumen total de escorrentía retenido y controlando los valores máximos de una IEV específica. Tomando un periodo de retorno de diseño $Tr_{ssd} \geq 10$ años, los resultados obtenidos con la metodología propuesta fueron de 146,50 m³/ha imp para una retención del 100% del volumen total de escorrentía y de 117,20 m³/ha imp para una retención del 80%.

4.2.2.- Introducción

El problema de la contaminación por escorrentía urbana ha sido estudiado extensamente durante las últimas dos décadas, aún más cuando el cambio climático global ha causado en muchos casos un aumento en los posibles impactos que la escorrentía puede causar.

Las actividades antropogénicas alteran las condiciones naturales de las cuencas. El porcentaje de urbanización afecta fundamentalmente la existencia de vegetación natural y el grado de impermeabilización de las superficies. En tiempo de lluvias, esta modificación afecta los flujos superficiales causando alteraciones en los hidrogramas con aumentos en sus valores pico y, en consecuencia, causando mayores tasas de flujo, mayores concentraciones de descargas a cuerpos receptores de agua y elevación de las masas de contaminantes movilizadas. Por lo tanto, la alteración del régimen hidrológico y la presencia de contaminantes terminan afectando a los organismos de los ambientes acuáticos y alteran el carácter de los ecosistemas (*Rodríguez Hernández et al.*, 2013; *Andrés-Doménech et al.*, 2018; *Reoyo-Prats et al.*, 2017; *Perales Momparler et al.*, 2017; *Wang et al.*, 2017; *Del Río Cambeses*, 2011; *Suárez et al.*, 2008).

Existen muchos estudios sobre la caracterización de la escorrentía urbana en todo el mundo. Sin embargo, la presencia de sus contaminantes y sus valores es muy heterogénea debido a los múltiples factores que pueden influir en la formación de la escorrentía urbana y su propia composición. Esto, por lo tanto, hace problemática su cuantificación y fundamentalmente su estimación en cuanto a su calidad. A nivel de campo, llevar a cabo campañas de muestreo de escorrentía y su calidad demanda un gran esfuerzo debido a la infraestructura (materiales, equipos, laboratorio, etc.) y recursos humanos que se requieren, y que a veces implica tiempo y altos costos (*Freni et al.*, 2009a; *Sun y Bertrand-Krajewski*, 2012). Se añade el hecho de que es necesario caracterizar no solo un punto de la descarga de la cuenca analizada, sino también múltiples puntos para obtener valores representativos. Así, como complemento y/o alternativa a esto, se utiliza la modelación matemática.

La escorrentía es un fenómeno hidrológico e hidráulico cuya estimación y representación, a pesar de ser compleja, se estudia y modela satisfactoriamente resultando en una representación gráfica en forma de hidrograma (variación en el tiempo de las tasas de flujo o escorrentía laminar) (*Dotto et al.*, 2011). Sin embargo, estimar las concentraciones de los diferentes contaminantes que acompañan estos flujos es un problema más complejo. La calidad del agua de escorrentía y su variación en función del tiempo se puede estimar con diferentes modelos; por ejemplo, con ecuaciones de lavado de contaminantes que se han acumulado previamente (curvas de acumulación) en los días de tiempo seco antes de la ocurrencia de la escorrentía generada por la lluvia (*Andrés-Doménech et al.*, 2018; *Freni et al.*, 2009b). La variación de las tasas de flujo de masa de contaminantes durante tormentas en los sistemas de alcantarillado se describe mediante dos curvas: hidrograma $Q(t)$ y polutograma $C(t)$ para cada contaminante considerado, donde Q es la tasa de flujo (L/s) y C es la concentración (mg/L). Para una cuenca, estas dos curvas varían de un evento de lluvia a otro, dependiendo de varios parámetros: el hietograma que proporciona la variación de la precipitación $P(t)$, el período de tiempo seco y la lluvia, la condición

del sistema de alcantarillado, la cantidad de contaminante depositado, la masa acumulada de contaminantes sobre la cuenca, las características de la cuenca y el sistema de alcantarillado, etc. (Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998).

El uso generalizado del programa SWMM en todo el mundo por científicos e investigadores para la simulación de escorrentía en cuencas urbanas lo convierte en una herramienta ideal para obtener los hidrogramas y polutogramas discutidos anteriormente, caracterizando cuantitativa y cualitativamente los eventos de contaminación que producen las lluvias. El SWMM permite la simulación de flujos y cargas contaminantes de la escorrentía urbana, así como su transporte a través de la red de drenaje (Temprano *et al.*, 2006).

Para una cuenca urbana específica, el objetivo principal de la presente investigación en este apartado 4.2. es estudiar la forma y el comportamiento de los hidrogramas y polutogramas obtenidos de la simulación con el SWMM, identificando sus variables de caracterización. La combinación de estas variables de caracterización permite la definición adicional de variables de evaluación de impacto para encontrar los eventos de contaminación más desfavorables teniendo en cuenta varios escenarios posibles: un cuerpo receptor de agua y un desbordamiento de alcantarillado pluvial acompañado de almacenamiento en tanques de tormenta.

4.2.3.- Metodología

Para el caso particular descrito en el apartado 4.1.2 y con los hidrogramas y polutogramas obtenidos en el apartado 4.1.5.4 se procede a la definición de variables que permitan la caracterización de los polutogramas y el estudio de su impacto.

En este punto, es conveniente definir qué se entiende por hidrograma y polutogramas.

Hidrograma: Es la variación del caudal en el tiempo durante la duración de la escorrentía ($[L^3/T] - T$).

Polutograma: por una parte, es:

a) La variación de la concentración de un contaminante a lo largo del tiempo que dura la escorrentía ($[M/L^3] - T$)

y por otra es:

b) La variación de la masa de un contaminante a lo largo del tiempo que dura la escorrentía ($M/T - T$).

Para diferenciar a los dos polutogramas, a partir de este punto, a la segunda variación se le denominará a partir de este punto flujo másico (*mass flow rate* en inglés).

El SWMM no reporta valores de flujo másico, por lo que los valores obtenidos en el SWMM se trasladaron a una hoja de cálculo para calcular y representar mejor los hidrogramas y polutogramas mencionados. Para obtener los valores del flujo másico se utilizó la siguiente fórmula:

$$F_i = Q_i \cdot C_i$$

[C4-4]

F_i : Flujo másico (kg/min) al tiempo i

Q_i : Caudal (L/s) al tiempo i

C_i : Concentración (mg/L) al tiempo i

4.2.3.1.- Identificación de variables de caracterización de hidrogramas y polutogramas

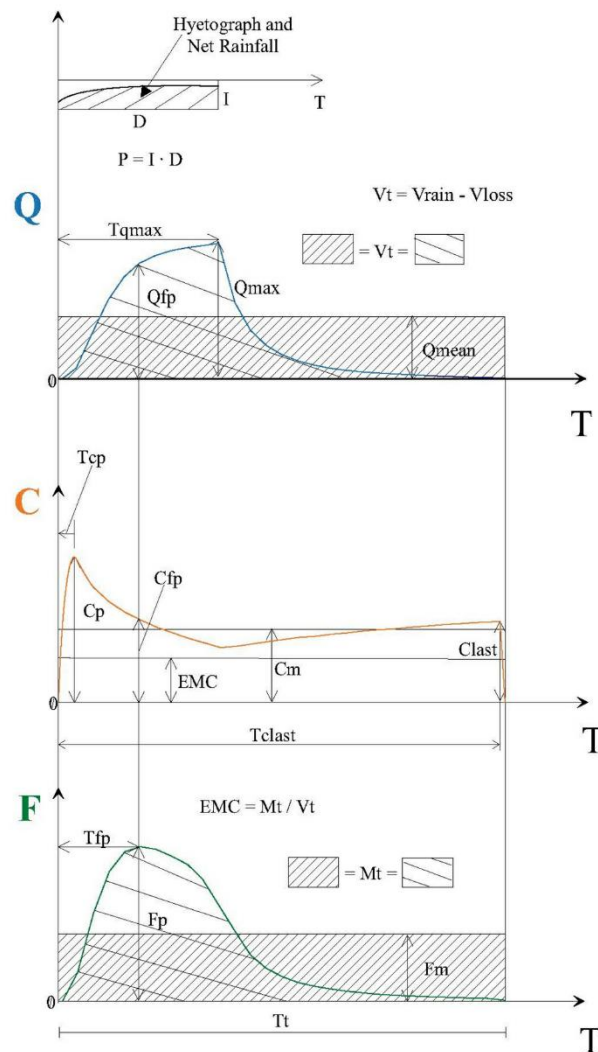


FIG.4.3 Variables de caracterización de hidrograma y polutogramas

Para cada lluvia simulada se procedió a identificar las variables de caracterización que se detallan en la FIG.4.3: I , D , P , V_{rain} , V_{loss} , V_t , Q_{fp} , Q_{max} , Q_{mean} , C_p , C_{fp} , C_{last} , C_m , EMC , M_t , F_p , F_m , T_{cp} , T_{fp} , T_{qmax} , T_{clast} , T_t (Consultar lista de Abreviaturas).

Donde:

$$EMC = \frac{Mt}{Vt} = \frac{\int_0^{Tt} C(t) \cdot Q(t) dt}{\int_0^{Tt} Q(t) dt} \quad [C4-5]$$

y, además:

$$Q_{mean} = \frac{Vt}{Tt} \quad [C4-6]$$

$$Fm = \frac{Mt}{Tt} = EMC \cdot Q_{mean} \quad [C4-7]$$

$$Fp = Cfp \cdot Qfp \quad [C4-8]$$

4.2.3.2.- Ejemplos de gráficos característicos de hidrograma y polutogramas

Para calcular todas las variables de caracterización descritas, se exportó los datos del hidrograma y polutograma que se obtienen de la simulación con el SWMM a un libro Excel como herramienta auxiliar de simulación. Dicho libro se encuentra en el Anexo A4.6 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.

De la matriz de lluvias, se toma a manera de ejemplo la lluvia con $I = 140$ mm/h, $D = 4$ min para presentar gráficos de caracterización del suceso de contaminación.

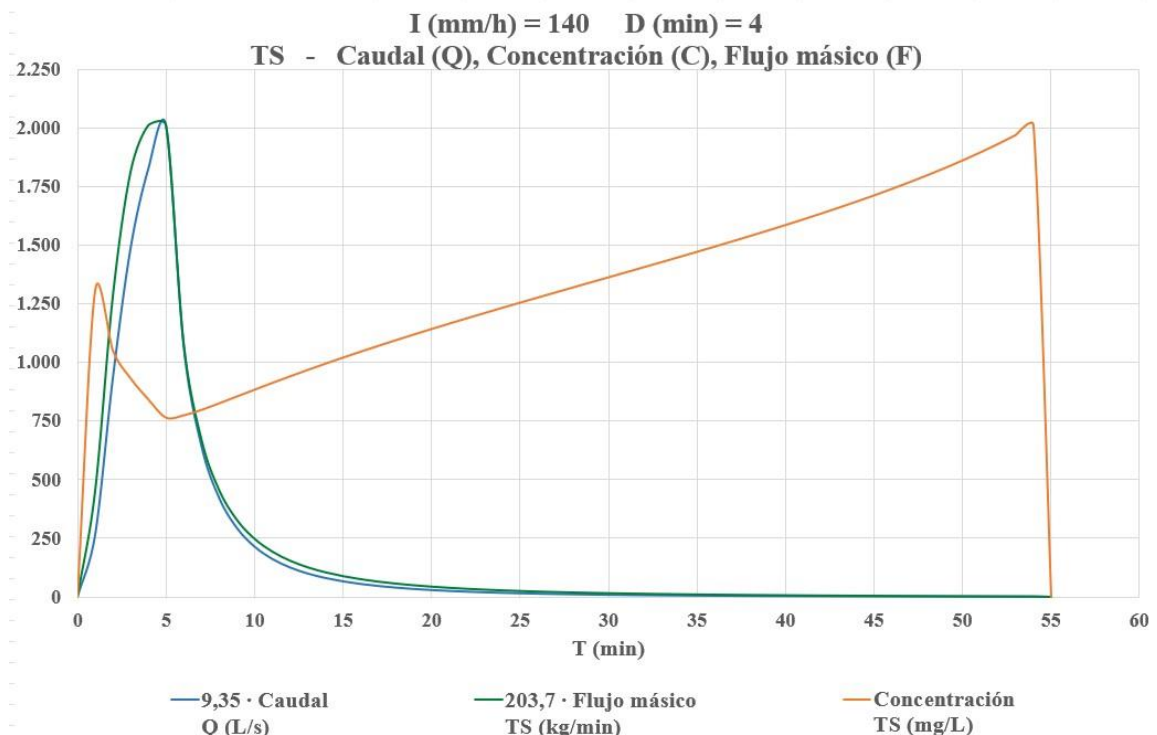
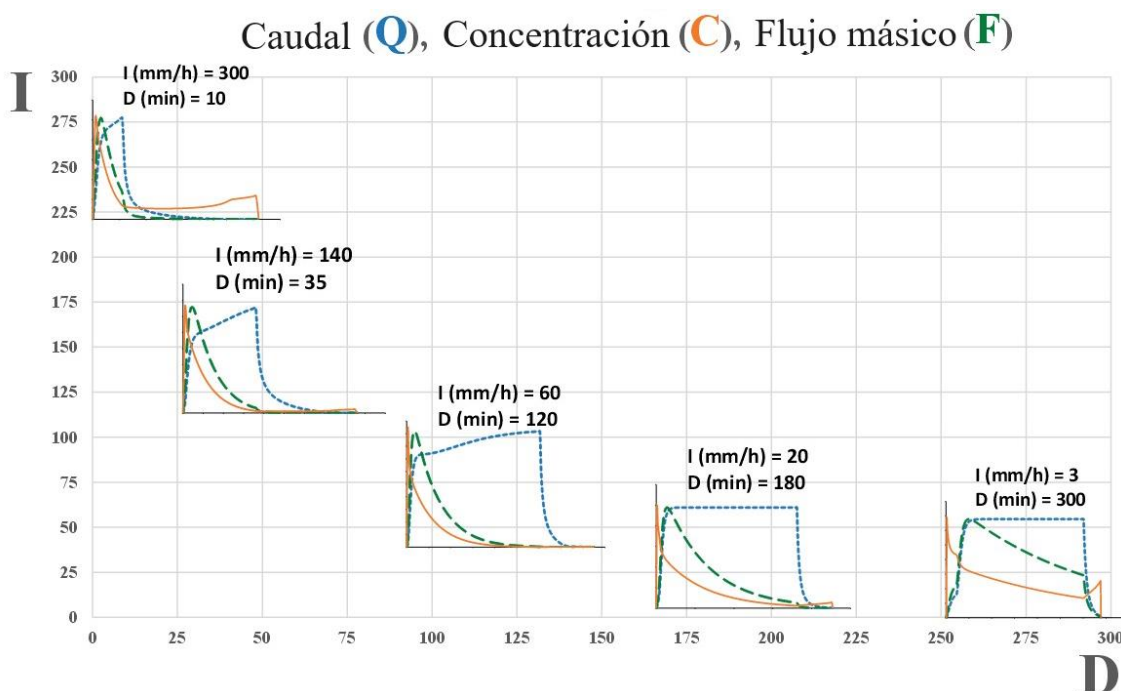


FIG.4.4 Hidrograma y polutogramas (Contaminante TS)
obtenidos para la lluvia $I = 140$ mm/h, $D = 4$ min

Algunos ejemplos adicionales de los polutogramas que se obtienen dentro de la matriz de lluvias elegida se pueden apreciar en la FIG.4.5 donde se han normalizado sus ejes de ordenadas al máximo valor de cada polutograma (ver FIG.4.4).



4.2.4.- Resultados y discusión

4.2.4.1.- Valores resultantes de las variables para cada contaminante simulado

Realizadas las simulaciones con el SWMM 5.2.4 se obtuvieron valores de las variables de caracterización de los polutogramas para los tres contaminantes simulados ST, DBO₅, NT (TS, BOD₅, TN, en inglés), observando el siguiente comportamiento:

Variables independientes del tipo de contaminante: I, D, P, Qmean, Qmax, Qfp, Vrain, Vt, Vloss, Tqmax, Tt. El comportamiento de estas variables es independiente del tipo de contaminante.

Variables con valores iguales para cada tipo de contaminante: Tcp, Tclast, Tfp. Estas variables presentan valores iguales para los tres contaminantes simulados.

Variables cuyos valores se pueden expresar como una fracción de TS: Cp, Clast, Cm, EMC, Cfp, Fp, Fm, Mt. Si se conocen los valores de estas variables para TS, se pueden hallar para BOD₅ = 5,03/1000 de TS, y TN = 0,48/1000 de TS o cualquier otro contaminante. *Temprano et al., 2006* citan por ejemplo TSS = 200/1000 de TS.

4.2.4.2.- Valores de las variables de caracterización para cada I-D de la matriz de lluvias elegida y gráficos de contorno

En el Anexo A4.7 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE POLUTOGRAMAS PARA EL CONTAMINANTE TS se pueden observar todos los

valores de las variables de caracterización que se obtienen de las simulaciones de las lluvias seleccionadas. En dicho Anexo también se han detallado para cada una de ellas, los valores de su: media aritmética, máximo, mínimo, desviación estándar, coeficiente de variación (%) y P90.

Tomando Qmean y EMC como los únicos dos ejemplos (de 20 posibles), los valores obtenidos de las variables para la matriz de lluvias elegida se pueden representar de la siguiente manera:

Tabla 4.1
Valores de Qmean (L/s) en la matriz de lluvias

I (mm/h)	D (min)															
	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	50	80	120	180	240	300
300	26,60	45,54	65,25	85,18	104,87	151,46	190,79	222,23	251,91	277,98	346,00	442,50	520,95	589,41	630,40	657,70
140	11,38	19,36	26,97	34,42	41,77	59,63	76,49	92,11	106,41	119,44	151,93	196,14	231,57	261,90	279,77	291,56
120	9,65	16,30	22,71	28,87	34,87	49,33	62,99	75,73	87,49	98,28	125,46	162,89	193,08	218,98	234,24	244,31
100	7,72	13,27	18,56	23,56	28,34	39,64	50,22	60,10	69,29	77,79	99,49	129,94	154,80	176,20	188,83	197,16
80	5,90	10,43	14,74	18,76	22,53	31,15	38,96	46,17	52,85	59,07	75,14	98,28	117,54	134,24	144,10	150,60
60	4,03	7,51	10,62	13,65	16,47	22,79	28,24	33,06	37,42	41,40	51,67	66,89	80,17	92,03	99,12	103,80
40	2,18	4,48	6,61	8,68	10,60	14,90	18,58	21,77	24,57	27,03	32,94	40,68	46,76	52,23	55,76	58,24
20	0,61	1,54	2,62	3,67	4,62	6,88	8,81	10,47	11,92	13,20	16,25	20,20	23,27	25,85	27,36	28,35
10	0,31	0,49	0,68	1,14	1,61	2,78	3,77	4,66	5,43	6,11	7,72	9,79	11,39	12,72	13,50	14,01
7	0,21	0,34	0,46	0,57	0,78	1,54	2,25	2,92	3,49	3,99	5,12	6,63	7,79	8,76	9,32	9,68
5	0,14	0,24	0,32	0,40	0,47	0,75	1,25	1,71	2,13	2,51	3,40	4,54	5,41	6,13	6,54	6,81
3	0,07	0,13	0,19	0,23	0,27	0,37	0,45	0,58	0,81	1,05	1,64	2,41	3,00	3,47	3,74	3,92
1	0,00	0,00	0,01	0,04	0,06	0,09	0,12	0,14	0,16	0,17	0,21	0,26	0,52	0,77	0,91	1,00
Desviación estándar: 106,14																
Coeficiente de variación (%): 180,96																
Media aritmética: 58,65																
P90: 179,99																
Mínimo: 0,00																
Máximo: 657,70																

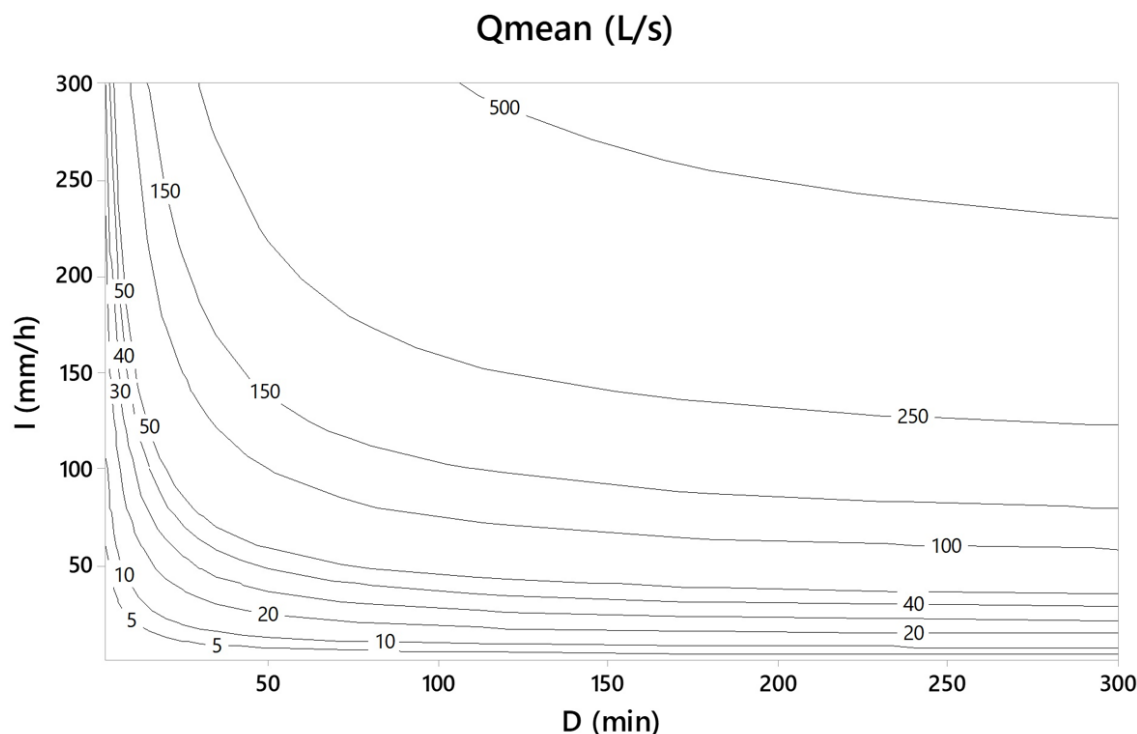


FIG.4.6 Gráfico de contorno de Q_{mean} (L/s)

Tabla 4.2

Valores de EMC (mg/L) en la matriz de lluvias para el contaminante TS

I (mm/h)	D (min)															
	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	50	80	120	180	240	300
300	774,97	609,33	492,99	404,48	336,81	228,38	168,78	132,78	109,13	92,53	63,43	38,90	25,65	16,98	12,69	10,13
140	1.054,98	884,92	777,17	694,55	625,85	490,92	392,45	320,28	267,04	227,16	154,11	92,40	60,06	39,37	29,28	23,31
120	1.116,62	941,41	833,87	752,79	685,82	553,42	453,38	376,70	317,82	272,33	186,06	111,25	72,04	47,09	34,98	27,82
100	1.193,33	1.009,60	900,84	821,01	755,93	627,64	528,57	449,44	385,92	334,84	232,71	139,38	89,85	58,52	43,39	34,47
80	1.293,46	1.096,20	983,60	903,68	840,21	717,18	621,75	543,39	477,87	422,81	304,34	185,14	119,00	77,15	57,05	45,26
60	1.437,02	1.215,15	1.094,72	1.012,06	948,23	828,83	738,63	664,34	600,90	545,83	417,84	268,10	174,16	112,52	82,94	65,66
40	1.683,79	1.404,60	1.264,27	1.173,26	1.106,07	986,25	898,60	827,15	766,09	712,67	584,79	418,86	294,79	198,59	147,88	117,35
20	2.218,77	1.844,46	1.624,20	1.495,28	1.408,49	1.270,82	1.181,95	1.113,72	1.056,60	1.006,54	882,42	701,49	539,33	389,27	299,31	241,30
10	2.565,15	2.335,69	2.186,00	1.981,91	1.830,29	1.613,95	1.497,90	1.420,48	1.361,77	1.313,42	1.199,46	1.031,94	866,00	686,38	559,56	467,15
7	2.755,12	2.515,39	2.370,68	2.272,98	2.151,97	1.857,44	1.699,01	1.602,02	1.534,25	1.481,93	1.367,80	1.209,41	1.051,65	872,14	736,59	631,60
5	2.935,45	2.682,19	2.534,89	2.434,86	2.360,01	2.171,56	1.948,95	1.812,27	1.723,32	1.659,22	1.533,88	1.379,83	1.231,92	1.059,80	923,63	812,93
3	3.211,69	2.973,75	2.807,70	2.702,66	2.617,40	2.481,78	2.399,43	2.298,04	2.143,93	2.024,29	1.826,76	1.651,66	1.513,38	1.358,19	1.231,50	1.123,28
1	0,00	0,00	3.410,12	3.314,50	3.236,55	3.083,94	2.982,42	2.911,21	2.861,75	2.825,53	2.749,61	2.667,86	2.290,32	2.080,55	1.967,47	1.879,98
Mínimo:		0,00				Media aritmética:				Desviación estándar:				887,92		
Máximo:		3.410,12				P90:				Coeficiente de variación (%):				82,58		

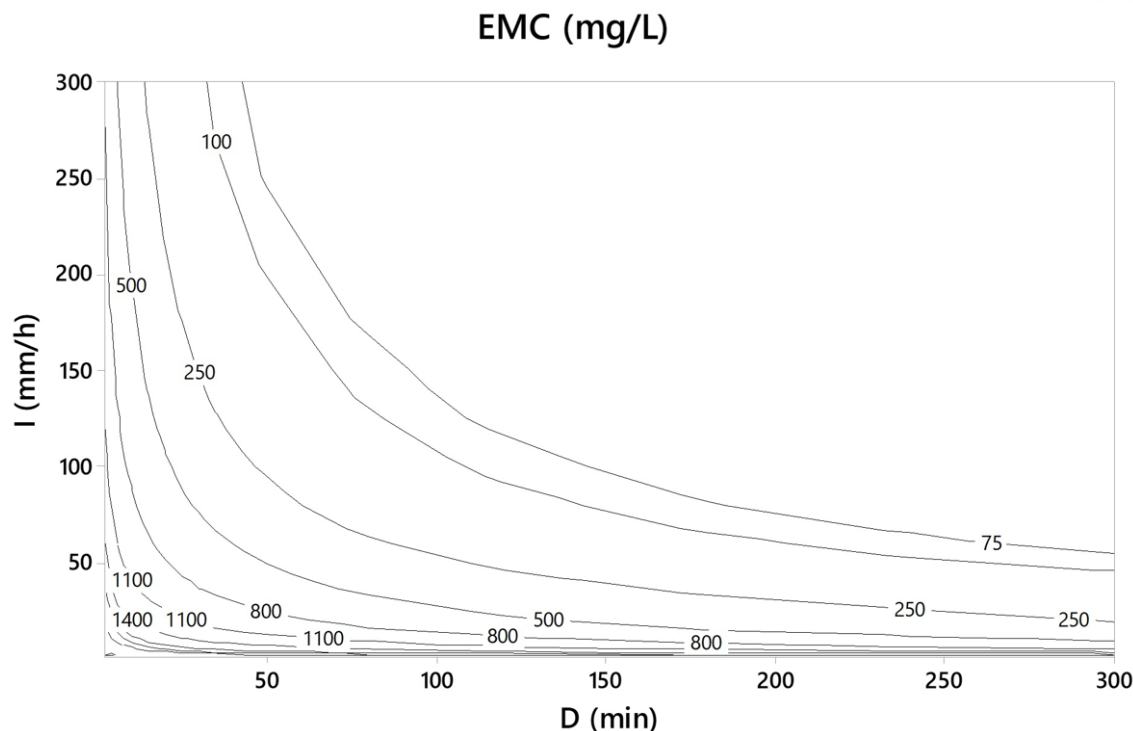


FIG.4.7 Gráfico de contorno de EMC (mg/L) para el contaminante TS

Análogamente, el resto de variables de caracterización de los polutogramas con sus valores y sus gráficos de contorno (para el contaminante TS) se pueden observar en el Anexo A4.7 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE POLUTOGRAMAS PARA EL CONTAMINANTE TS y en el Anexo A4.8 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CONTAMINANTE TS.

4.2.4.2.1.- Probabilidad de ocurrencia de los valores de las variables de caracterización

Cada evento de contaminación puede asociarse con la frecuencia de la lluvia que lo originó. Esto se puede hacer con curvas IDF; por ejemplo, específicamente para la ciudad de Santander se tiene (Temprano y Tejero 2002):

$$I = 130 \cdot Tr^{0,42} \cdot D^{-0,52} \quad [C4-9]$$

$$Tr = \left(\frac{I}{130 \cdot D^{-0,52}} \right)^{\frac{1}{0,42}} \quad [C4-10]$$

Donde:

I: Intensidad de la lluvia (mm/h)

Tr: Período de retorno (años)

D: Duración de la lluvia (min)

En un gráfico I-D, se sabe claramente que el Tr para una "I" dada de lluvia aumenta de izquierda a derecha (de una "D" menor a una mayor). También para una "D" dada de lluvia, el Tr aumenta de abajo hacia arriba (de una "I" menor a una mayor).

La variable Tr puede representarse superponiendo sus líneas en cualquier gráfico de contorno de las variables de caracterización de los polutogramas; así, para cualquier punto dentro de la matriz de lluvias, se puede conocer el valor preciso de la variable de caracterización y su "probabilidad" asociada de ocurrencia (Tr).

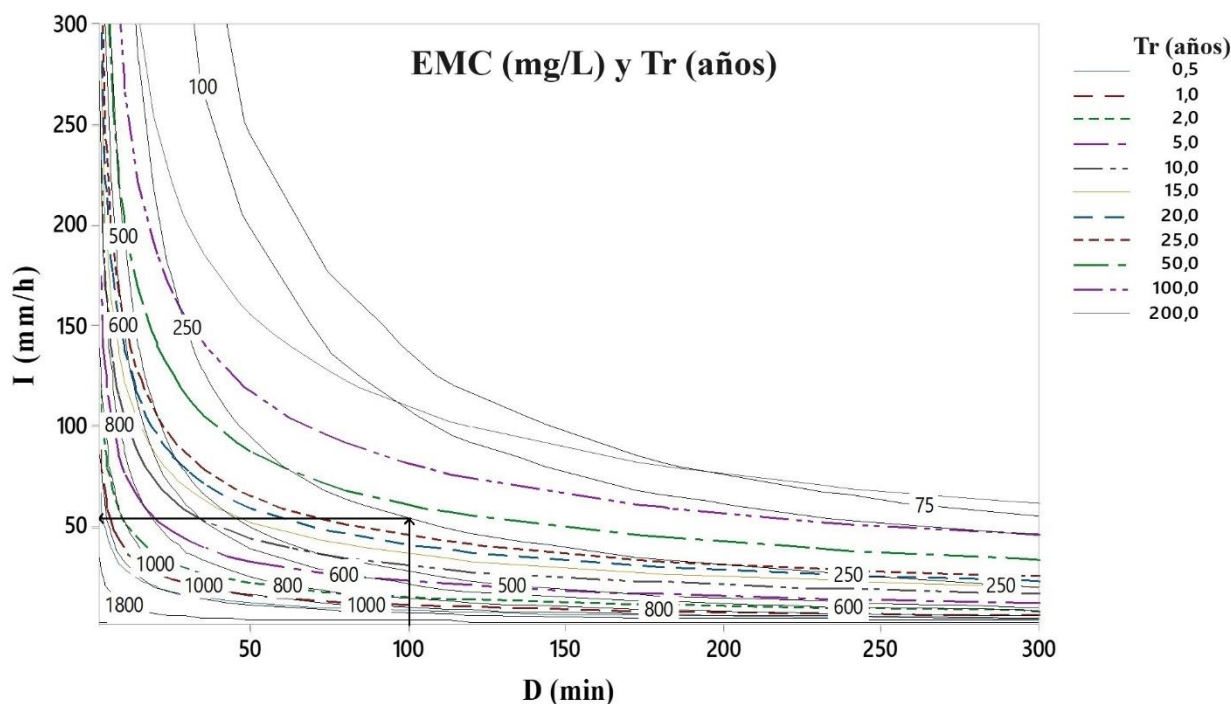


FIG.4.8 Gráfico de contorno de EMC (mg/L) y Tr (años) para el contaminante TS

Como ejemplo, se puede observar que para una $I = 55 \text{ mm/h}$ y $D = 100 \text{ min}$ se obtiene una $EMC = 250 \text{ mg/L}$ con una probabilidad aproximada de ocurrencia $Tr = 38 \text{ años}$.

La figura anterior también puede representarse como una tabla donde los valores de EMC estén acompañados por sus correspondientes Tr en formato $\frac{EMC}{Tr}$.

Tabla 4.3 Valores de EMC (mg/L) y Tr (años) en la matriz de lluvias para el contaminante TS

I (mm/h)	D (min)															
	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	50	80	120	180	240	300
300	774,97 17,27	609,33 40,75	492,99 67,32	404,48 96,12	336,81 126,71	228,38 209,33	168,78 298,89	132,78 394,00	109,13 493,77	92,53 597,60	63,43 929,39	38,90 1.663,09	25,65 2.747,47	16,98 4.538,91	12,69 6.480,93	10,13 8.543,21
140	1.054,98 2,81	884,92 6,64	777,17 10,97	694,55 15,66	625,85 20,64	490,92 34,10	392,45 48,69	320,28 64,18	267,04 80,44	227,16 97,35	154,11 151,40	92,40 270,92	60,06 447,56	39,37 739,39	29,28 1.055,74	23,31 1.391,69
120	1.116,62 1,95	941,41 4,60	833,87 7,60	752,79 10,85	685,82 14,30	553,42 23,62	453,38 33,73	376,70 44,46	317,82 55,72	272,33 67,44	186,06 104,89	111,25 187,69	72,04 310,07	47,09 512,24	34,98 731,41	27,82 964,15
100	1.193,33 1,26	1.009,60 2,98	900,84 4,92	821,01 7,03	755,93 9,26	627,64 15,30	528,57 21,85	449,44 28,81	385,92 36,10	334,84 43,69	232,71 67,95	139,38 121,59	89,85 200,88	58,52 331,86	43,39 473,84	34,47 624,62
80	1.293,46 0,742	1.096,20 1,75	983,60 2,89	903,68 4,13	840,21 5,45	717,18 9,00	621,75 12,85	543,39 16,93	477,87 21,22	422,81 25,68	304,34 39,94	185,14 71,48	119,00 118,08	77,15 195,08	57,05 278,55	45,26 367,18
60	1.437,02 0,374	1.215,15 0,883	1.094,72 1,46	1.012,06 2,08	948,23 2,75	828,83 4,54	738,63 6,48	664,34 8,54	600,90 10,70	545,83 12,95	417,84 20,14	268,10 36,03	174,16 59,53	112,52 98,34	82,94 140,42	65,66 185,10
40	1.683,79 0,143	1.404,60 0,336	1.264,27 0,555	1.173,26 0,793	1.106,07 1,05	986,25 1,73	898,60 2,47	827,15 3,25	766,09 4,07	712,67 4,93	584,79 7,67	418,86 13,72	294,79 22,67	198,59 37,45	147,88 53,48	117,35 70,49
20	2.218,77 0,027	1.844,46 0,065	1.624,20 0,107	1.495,28 0,152	1.408,49 0,201	1.270,82 0,332	1.181,95 0,473	1.113,72 0,624	1.056,60 0,782	1.006,54 0,947	882,42 1,47	701,49 2,63	539,33 4,35	389,27 7,19	299,31 10,27	241,30 13,53
10	2.565,15 0,0053	2.335,69 0,012	2.186,00 0,020	1.981,91 0,029	1.830,29 0,039	1.613,95 0,064	1.497,90 0,091	1.420,48 0,120	1.361,77 0,150	1.313,42 0,182	1.199,46 0,283	1.031,94 0,506	866,00 0,836	686,38 1,38	559,56 1,97	467,15 2,60
7	2.755,12 0,0022	2.515,39 0,0053	2.370,68 0,0088	2.272,98 0,013	2.151,97 0,016	1.857,44 0,027	1.699,01 0,039	1.602,02 0,051	1.534,25 0,064	1.481,93 0,078	1.367,80 0,121	1.209,41 0,216	1.051,65 0,357	872,14 0,590	736,59 0,843	631,60 1,11
5	2.935,45 0,0010	2.682,19 0,0024	2.534,89 0,0039	2.434,86 0,0056	2.360,01 0,0074	2.171,56 0,012	1.948,95 0,017	1.812,27 0,023	1.723,32 0,029	1.659,22 0,035	1.533,88 0,054	1.379,83 0,097	1.231,92 0,160	1.059,80 0,265	923,63 0,378	812,93 0,499
3	3.211,69 0,0003	2.973,75 0,0007	2.807,70 0,0012	2.702,66 0,0017	2.617,40 0,0022	2.481,78 0,0036	2.399,43 0,0052	2.298,04 0,0068	2.143,93 0,0085	2.024,29 0,010	1.826,76 0,016	1.651,66 0,029	1.513,38 0,048	1.358,19 0,079	1.231,50 0,112	1.123,28 0,148
1	0,00 0,0000	0,00 0,0001	3.410,12 0,0001	3.314,50 0,0001	3.236,55 0,0002	3.083,94 0,0003	2.982,42 0,0004	2.911,21 0,0005	2.861,75 0,0006	2.825,53 0,0008	2.749,61 0,0012	2.667,86 0,0021	2.290,32 0,0035	2.080,55 0,0057	1.967,47 0,0082	1.879,98 0,011

Así pues, cualquiera de las variables restantes de caracterización de los polutogramas también podría representarse de la misma manera, permitiendo analizar sus valores y su probabilidad de ocurrencia IDF.

4.2.4.3.- Coeficientes de correlación y coeficientes de determinación de las variables de caracterización

Añadida Tr (años) como una variable adicional a considerar, en el Anexo A4.9 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y DETERMINACIÓN ENTRE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CONTAMINANTE TS se pueden observar los coeficientes de correlación "R" y los coeficientes de determinación "R²" existentes entre todas las variables de caracterización para el contaminante TS.

4.2.4.3.1.- Mejores coeficientes de determinación para cada variable de caracterización

La siguiente tabla muestra los cinco mejores R² para cada variable de caracterización del contaminante TS.

Tabla 4.4 Mejores coeficientes de determinación R^2 de las variables de caracterización de los polutogramas para el contaminante TS

I (mm/h)	Qfp (L/s) ; 0,994	Fp (kg/min) ; 0,982	Qmax (L/s) ; 0,945	Cp (mg/L) ; 0,606	Qmean (L/s) ; 0,535
D (min)	Tclast (min) ; 0,983	Tt (min) ; 0,983	Tqmax (min) ; 0,741	Vloss (m³) ; 0,531	P (mm) ; 0,303
P (mm)	Vrain (m³) ; 1,000	Vt (m³) ; 0,995	Qmean (L/s) ; 0,834	Tr (años) ; 0,800	Vloss (m³) ; 0,643
Qmean (L/s)	Vt (m³) ; 0,836	P (mm) ; 0,834	Vrain (m³) ; 0,834	Qmax (L/s) ; 0,719	Tr (años) ; 0,686
Qmax (L/s)	Qfp (L/s) ; 0,951	I (mm/h) ; 0,945	Fp (kg/min) ; 0,922	Qmean (L/s) ; 0,719	Cp (mg/L) ; 0,522
Qfp (L/s)	I (mm/h) ; 0,994	Fp (kg/min) ; 0,988	Qmax (L/s) ; 0,951	Cp (mg/L) ; 0,608	Qmean (L/s) ; 0,545
Vrain (m³)	P (mm) ; 1,000	Vt (m³) ; 0,995	Qmean (L/s) ; 0,834	Tr (años) ; 0,800	Vloss (m³) ; 0,643
Vt (m³)	P (mm) ; 0,995	Vrain (m³) ; 0,995	Tr (años) ; 0,847	Qmean (L/s) ; 0,836	Vloss (m³) ; 0,571
Vloss (m³)	Tqmax (min) ; 0,782	P (mm) ; 0,643	Vrain (m³) ; 0,643	Tclast (min) ; 0,577	Tt (min) ; 0,576
Cp (mg/L)	Cfp (mg/L) ; 0,718	Fp (kg/min) ; 0,682	EMC (mg/L) ; 0,637	Qfp (L/s) ; 0,608	I (mm/h) ; 0,606
Clast (mg/L)	Cm (mg/L) ; 0,949	Mt (kg) ; 0,936	EMC (mg/L) ; 0,865	Cfp (mg/L) ; 0,568	Cp (mg/L) ; 0,503
Cm (mg/L)	Clast (mg/L) ; 0,949	Mt (kg) ; 0,883	EMC (mg/L) ; 0,846	Cfp (mg/L) ; 0,578	Cp (mg/L) ; 0,564
EMC (mg/L)	Cfp (mg/L) ; 0,868	Clast (mg/L) ; 0,865	Cm (mg/L) ; 0,846	Mt (kg) ; 0,805	Cp (mg/L) ; 0,637
Cfp (mg/L)	EMC (mg/L) ; 0,868	Cp (mg/L) ; 0,718	Cm (mg/L) ; 0,578	Clast (mg/L) ; 0,568	Tcp (min) ; 0,496
Fp (kg/min)	Qfp (L/s) ; 0,988	I (mm/h) ; 0,982	Qmax (L/s) ; 0,922	Cp (mg/L) ; 0,682	Fm (kg/min) ; 0,557
Fm (kg/min)	Fp (kg/min) ; 0,557	Cp (mg/L) ; 0,536	Qfp (L/s) ; 0,500	Cfp (mg/L) ; 0,483	I (mm/h) ; 0,474
Mt (kg)	Clast (mg/L) ; 0,936	Cm (mg/L) ; 0,883	EMC (mg/L) ; 0,805	Vloss (m³) ; 0,518	Cfp (mg/L) ; 0,487
Tqmax (min)	Vloss (m³) ; 0,782	Tclast (min) ; 0,745	Tt (min) ; 0,745	D (min) ; 0,741	P (mm) ; 0,521
Tcp (min)	Cfp (mg/L) ; 0,496	Tfp (min) ; 0,398	EMC (mg/L) ; 0,373	Cp (mg/L) ; 0,263	Clast (mg/L) ; 0,186
Tclast (min)	Tt (min) ; 1,000	D (min) ; 0,983	Tqmax (min) ; 0,745	Vloss (m³) ; 0,577	Mt (kg) ; 0,357
Tfp (min)	Tcp (min) ; 0,398	Cp (mg/L) ; 0,326	Fp (kg/min) ; 0,175	I (mm/h) ; 0,154	Fm (kg/min) ; 0,148
Tt (min)	Tclast (min) ; 1,000	D (min) ; 0,983	Tqmax (min) ; 0,745	Vloss (m³) ; 0,576	Mt (kg) ; 0,357
Tr (años)	Vt (m³) ; 0,847	P (mm) ; 0,800	Vrain (m³) ; 0,800	Qmean (L/s) ; 0,686	Qmax (L/s) ; 0,344

4.2.4.4.- Análisis de componentes principales (PCA) y análisis de conglomerados (CA)

El análisis de componentes principales (PCA, en inglés, “*Principal Component Analysis*”) y el análisis de conglomerados (CA, en inglés “*Cluster Analysis*”) se encuentran entre los métodos estadísticos multivariantes más comunes utilizados en estudios de contaminación ambiental. El PCA puede usarse para revelar relaciones en conjuntos de datos complejos y grandes mediante la reducción de la dimensionalidad de los datos. El conjunto de datos se transforma en un nuevo conjunto de variables, componentes principales, que representan la mayor parte de la variación en los datos originales. El primer componente principal explica la mayor varianza posible de los datos y cada componente subsecuente explica la mayor cantidad posible de la varianza restante. Los resultados de un PCA generalmente se informan como puntuaciones y pesos (Björklund, 2011).

En esta investigación se ha utilizado el programa MINITAB 21.1.0 para el análisis.

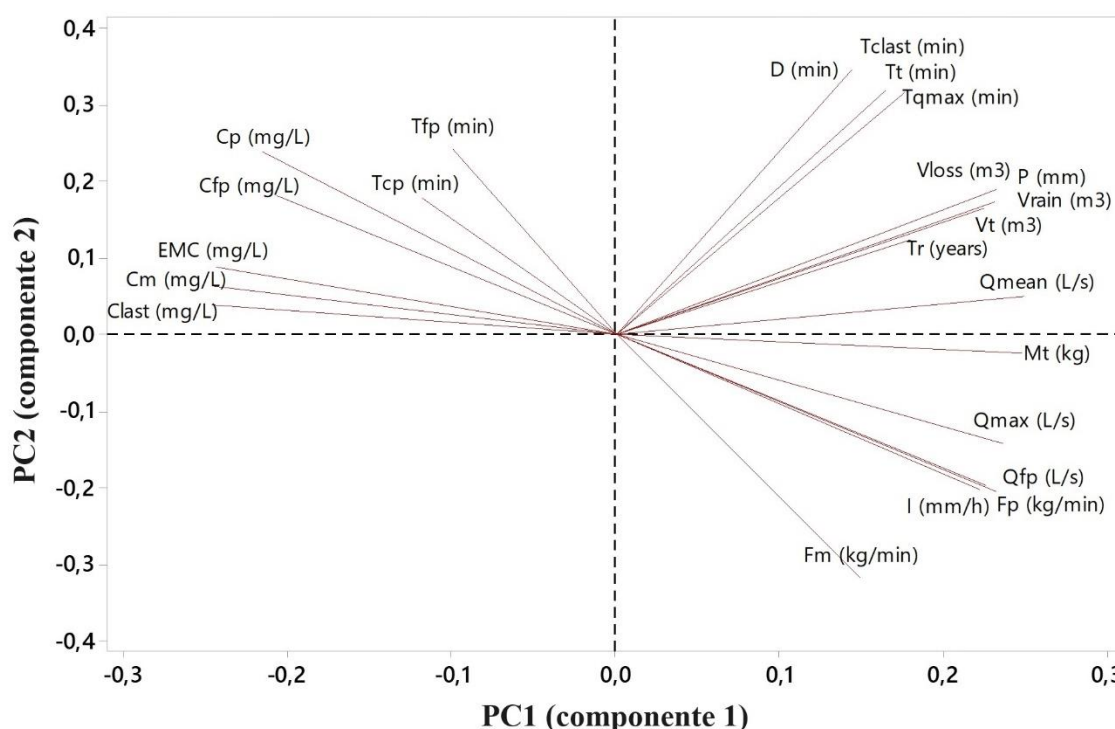


FIG.4.9 Análisis de componentes principales (PCA) de las variables de caracterización de los polutogramas para el contaminante TS

El primer componente correspondiente al mayor valor propio (*eigenvalue*) de 12,24 explicó más del 53,20% de la varianza total. El segundo componente correspondiente al segundo valor propio de 4,99 explicó más del 21,70%, y el tercer componente correspondiente al tercer valor propio (igual a 2,74) explicó más del 11,90% dando un valor acumulado de aproximadamente 86,80%.

El gráfico muestra dos grupos claramente diferenciados [PC1 (+'s) y PC1 (-'s)] cuyo coeficiente de correlación entre cada variable de un grupo con otra variable del otro grupo, es negativo.

Grupo 1 (de menor a mayor PC2): Clast, Cm, EMC, Cfp, Cp, Tcp, Tfp.

Grupo 2 (de menor a mayor PC2): Fm, I, Fp, Qfp, Qmax, Mt, Qmean, Tr, Vt, Vrain, P, Vloss, Tqmax, Tt, Tclast, D.

Tclast y Tt tienen los mismos valores de PC1, PC2 y PC3 al igual que P y Vrain.

Dentro de los grupos también se podrían identificar subgrupos, para el Grupo 1 se tendría subgrupo (a): Clast, Cm, EMC; subgrupo (b): Cfp, Cp y subgrupo (c): Tcp, Tfp. Para el Grupo 2 se tendría subgrupo (d): Fm; subgrupo (e): I, Fp, Qfp, Qmax, Mt; subgrupo (f): Qmean, Tr, Vt, Vrain, P, Vloss y subgrupo (g): Tqmax, Tt, Tclast, D.

Estos grupos y subgrupos también se pueden deducir al realizar un análisis de conglomerados. En el análisis de conglomerados, los objetos se agrupan según sus

características. Los grupos de objetos deben mostrar una alta homogeneidad dentro del grupo y una alta heterogeneidad entre grupos. La similitud entre grupos se mide por la distancia euclidiana, a menudo ilustrada en un dendrograma; distancias más pequeñas indican mayor similitud y viceversa (Björklund, 2011).

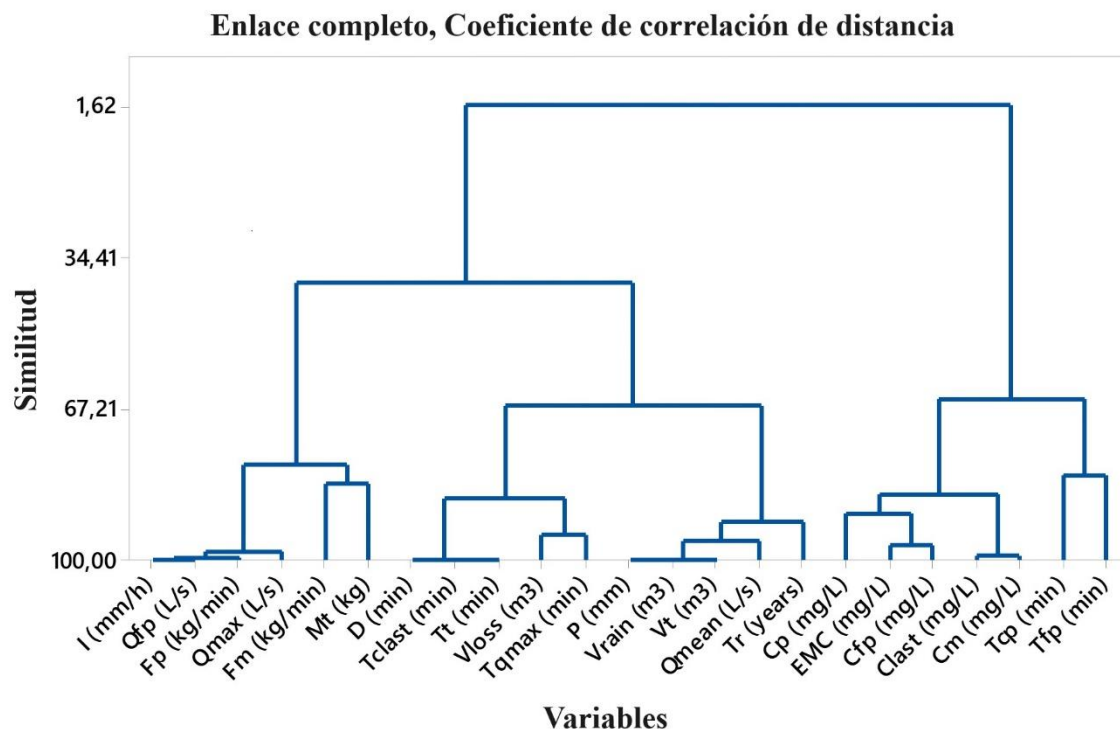


FIG.4.10 Análisis de conglomerados (CA) / Dendrograma de las variables de caracterización de los polutogramas para el contaminante TS

En la Figura:

Enlace completo o vecino más alejado: mide la proximidad entre dos grupos calculando la distancia entre sus objetos más lejanos o la similitud entre sus objetos menos semejantes.

Coeficiente de correlación de distancia: es una medida para describir la independencia de cualquier variable. Se calcula entre dos variables de diferentes dimensiones.

4.2.4.5.- Impacto e identificación de polutogramas más desfavorables

El definir un evento más desfavorable depende del objetivo de aplicación. Así, puede ser diferente si se considera el vertido de escurrentía a un medio receptor y a su vez, diferente si éste es un río, estuario, mar, etc.; o su entrada directa a una Estación Depuradora de Aguas Residuales EDAR (WWTP); o si su objetivo es un diseño de un sistema de control y tratamiento de reboses.

Desde un punto de vista cualitativo, el polutograma más desfavorable será el que aporte mayor contaminación. Hay que definir qué se entiende como mayor contaminación ya que ésta puede ser concentración, flujo másico instantáneo o masa vertida. A su vez estas variables, dada su variación en el polutograma, habrá que caracterizarlas (valores medios, puntas, etc.). Además, habrá otras condiciones que

hacen que una cierta contaminación (la variable) sea más o menos desfavorable. Entre estas condiciones "desfavorables" cabe destacar el tiempo de actuación de la variable, masa vertida, volumen de agua asociado y probabilidad de ocurrencia del suceso.

Generalmente el sentido más desfavorable de estas condiciones es: mayor masa, menor volumen, mayor tiempo y mayor probabilidad.

Al analizar este efecto y tratar de representarlo mediante las variables que caracterizan el hidrograma y los polutogramas, se identifican los siguientes escenarios:

Tabla 4.5 Situaciones más desfavorables para evaluar sucesos de contaminación

↑ Valores mayores ↓ Valores menores	Efecto
↑: Cp, Clast, Cm, EMC, Cfp, Fp, Fm, Mt	Mayor contaminación
↓: P, Qmean, Qmax, Qfp, Vrain, (Vloss) ⁻¹ , Vt	Menor volumen de vertido de agua
↑: Tqmax, Tcp, Tclast, Tfp, Tt	Mayor duración del suceso
↓: Tr (Curvas IDF)	Mayor probabilidad

Para igualdad de concentraciones o masas vertidas un mayor volumen o un mayor caudal asociado a las mismas, provoca una mayor dilución y por tanto sucesos de contaminación menos desfavorables.

Para evaluar los polutogramas más desfavorables se calculará una variable resultante denominada variable de evaluación de impacto IEV (*Impact Evaluation Variable*) utilizando las siguientes fórmulas:

$$(maxVAR)_j = \max \begin{pmatrix} \overline{VAR_j^{I1,D1}} & \overline{VAR_j^{I1,D2}} & \overline{VAR_j^{I1,D3}} & \dots & \overline{VAR_j^{I1,Dn}} \\ \overline{VAR_j^{I2,D1}} & \overline{VAR_j^{I2,D2}} & \overline{VAR_j^{I2,D3}} & \dots & \overline{VAR_j^{I2,Dn}} \\ \overline{VAR_j^{I3,D1}} & \overline{VAR_j^{I3,D2}} & \overline{VAR_j^{I3,D3}} & \dots & \overline{VAR_j^{I3,Dn}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \overline{VAR_j^{Im,D1}} & \overline{VAR_j^{Im,D2}} & \overline{VAR_j^{Im,D3}} & \dots & \overline{VAR_j^{Im,Dn}} \end{pmatrix} \quad [C4-11]$$

Donde:

VAR_j: Es cualquier variable de caracterización de los polutogramas

I1, I2, I3, ..., Im: son las intensidades de lluvia elegidas de la matriz seleccionada

D1, D2, D3, ..., Dn: son las duraciones de lluvia elegidas de la matriz seleccionada

$\widehat{VAR}_j^{I,D}$: Es el valor de la variable de caracterización “j” para una intensidad “I” y una duración “D” de la matriz de lluvias

(maxVAR)_j: Es el valor máximo de la variable de caracterización seleccionada, de toda la matriz de lluvias elegida

Cuando se busquen (↑ **Valores mayores**) de una variable específica de caracterización se utilizará la siguiente expresión:

$$K_j \cdot \frac{\widehat{VAR}_j^{I,D}}{(\max VAR)_j} \quad [C4-12]$$

Y cuando se busquen (↓ **Valores menores**) se utilizará:

$$K_j \cdot \left(1 - \frac{\widehat{VAR}_j^{I,D}}{(\max VAR)_j} \right) \quad [C4-13]$$

Así pues; el valor de la variable de evaluación de impacto “iev” de un conjunto “T” de variables de caracterización para una lluvia de intensidad “I” y una duración “D” de la matriz de lluvias será:

$$\widehat{iev}^{I,D} = \sum_{j=1}^T \left[K_j \cdot \frac{\widehat{VAR}_j^{I,D}}{(\max VAR)_j} \quad or \quad K_j \cdot \left(1 - \frac{\widehat{VAR}_j^{I,D}}{(\max VAR)_j} \right) \right] \quad [C4-14]$$

Siendo:

iev: Valor de la variable de evaluación de impacto IEV

$\widehat{iev}^{I,D}$: Valor de la variable de evaluación de impacto IEV para una intensidad “I” y una duración “D” de la matriz de lluvias

T: El número de variables de caracterización elegidas para hallar la variable IEV

K_j: Coeficiente de ponderación (“peso” o importancia) de cada variable de caracterización elegida

Dado que se desea que la variable de evaluación de impacto tenga una escala de 10 puntos (10 *point scale impact evaluation*), deberá cumplirse que:

$$\sum_{j=1}^T K_j = 10 \quad [C4-15]$$

La variable de evaluación de impacto se expresará, por tanto, de esta manera:

$$IEV = \begin{pmatrix} I_{1,D1} & I_{1,D2} & I_{1,D3} & \dots & I_{1,Dn} \\ \widehat{iev} & \widehat{iev} & \widehat{iev} & \dots & \widehat{iev} \\ I_{2,D1} & I_{2,D2} & I_{2,D3} & \dots & I_{2,Dn} \\ \widehat{iev} & \widehat{iev} & \widehat{iev} & \dots & \widehat{iev} \\ I_{3,D1} & I_{3,D2} & I_{3,D3} & \dots & I_{3,Dn} \\ \widehat{iev} & \widehat{iev} & \widehat{iev} & \dots & \widehat{iev} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{m,D1} & I_{m,D2} & I_{m,D3} & \dots & I_{m,Dn} \\ \widehat{iev} & \widehat{iev} & \widehat{iev} & \dots & \widehat{iev} \end{pmatrix} \quad [C4-16]$$

4.2.4.5.1.- Variables de evaluación de impacto (IEV's)

Determinar la desfavorabilidad de un polutograma al buscar un vertido de mayor masa, menor volumen, mayor tiempo se traduciría, por ejemplo, en hallar variables IEV tales como:

Tabla 4.6 Ejemplos de IEV's

IEV	FORMULA
$\uparrow Mt \downarrow P$	$\uparrow Mt \downarrow P = K_1 \cdot \frac{Mt}{\max(Mt)} + K_2 \cdot \left(1 - \frac{P}{\max(P)}\right)$ $K_1 = K_2 = 5$
$\uparrow Mt \uparrow Tt$	$\uparrow Mt \uparrow Tt = K_1 \cdot \frac{Mt}{\max(Mt)} + K_2 \cdot \frac{Tt}{\max(Tt)}$ $K_1 = K_2 = 5$
$\uparrow Mt \downarrow Vt$	$\uparrow Mt \downarrow Vt = K_1 \cdot \frac{Mt}{\max(Mt)} + K_2 \cdot \left(1 - \frac{Vt}{\max(Vt)}\right)$ $K_1 = K_2 = 5$
$\uparrow EMC \uparrow Tt$	$\uparrow EMC \uparrow Tt = K_1 \cdot \frac{EMC}{\max(EMC)} + K_2 \cdot \frac{Tt}{\max(Tt)}$ $K_1 = K_2 = 5$
$\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$	$\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt = K_1 \cdot \frac{Mt}{\max(Mt)} + K_2 \cdot \left(1 - \frac{Vt}{\max(Vt)}\right) + K_3 \cdot \frac{Tt}{\max(Tt)}$ $K_1 = K_2 = K_3 = 3,33$

La representación gráfica de estas IEV's se puede apreciar en el Anexo A4.10 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES IEV'S PARA EL CONTAMINANTE TS.

En estos ejemplos de IEV's no se ha tomado en cuenta de forma premeditada a la variable Tr de tal forma que pueda aplicarse como criterio final para analizar la desfavorabilidad de polutograma y así poder aplicar la metodología propuesta a otras zonas geográficas con sus correspondientes curvas IDF.

Variables IEV's que se han descartado puesto que contribuyen poco a la determinación de la desfavorabilidad de polutogramas por la duplicidad de efectos que incorporan (ver ecuaciones del apartado 4.2.3.1) o por su poca u obvia información que aportan, han sido: $\uparrow F_m \uparrow E_{MC}$; $\uparrow F_m \uparrow M_t$; $\uparrow F_m \uparrow T_t$; $\uparrow F_p \uparrow C_p$; $\uparrow F_p \downarrow Q_{mean}$.

En términos generales, desde el punto de vista conceptual, la variable IEV que permite categorizar mejor los polutogramas más desfavorables es $\uparrow M_t \downarrow V_t \uparrow T_t$.

4.2.4.5.2.- Análisis de vertido a un medio receptor

Tomando como destino final de las aguas de escorrentía un medio receptor como por ejemplo un río y asumiendo mezcla completa e instantánea en toda la sección del río en que se produce el vertido, se podría aplicar la siguiente ecuación:

$$C_r = \frac{C_{ro} \cdot Q_{ro} + C_d \cdot Q_d}{Q_{ro} + Q_d} = \frac{F_{ro} + F_d}{Q_{ro} + Q_d} \quad [C4-17]$$

Donde:

Cr: Concentración (mg/L) en el río en el punto de mezcla

Cro: Concentración inicial (mg/L) en el río

Qro: Caudal inicial (L/s) del río

Fro: Flujo másico inicial (mg/s) en el río

Cd: Concentración (mg/L) de vertido de agua de escorrentía

Qd: Caudal de vertido (L/s) de agua de escorrentía

Fd: Flujo másico (mg/s) de agua de escorrentía

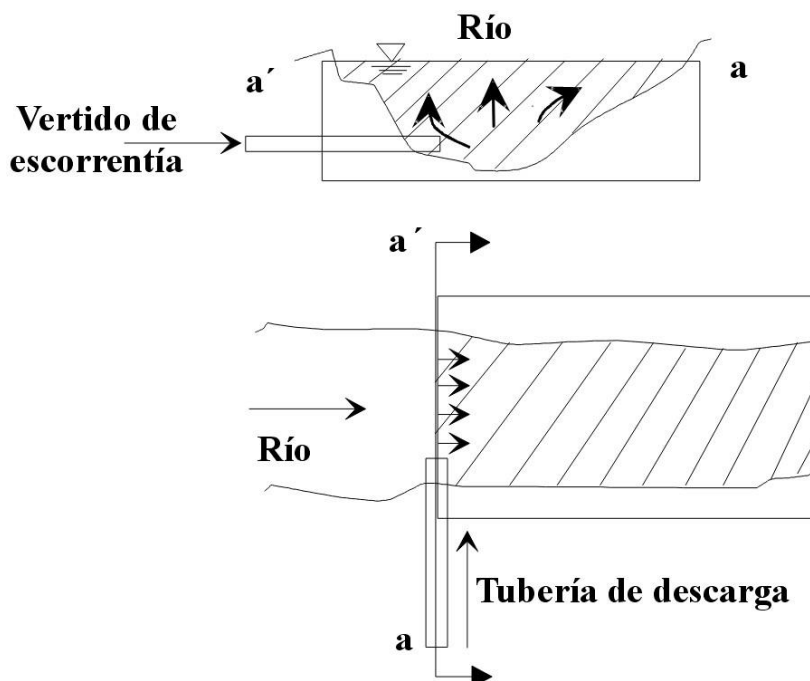


FIG.4.11 Hipótesis de vertido de escorrentía urbana a un río

a) Vertido en condiciones medias:

Utilizando las variables de caracterización F_m y Q_{mean} como variables de vertido y utilizando la ecuación anterior se puede encontrar una nueva variable IEV:

$$Cr_{Fm} = \frac{F_{ro} + F_m}{Q_{ro} + Q_{mean}} = \frac{C_{ro} \cdot Q_{ro} + EMC \cdot Q_{mean}}{Q_{ro} + Q_{mean}} \quad [C4-18]$$

Cr_{Fm} : Concentración (mg/L) en el río en el punto de mezcla debido al vertido de F_m y Q_{mean}

b) Vertido en condiciones punta:

Utilizando las variables de caracterización F_p y Q_{fp} como variables de vertido:

$$Cr_{Fp} = \frac{F_{ro} + F_p}{Q_{ro} + Q_{fp}} = \frac{C_{ro} \cdot Q_{ro} + C_{fp} \cdot Q_{fp}}{Q_{ro} + Q_{fp}} \quad [C4-19]$$

Cr_{Fp} : Concentración (mg/L) en el río en el punto de mezcla debido al vertido de F_p y Q_{fp}

Para observar el efecto que cada uno de los polutogramas de la matriz de lluvia elegida ejerce sobre el río como vertido directo, se han asumido los siguientes valores manteniéndolos como constantes:

$C_{ro} = 10 \text{ mg/L}$ para el contaminante TS

$Q_{ro} = 10 \text{ L/s}$

Así pues, las nuevas variables IEV: Cr_{Fm} y Cr_{Fp} se pueden calcular para cada polutograma de la matriz de lluvias elegida y representar en forma de tabla con sus correspondientes valores: media aritmética, máximo, mínimo, desviación estándar, coeficiente de variación (%) y P90 (ver Anexo A4.7 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE POLUTOGRAMAS PARA EL CONTAMINANTE TS) y en forma de gráfico (Ver Anexo A4.10 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES IEV'S PARA EL CONTAMINANTE TS).

Para determinar la desfavorabilidad de los polutogramas desde el punto de vista de vertido al río se pueden hallar las siguientes variables IEV adicionales:

Tabla 4.7 Ejemplos de IEV's para analizar los vertidos de escorrentía urbana al río

IEV	FORMULA
$\uparrow Cr_{Fm} \uparrow Tt$	$\uparrow Cr_{Fm} \uparrow Tt = K_1 \cdot \frac{Cr_{Fm}}{\max(Cr_{Fm})} + K_2 \cdot \frac{Tt}{\max(Tt)}$ $K_1 = K_2 = 5$
$\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot Tfp$	$\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot Tfp = K_1 \cdot \frac{Cr_{Fp}}{\max(Cr_{Fp})} + K_2 \cdot \frac{2 \cdot Tfp}{\max(2 \cdot Tfp)}$ $K_1 = K_2 = 5$

Como condición más desfavorable se considera que Cr_{Fp} tiene asociado un tiempo de incidencia sobre el medio receptor de dos veces el tiempo Tfp.

La representación gráfica de estas IEV's se puede apreciar en el Anexo A4.10 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES IEV'S PARA EL CONTAMINANTE TS y sus diez valores más altos con sus correspondientes I-D-Tr asociadas se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 4.8 Diez valores más altos de $\uparrow Cr_{Fm} \uparrow Tt$ con sus correspondientes lluvias desfavorables

I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS

I (mm/h)	D (min)	Tr (años)	$\uparrow Cr_{Fm} \uparrow Tt$
5	300	0,50	7,60
7	300	1,11	7,46
3	300	0,15	7,46
10	300	2,60	7,15
5	240	0,38	7,06
7	240	0,84	7,00
3	240	0,11	6,78
10	240	1,97	6,72
7	180	0,59	6,60
5	180	0,27	6,54

Tabla 4.9 Diez valores más altos de $\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot Tfp$ con sus correspondientes lluvias desfavorables

I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS

I (mm/h)	D (min)	Tr (años)	$\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot Tfp$
1	180	0,006	6,27
1	240	0,008	6,27
1	300	0,011	6,27
1	120	0,003	6,03
60	2	0,374	5,12
40	4	0,336	5,11
80	2	0,742	5,08
20	10	0,201	5,04
20	8	0,152	5,00
40	6	0,555	4,99

Otras variables IEV's tales como $\uparrow Fm \downarrow Q_{mean}$ y $\uparrow Fp \downarrow Q_{fp}$ se descartan puesto que no está clara su contribución a la determinación de la desfavorabilidad de polutogramas en el vertido al río por duplicidad de efectos que incorporan (ver ecuaciones del apartado 4.2.3.1).

4.2.4.5.3.- Análisis de rebose y dimensionamiento de tanques de tormenta

La desfavorabilidad de los polutogramas también se puede investigar desde el punto de vista del volumen necesario de almacenamiento de la escorrentía superficial que demanda cada polutograma al simular el rebose de un sistema de alcantarillado de aguas pluviales donde parte de la escorrentía ha sido enviada a una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).

a) Caudal de agua residual en tiempo seco:

Para la cuenca urbana de 1 ha se asume una dotación de 250 L/hab/día (Ayuntamiento de Santander, 1997; Hermoso *et al.*, 2018) y con una densidad poblacional de 100 hab/ha (Temprano *et al.*, 2006) lo que da como resultado un caudal medio de tiempo seco (Average dry weather flow) $Q_{dw} = 25 \text{ m}^3/\text{día/ha} = 0,289 \text{ L/s/ha}$.

b) Caudal derivado a EDAR:

Varios investigadores mencionan distintos valores para el caudal admisible a derivar a la EDAR en función de una dilución máxima. Por ejemplo, *Suárez López et al., 2012* en el análisis del comportamiento de un depósito de retención-aliviadero en función del caudal máximo enviado hacia la EDAR mencionan 3 Q_{dw}; 6 Q_{dw}; 9 Q_{dw}. *De Martino et al., 2011* mencionan valores de 3 a 7 Q_{dw}. *Anta et al., 2007* citan investigaciones con 2,5 Q_{dw}; 5 Q_{dw}; 7 Q_{dw}; 9,9 Q_{dw}. En la presente investigación se asume un valor de 9 Q_{dw} = 2,604 L/s para la cuenca de 1 ha.

Puesto que se simula una red exclusivamente pluvial, el caudal de 2,604 L/s = Q_{WWTP} corresponderá al caudal de aguas de escorrentía que se admite a tratamiento en la EDAR.

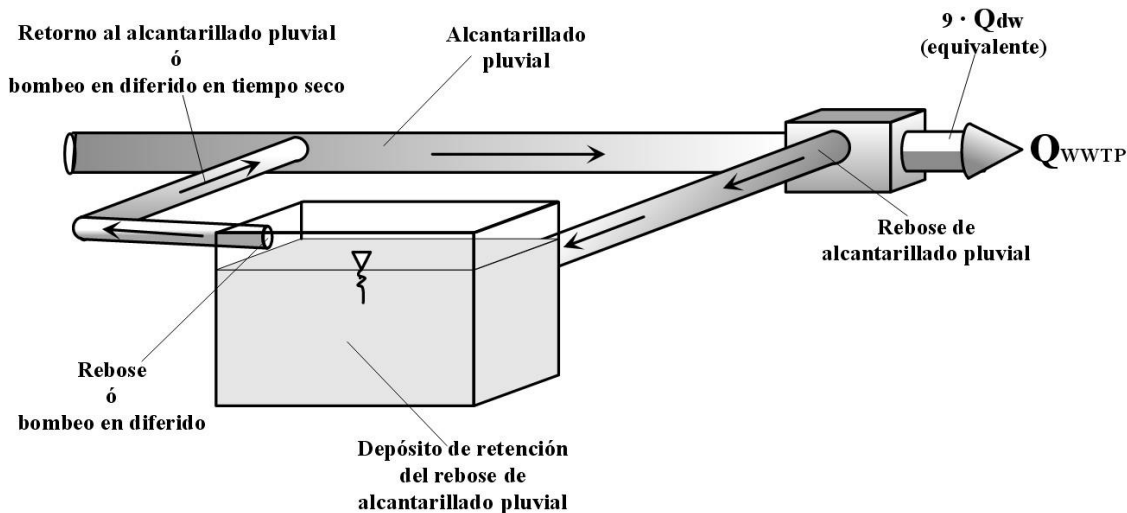


FIG.4.12 Hipótesis de rebose de alcantarillado pluvial

c) Rebose y tanque de tormenta:

En cada polutograma de la matriz de lluvias elegida el rebose de aguas de escorrentía se producirá entre los tiempos 0 y T_t en los que se cumple que:

$$Q(t) > Q_{WWTP} \quad [C4-20]$$

Y el volumen del 100% del rebose durante los tiempos 0 y T_t será:

$$V_{stso} = \int_0^{T_t} (Q(t) - Q_{WWTP}) dt \quad [C4-21]$$

V_{stso}: Rebose de alcantarillado pluvial (m³/ha imp)

Vstso se expresa por ha imp puesto que Q(t) corresponde al caudal de la escorrentía de la cuenca urbana simulada (1 ha).

Usando las variables de caracterización Qmax y Qmean de los hidrogramas, se podría calcular el volumen del rebose para cada posición I-D de la matriz de lluvias:

$$V_{stso} = (Q_{max} - Q_{WWTP}) \cdot Tt \quad [C4-22]$$

$$V_{stso} = (Q_{mean} - Q_{WWTP}) \cdot Tt \quad [C4-23]$$

Se elige la opción de Qmean como método aproximado puesto que con Qmax los volúmenes resultantes serían excesivos (superiores a los valores reales). Sin embargo, hay que señalar que existirían I-D's en la matriz de lluvias que aun cumpliendo:

$$Q_{mean} < Q_{WWTP} \quad [C4-24]$$

tendrían pequeños reboses de aguas de escorrentía puesto que:

$$Q_{max} > Q_{WWTP} \quad [C4-25]$$

No tomando en cuenta esta situación se elige la expresión:

$$V_{stso} = (Q_{mean} - Q_{WWTP}) \cdot Tt \quad [C4-26]$$

para estimar el volumen del rebose de aguas de escorrentía para una I-D dada.

Por otro lado, si se define:

$$V_{storage} = RVF \cdot V_{stso} \quad [C4-27]$$

RVF: Fracción (%) de volumen retenido de Vstso

Vstorage: Volumen (m³/ha imp) del depósito de almacenamiento del rebose de alcantarillado pluvial (*Storm Sewer Overflow*)

Vstso y Vstorage, por definición, siempre tendrán una concentración EMC asociada.

Calculando para toda la matriz de lluvias Vstorage, eliminando aquellas lluvias

I-D's donde: $Q_{mean} \leq Q_{WWTP}$; y eliminando aquellas lluvias I-D's que superen un periodo de retorno de diseño de alcantarillado pluvial Tr_{ssd} (*Return period of storm sewer design*) (por ejemplo: 10 años) se podría obtener una serie de lluvias con un $V_{storage}$ asociado. A continuación, a manera de ejemplo se presentan las matrices de V_{sto} y $V_{storage}$ para un caso específico de RVF y Tr_{ssd} y donde el valor P90 es el percentil 90 de los datos de la serie de lluvias antes comentada.

Tabla 4.10 Vstso (m³/ha imp) para contaminante TS con límite Tr_{ssd} (Santander) = 10 años

[illegible]

Tabla 4.11 Vstso (m³/ha imp) para contaminante TS con RVF = 80% y Trssd (Santander) = 10 años

I (mm/h)	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	50	80	120	180	240	300
300																
140	22,75	45,03														
120	17,93	36,81	55,97													
100	13,01	28,67	44,43	60,35	76,59											
80	8,22	20,67	33,21	45,75	58,33	90,42										
60	3,49	12,71	21,93	31,27	40,60	63,93	87,35	111,11								
40		4,76	10,77	16,90	23,03	38,36	53,68	69,01	84,33	99,66	145,63					
20			0,03	2,82	5,62	12,94	20,26	27,58	34,89	42,21	64,17	108,08	166,63	254,45		
10						0,51	3,70	7,01	10,33	13,64	23,59	43,48	70,00	109,79	149,57	189,36
7								1,03	3,14	5,26	11,48	24,16	41,08	66,45	91,83	117,20
5										3,57	11,46	21,97	37,73	53,50	69,27	
3													3,00	9,16	15,32	21,48
1																
	Mínimo:	0,03														
	Máximo:	254,45														
			Media aritmética:					46,65						Desviación estándar:	48,06	
							P90:	108,93						Coefficiente de variación (%):	103,03	

Si en la Tabla 4.11 se busca para cada intensidad el valor de Vstorage que más se aproxime al P90 se podría acotar más la serie de datos. Además, si a cada valor se le asigna su correspondiente $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$ y su Tr (Santander), se podrían obtener valores de diseño siguientes:

Tabla 4.12 Para cada Intensidad: valores de Vstorage (m³/ha imp) más cercanos a P90 con sus correspondientes $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$ (escala de 10 puntos) y Tr (años) para el contaminante TS. [RVF = 80% y Tr_{ssd} (Santander) = 10 años]

I (mm/h)	D (min)															
	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	50	80	120	180	240	300
300																
140	Vstorage: 45,03 ↑Mt↓Vt↑Tt: 5,17 Tr: 6,64															
120	55,97 5,38 7,60															
100	76,59 5,73 9,26															
80	90,42 5,96 9,00															
60	111,11 6,32 8,54															
40	99,66 6,36 4,93															
20	108,08 7,01 2,63															
10	109,79 8,14 1,38															
7	117,20 9,43 1,11															
5	69,27 9,13 0,499															
3	21,48 8,56 0,148															
1																

En esta Tabla, se buscan los valores que:

- Tengan el mayor valor de $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$.
- Más se aproximen al P90 = 108,93 (Tabla 4.11); es decir, minimizando Dif.P90Vstorage.

$$Dif.P90V_{storage} = |V_{storage} - P90| \quad [C4-28]$$

Dif.P90Vstorage: Valor absoluto (m^3/ha imp) de la diferencia entre Vstorage y P90.

c) Tengan el menor Tr asociado.

En resumen; buscar los valores de Vstorage que cumplan: $\uparrow \uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$ y $\downarrow Tr$. El orden de aplicación de este “filtro” de búsqueda es importante; es decir, buscar valores de la variable IEV $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$ con mayor impacto, luego buscar valores de volúmenes de almacenamiento que más se aproximen al P90 de su serie y finalmente, buscar los menores valores de Tr asociados.

Así pues, para la condición RVF = 80% y Tr_{ssd} (Santander) = 10 años, la solución sería $V_{storage} = 117,20 m^3/ha$ imp, $Dif.P90V_{storage} = 8,27 m^3/ha$ imp, $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt = 9,43$ y un $Tr = 1,11$ años para un polutograma más desfavorable producto de una precipitación $I = 7 mm/h$ y $D = 300 min$ dentro de la matriz de lluvias elegida.

Repitiendo la misma metodología para varios valores de Tr_{ssd} y de RVF, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4.13 Valores de Vstorage con sus correspondientes lluvias desfavorables I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS (Para diferentes RVF's y Tr_{ssd}'s)

Tr _{ssd} (años)	RVF (%)	I (mm/h)	D (min)	↑Mt↓Vt↑Tt	P90 (m ³ /ha imp)	Vstorage (m ³ /ha imp)	Dif.P90Vstorage (m ³ /ha imp)	Tr (años)
5	30	5	300	9,13	35,90	25,97	9,93	0,50
5	50	5	300	9,13	59,84	43,29	16,55	0,50
5	80	5	300	9,13	95,74	69,27	26,48	0,50
5	100	5	300	9,13	119,68	86,58	33,10	0,50
10	30	7	300	9,43	40,85	43,95	3,10	1,11
10	50	7	300	9,43	68,08	73,25	5,17	1,11
10	80	7	300	9,43	108,93	117,20	8,27	1,11
10	100	7	300	9,43	136,17	146,50	10,33	1,11
15	30	7	300	9,43	53,07	43,95	9,12	1,11
15	50	7	300	9,43	88,45	73,25	15,20	1,11
15	80	7	300	9,43	141,52	117,20	24,32	1,11
15	100	7	300	9,43	176,90	146,50	30,40	1,11
20	30	7	300	9,43	54,91	43,95	10,96	1,11
20	50	7	300	9,43	91,51	73,25	18,26	1,11
20	80	7	300	9,43	146,42	117,20	29,22	1,11
20	100	7	300	9,43	183,02	146,50	36,52	1,11
25	30	7	300	9,43	61,05	43,95	17,10	1,11
25	50	7	300	9,43	101,74	73,25	28,49	1,11
25	80	7	300	9,43	162,79	117,20	45,59	1,11
25	100	7	300	9,43	203,49	146,50	56,98	1,11

Los volúmenes de almacenamiento estimados (Tabla 4.13) se pueden resumir de la siguiente manera:

a) RVF = 30%

Con Tr_{ssd} = 5 años, se obtuvo 25,97 m³/ha imp.

Con Tr_{ssd} ≥ 10 años, se obtuvo 43,95 m³/ha imp.

b) RVF = 50%

Con Tr_{ssd} = 5 años, se obtuvo 43,29 m³/ha imp.

Con Tr_{ssd} ≥ 10 años, se obtuvo 73,25 m³/ha imp.

c) RVF = 80%

Con Tr_{ssd} = 5 años, se obtuvo 69,27 m³/ha imp.

Con $Tr_{ssd} \geq 10$ años, se obtuvo 117,20 m³/ha imp.

d) RVF = 100%

Con $Tr_{ssd} = 5$ años se obtuvo 86,58 m³/ha imp.

Con $Tr_{ssd} \geq 10$ años se obtuvo 146,50 m³/ha imp.

De este resumen se puede concluir que los valores de diseño de tanques de tormenta, para el caso estudiado y con valores de RVF entre 30% y 100%, estarían entre 44 y 147 m³/ha imp.

Sin limitar los valores de RVF, se han obtenido resultados similares en otras investigaciones. Por ejemplo, *Andrés-Doménech, 2010* menciona en su investigación varios métodos sobre el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta. Por ejemplo, menciona un informe técnico de la Agencia de Medio Ambiente del Reino Unido sobre “*Constructed Wetlands and Links with Sustainable Drainage Systems*”, 2003 donde se recomienda retener de 100 a 150 m³/ha imp [10 a 15 mm de lluvia neta (escorrentía)]. También cita criterios italianos con valores de 100 a 150 m³/ha imp para reducir significativamente la frecuencia y los volúmenes de vertidos y masas contaminantes. En España, *Andrés-Doménech, 2010*, cita a *Temprano et al. (1998, 2002)* con volúmenes de tanques de tormenta del orden de 120 m³/ha imp. También cita investigaciones del Ayuntamiento de Valencia y del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la UPV que arrojan volúmenes de tanques de tormenta entre 65 y 80 m³/ha imp. También cita a la empresa estatal ACUAMED con proyectos con ratios de 100 m³/ha imp para el área metropolitana de la ciudad de Valencia.

Si en la metodología descrita en el apartado 4.2.4.5.3.c tomamos en cuenta las precipitaciones (I-D's) en la matriz de lluvias que cumplen la condición $Q_{mean} < Q_{WWTP}$ pero tienen pequeños reboses de agua de escorrentía porque $Q_{max} > Q_{WWTP}$, se obtendrían valores P90 (Tabla 4.11) ligeramente inferiores; sin embargo, los valores de la Tabla 4.12 serían los mismos (las lluvias con pequeños reboses están por debajo de las soluciones de esta tabla) y por lo tanto los volúmenes de almacenamiento y las posiciones I-D de las lluvias más desfavorables descritas en la Tabla 4.13 no cambiarían.

Los volúmenes estimados (Tabla 4.13) corresponden en todos los casos a lluvias de baja intensidad "I" y larga duración "D". Así pues, las lluvias críticas resultantes son:

- a) I (mm/h) = 5; D (min) = 300; P (mm) = 25; Tr (años) = 0,50 para Santander; Mt (kg) = 113,95; Mt/DD₇ (%) = 79,41.
- b) I (mm/h) = 7; D (min) = 300; P (mm) = 35; Tr (años) = 1,11 para Santander; Mt (kg) = 126,57; Mt/DD₇ (%) = 88,21.

Al analizar diferentes valores de ADD, los valores superiores a 7 replican las mismas lluvias críticas resultantes de Vstorage, ya que los valores de Mt son prácticamente iguales, al igual que su porcentaje de eliminación. Para valores menores de ADD, los valores de Mt cambian y, por lo tanto, también cambia el porcentaje de eliminación.

Aunque investigadores como *Clar et al., 2004*, citados por *Andrés-Doménech, 2010*, cuestionan el estudio de eventos de diseño para dimensionar tanques de tormenta ya que obvian el tiempo de separación de los eventos ADD (es decir, los días de tiempo seco previos); en esta investigación se verifica que, desde el punto de vista de la contaminación de sucesos desfavorables, más importante que el propio valor asumido de ADD, es su posición respecto al valor máximo posible de acumulación (MaxDD) en la zona estudiada. Para aplicar la metodología descrita en este documento a cualquier otra cuenca urbana, el ADD asumido debe estar muy cerca de la asíntota de la curva de acumulación DD elegida. Para hacer esta metodología más general y tener en cuenta diferentes valores de ADD, debería realizarse una corrección en el cálculo de la variable IEV: $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$. Puesto que, tanto Vt como Tt son variables independientes del ADD, la corrección se centraría en la variable $\uparrow Mt$.

$$\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt = K_1 \cdot \frac{Mt}{MaxDD} + K_2 \cdot \left(1 - \frac{Vt}{\max(Vt)}\right) + K_3 \cdot \frac{Tt}{\max(Tt)} \quad [C4-29]$$

Manteniendo:

$$K_1 = K_2 = K_3 = 3,33 \quad [C4-30]$$

y eliminando posiciones en la matriz de lluvias (lluvias I-D, Vstorage) en las que por ejemplo $\frac{Mt}{MaxDD} < 0,5$, no se tomarían en cuenta ADD's que provocasen situaciones desfavorables de contaminación con escorrentías asociadas poco contaminantes a diferencia de las que producirían ADD's con valores de acumulación de DD cercanos a la asíntota de la curva de acumulación asumida.

La metodología utilizada en esta investigación podría resumirse de la siguiente manera:

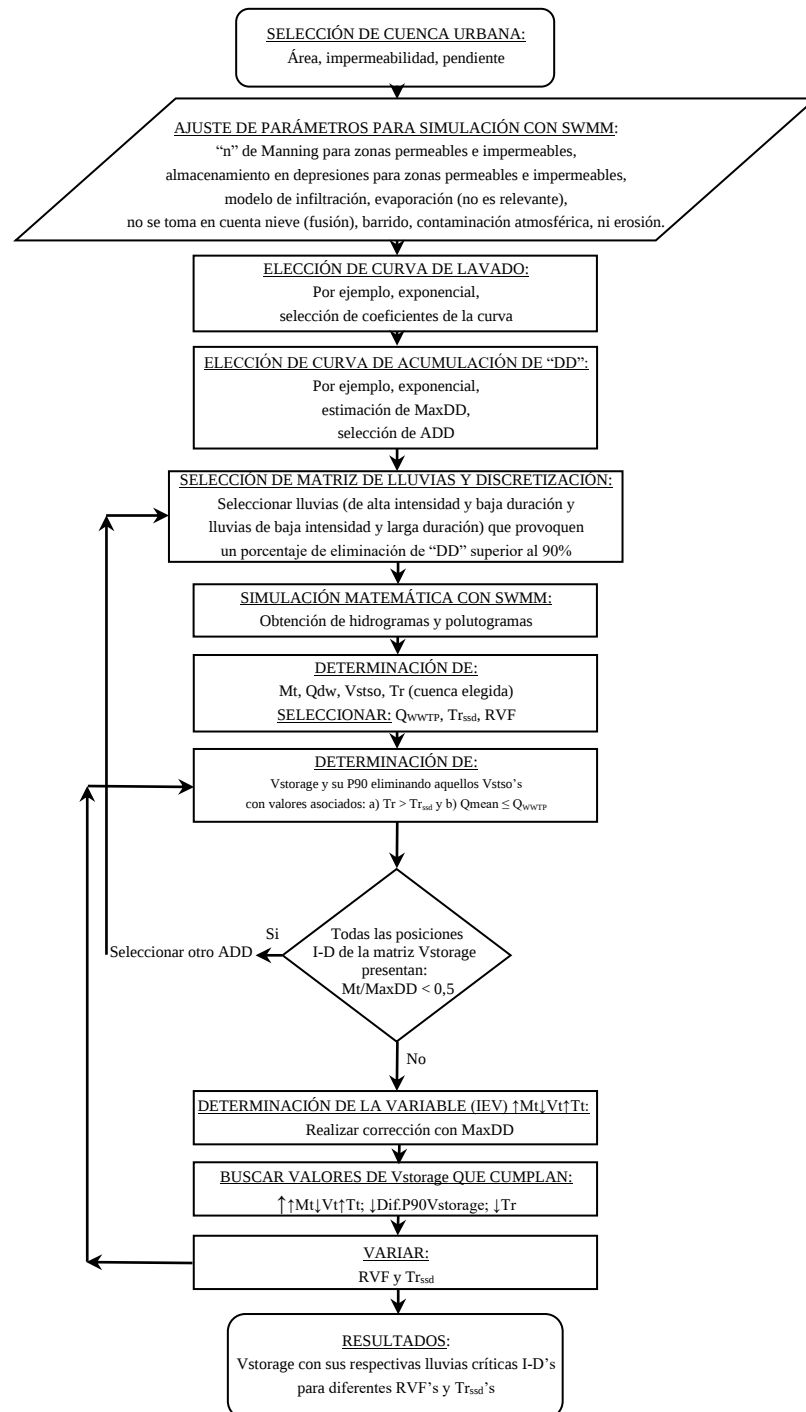


FIG.4.13 Diagrama de flujo de la metodología utilizada

4.2.5.- Conclusiones

En la matriz de lluvias, existe un área donde los polutogramas presentan valores de Clast mayores que C_p ; esto ocurre aproximadamente para intensidades de lluvia "I" superiores a 150 mm/h y duraciones "D" inferiores a 8 minutos, y para intensidades menores de 150 mm/h y duraciones "D" inferiores a 20 minutos [ver gráfico de contorno de $(C_{\text{last}} - C_p) > 0$ en el Anexo A4.8 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CONTAMINANTE TS]. En esta área, Clast puede tener valores de 2692,3 mg/L de TS, siendo mayor que C_p en 1194,8 mg/L (lluvia de $I = 100$ mm/h, $D = 2$ minutos). Al observar el polutograma de esta lluvia, se pudo verificar que este valor de Clast estaba acompañado por un caudal de escorrentía de 0,074 L/s. Por lo tanto, pueden existir polutogramas que, en su forma, en la parte final, presenten "colas" muy largas con valores de concentración muy altos acompañados por caudales muy pequeños, distorsionando así la representatividad, por ejemplo, de la variable C_m . Esto no ocurre con la variable EMC.

Al observar las correlaciones más representativas entre las variables (ver Anexo A4.9 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y DETERMINACIÓN ENTRE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CONTAMINANTE TS) se encontró que la intensidad de la lluvia "I" se correlacionó bastante bien con las variables Q_{fp} , F_p y Q_{max} , con valores $R \geq 0,972$. La variable EMC se correlacionó con C_{fp} con un $R = 0,932$ y con M_t con un $R = -0,897$, y la duración de la lluvia "D" se correlacionó con $T_{q\text{max}}$ con un valor $R = 0,861$. La variable $IEV \uparrow M_t \downarrow V_t \uparrow T_t$ se correlacionó con M_t con un $R = 0,927$ y con EMC con un $R = -0,808$. La variable Cr_{Fm} tuvo bajas correlaciones con las variables de caracterización de los polutogramas ($R \leq 0,210$). Cr_{Fp} se correlacionó con C_{fp} con un $R = -0,786$ y con EMC con un $R = -0,744$. Las variables $IEV \uparrow Cr_{Fm} \uparrow T_t$ y $\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot T_{fp}$ tuvieron bajas correlaciones con las variables de caracterización de los polutogramas; $R \leq -0,510$ y $R \leq -0,573$ respectivamente.

La variable IEV que permitió encontrar de mejor forma los polutogramas más desfavorables fue $\uparrow M_t \downarrow V_t \uparrow T_t$. Al observar el gráfico de esta IEV (ver Anexo A4.10 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES IEV'S PARA EL CONTAMINANTE TS), se pudo verificar que la desfavorabilidad de los polutogramas crece desde una duración de lluvia "D" más corta a una mayor. También, al tener en cuenta las isolíneas de la variable IEV y su Tr asociado en la matriz de lluvias, se puede concluir que la desfavorabilidad de los polutogramas crece desde una mayor intensidad de precipitación "I" a una menor. Así, los polutogramas más desfavorables se presentan para lluvias críticas de baja intensidad "I" y larga duración "D".

En el análisis de vertido de escorrentía a un medio receptor, al analizar la IEV ($\uparrow Cr_{Fm} \uparrow T_t$, Anexo A4.10 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES IEV'S PARA EL CONTAMINANTE TS y Tabla 4.8), se pudo verificar un comportamiento similar a la IEV comentada en el párrafo anterior; la tendencia de mayor desfavorabilidad es la misma en la matriz de lluvias. Es decir, las situaciones más

desfavorables también se presentan para lluvias críticas de baja intensidad "I" y larga duración "D".

La variable IEV ($\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot T_{fp}$, Anexo A4.10 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES IEV'S PARA EL CONTAMINANTE TS y Tabla 4.9) presenta sus valores más desfavorables para lluvias críticas de baja intensidad "I"; sin embargo, su desfavorabilidad es independiente de la duración de la lluvia "D" una vez alcanzado el tiempo T_{fp} en cada uno de los polutogramas analizados. Si T_{fp} se asemeja al tiempo de concentración de la cuenca, desde el punto de vista hidrológico, se podría afirmar que en la escorrentía (después de que haya transcurrido el tiempo de concentración de la cuenca urbana analizada), los sucesos desfavorables asociados a ella en condiciones punta, son independientes de la duración "D" de las precipitaciones.

Tomando un período de retorno de diseño $Tr_{ssd} = 10$ años (curvas IDF de Santander), los resultados obtenidos con la novedosa metodología propuesta para dimensionar tanques de tormenta fueron de 146,50 m³/ha imp para una retención del 100% del volumen total de escorrentía y de 117,20 m³/ha imp para una retención del 80%.

Esta investigación presenta una metodología novedosa para determinar volúmenes de retención de agua de escorrentía que permitan el diseño de tanques de tormenta para reboses de alcantarillado pluvial. Es aplicable a cualquier cuenca urbana; sin embargo, debe utilizarse el periodo de retorno Tr de la zona de estudio, especificando así la asignación de la probabilidad de ocurrencia de los eventos más desfavorables de contaminación causados por la escorrentía urbana en la cuenca de estudio.

La metodología propuesta se enmarca dentro de las estrategias de nivel N3 como criterios para el diseño de tanques de tormenta detallados en el "Manual Nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta" (AQUALOGY y GEAMA de la Universidad Da Coruña, 2014).

Una propuesta para futuras investigaciones se centraría en averiguar la posibilidad de extrapolar los resultados aquí descritos para cuencas urbanas con diferentes áreas, impermeabilidades y pendientes.



CAPÍTULO 5

Análisis e impacto del primer lavado (*First Flush*) y alternativas al ajuste potencial de las curvas $M(V)$ para su determinación

5.- ANÁLISIS E IMPACTO DEL PRIMER LAVADO (*FIRST FLUSH*) Y ALTERNATIVAS AL AJUSTE POTENCIAL DE LAS CURVAS M(V) PARA SU DETERMINACIÓN

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
ADD	Días de tiempo seco previos (días)
b	Exponente del ajuste potencial de la curva M(V)
bisectriz	Línea recta a 45° en el gráfico de la curva M(V)
bMiMt	Exponente del ajuste potencial de la curva M(V)
bMiMtTff	Exponente del ajuste potencial (exclusivamente durante el Tff) de la curva M(V)
BOD₅	Demanda bioquímica/biológica de oxígeno a los 5 días (mg/L)
C	Coeficiente de escorrentía del método racional
C	Concentración (mg/L)
C(t)	Variación de la concentración C en función del tiempo t dando lugar al polutograma
CA	Análisis de conglomerados
Cfp	Concentración (mg/L) a la que ocurre el Fp
Ci	Concentración (mg/L) al tiempo i
Clast	Última concentración (mg/L)
Cm	Concentración media (mg/L)
Cp	Concentración punta (mg/L)
D	Duración de lluvia (min)
DBO₅	Demanda bioquímica/biológica de oxígeno a los 5 días (mg/L)
DD	Acumulación (kg) de polvo y suciedad durante el tiempo ADD
DD₇	Acumulación de polvo y suciedad (kg) durante 7 días
Dif.P90Vstorage	Valor absoluto (m ³ /ha imp) de la diferencia entre Vstorage y P90
DynEMCi	Concentración media dinámica del evento ó EMC dinámica (mg/L) al tiempo i
DynEMCmean	Promedio de DynEMCi's (mg/L) durante el tiempo TffDynEMC
DynEMCmean/EMC	Relación promedio de la concentración media dinámica del evento
EMC	Concentración media del evento ó Concentración media ponderada (mg/L)
EMCTff	Concentración media del evento ó Concentración media ponderada (mg/L) durante Tff
F	Frecuencia asociada al período de retorno de una lluvia de una intensidad "I" y una duración "D"
F	Flujo másico (kg/min)
FF30	Fracción de carga contaminante lavada/arrastrada al 30% del volumen de escorrentía
FF50	Fracción de carga contaminante lavada/arrastrada al 50% del volumen de escorrentía

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
FF80	Fracción de carga contaminante lavada/arrastrada al 80% del volumen de escorrentía
Fi	Flujo másico (kg/min) al tiempo i
Fm	Flujo medio (kg/min)
Fp	Flujo punta (kg/min)
GAP	Brecha, es el valor de la resta ($M_i/M_t - V_i/V_t$)
GapmeanTff(M)	$\{[M_i/M_t - V_i/V_t] > 0\}$ i's promedio durante Tff
GapmeanTff(V)	$\{[V_i/V_t - M_i/M_t] > 0\}$ i's promedio durante Tv
ha imp	Hectárea impermeable
I	Intensidad de lluvia (mm/h)
I-D	Intensidad, duración
IDF	Intensidad, duración, frecuencia
M(V)	Curva normalizada de masa/volumen acumulada/o
MassGapmean	Carga contaminante de escorrentía (kg) asociada a GapmeanTff(M)
MassGapmeanrate	Tasa media de MassGapmean (kg/min) durante Tff
MaxDD	Máxima acumulación (kg) de polvo y suciedad en la cuenca urbana
Maxgap	Máxima brecha positiva entre la curva de masa acumulada normalizada y la curva de volumen acumulado normalizada
MFFR	Tasa de masa lavada durante el primer lavado
MFFRmean	MFFR's promedio durante el tiempo en el que $M_i/M_t > V_i/V_t$
Mi	Masa (kg) de contaminante lavado/arrastrado al tiempo i
MI	Índice de masa
MImean	Es el promedio de los valores de MI's
MiTf	Fracción de masa acumulada lavada de contaminante (M_i/M_t) al tiempo Tf
MiTo	Fracción de masa acumulada lavada de contaminante (M_i/M_t) al tiempo To
Mt	Carga total de contaminante de la escorrentía (kg)
Mt/DD₇ (%)	Porcentaje (%) de carga total de contaminante de la escorrentía con respecto a la acumulación de polvo y suciedad durante 7 días
MTff	Masa (kg) de contaminante lavado durante Tff
Mtffrate	Tasa de lavado de contaminante (kg/min) durante Tff
n	Coeficiente de rugosidad de Manning
n	Contador o índice superior del símbolo de suma
NT	Nitrógeno total (mg/L)
P	Precipitación (mm)
P(t)	Variación de la precipitación P en función del tiempo t
P90	Percentil 90
PC1	Primer componente principal
PC2	Segundo componente principal
PC3	Tercer componente principal
PCA	Análisis de componentes principales

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
Q	Caudal (L/s)
Q(t)	Variación del caudal Q en función del tiempo t dando lugar al hidrograma
Qdw	Caudal medio (L/s/ha) de tiempo seco
Qfp	Caudal (L/s) al que ocurre el Fp
Qi	Caudal (L/s) al tiempo i
Qmax	Caudal máximo (L/s)
Qmean	Caudal medio (L/s)
Q_{WWTP}	Caudal (L/s) de agua de escorrentía que se admite a tratamiento en la EDAR
R	Coeficiente de correlación
R²	Coeficiente de determinación
R2MiMt	Coeficiente de determinación del ajuste de la curva M(V)
R2MiMtTff	Coeficiente de determinación del ajuste potencial (exclusivamente durante el Tff) de la curva M(V)
RVF	Fracción (%) de volumen retenido de Vstso
ST	Sólidos totales (mg/L)
Tclast	Tiempo (min) al que ocurre la Clast
Tcp	Tiempo (min) al que ocurre la Cp
Tdose	Dosis-Tiempo de exposición
TdoseTff	Dosis-Tiempo de exposición durante el tiempo Tff
Tf	Tiempo de finalización (min) de la condición: $M_i/M_t > V_i/V_t$
TfDynEMC	Tiempo de finalización (min) de la condición: $DynEMC_i > EMC$
Tff	Duración del tiempo (min) en el que $M_i/M_t > V_i/V_t$. Tiempo en el que los valores de la curva M(V) están por encima de la bisectriz de la gráfica
TffDynEMC	Duración del tiempo (min) en el que $DynEMC_i > EMC$
Tffθ	Duración del tiempo (min) en el que $\theta_i > 45^\circ$
Tfp	Tiempo (min) al que ocurre el Fp
Tfθ	Tiempo de finalización (min) de la condición: $\theta_i > 45^\circ$
Tmaxgap	Tiempo (min) en el que se produce el Maxgap
TN	Nitrógeno total (mg/L)
To	Tiempo de inicio (min) de la condición: $M_i/M_t > V_i/V_t$
ToDynEMC	Tiempo de inicio (min) de la condición: $DynEMC_i > EMC$
Toθ	Tiempo de inicio (min) de la condición: $\theta_i > 45^\circ$
Tqmax	Tiempo (min) al que ocurre el Qmax
Tr	Período de retorno (años)
Tr_{ssd}	Periodo de retorno de diseño de alcantarillado pluvial (años)
TS	Sólidos totales (mg/L)
TSS	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Tt	Duración de la escorrentía (min)
Tv	Duración del tiempo (min) en el que $V_i/V_t > M_i/M_t$. Tiempo en el que los valores de la curva M(V) están por debajo de la bisectriz de la gráfica

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
Vi	Volumen de escurrentía (m^3) al tiempo i
ViTf	Fracción del volumen de escurrentía acumulado (V_i/V_t) al tiempo Tf
ViTo	Fracción del volumen de escurrentía acumulado (V_i/V_t) al tiempo To
Vloss	Volumen de pérdidas (m^3)
VolGapmean	Volumen de escurrentía (m^3) asociado con GapmeanTff(V)
VolGapmeanrate	Tasa media de VolGapmean (m^3/min) durante Tv
Vrain	Volumen de precipitación (m^3)
Vstorage	Volumen (m^3/ha imp) del depósito de almacenamiento del rebose de alcantarillado pluvial
Vstso	Rebose de alcantarillado pluvial (m^3/ha imp)
Vt	Volumen total de escurrentía (m^3)
VTff	Volumen de escurrentía (m^3) durante Tff
Vtffrate	Tasa media de VTff (m^3/min) durante Tff
WWTP	Estación depuradora de agua residual
α	Exponente (valor adimensional) de ajuste de la curva Dosis – Tiempo de Exposición
β	Exponente (valor adimensional) de ajuste de la curva Dosis – Tiempo de Exposición
Δi	Ángulo en ($^\circ$), es la $\tan^{-1} [b \cdot (V_i/V_t)^{(b-1)}]$ de la curva M(V) al tiempo i
Δ_{mean}	Δi 's promedio ($^\circ$)
Δ_{mean45}	Δi 's promedio ($^\circ$) de los ángulos $\Delta i \leq 45^\circ$
θi	Ángulo en ($^\circ$), es la $\tan^{-1} (M_i/M_t)/(V_i/V_t)$ de la curva M(V) al tiempo i
θ_{mean}	θi 's promedio ($^\circ$)
$\theta_{mean'}$	θi 's promedio ($^\circ$) del caso específico estudiado durante el tiempo Tff θ
%MassGapmean	Porcentaje (%) de MassGapmean respecto a la carga total de contaminante de escurrentía Mt
%MTff	Porcentaje (%) de MTff respecto a la carga total de contaminante de escurrentía Mt
%VolGapmean	Porcentaje (%) de VolGapmean respecto al volumen total de escurrentía Vt
%VTff	Porcentaje (%) de VTff respecto al volumen total de escurrentía Vt

5.1.- PENDIENTE (θ_i) Y TANGENTE (Δi) DE LA CURVA M(V) COMO ALTERNATIVAS PARA EL ESTUDIO DEL PRIMER LAVADO

5.1.1.- Resumen

En el entorno urbano, uno de los flujos más representativos de agua y contaminación es la escorrentía urbana. En este proceso, como consecuencia de este arrastre/lavado inicial, se presenta una condición crítica de contaminación conocida como primer lavado (“*First Flush*” en inglés). En las últimas décadas, varios investigadores han estudiado el fenómeno del primer arrastre utilizando curvas adimensionales M(V). Cada curva M(V) real puede mediante una regresión lineal ajustarse aproximadamente a una función de tipo potencial $Y=X^b$, pero existe un problema: no todas las curvas M(V) reales presentan buenos ajustes a una función potencial. Los coeficientes de determinación R^2 que estas pueden presentar pueden ser deficientes (con valores muy por debajo de 1). Esto se debe a que las curvas M(V) reales pueden tener muy diversas formas. Con base en estas consideraciones, el objetivo de este estudio es desarrollar una nueva metodología para evaluar la ocurrencia del primer lavado y su categorización en función de su intensidad. Para ello, se emplean los ángulos θ_i y Δi en la curva M(V) como nuevas variables para el estudio del primer lavado y como alternativas novedosas para su caracterización. Se encontró que la variable θ_i y el cálculo de θ_{mean} basado en $\theta_i > 45^\circ$ permiten el estudio del primer lavado sin la necesidad de depender de la realización de una regresión lineal como herramienta para aproximar la forma de una curva M(V) real a una de tipo potencial.

5.1.2.- Introducción

En las últimas décadas, la contaminación del agua, y específicamente de los cuerpos receptores, ha ido en aumento debido al gran crecimiento de la población mundial y las actividades antropogénicas (Lee *et al.*, 2005; Rodríguez Hernández *et al.*, 2013; Al Mamoon *et al.*, 2019; Gorgoglione *et al.*, 2019; Perera *et al.*, 2019; Todeschini *et al.*, 2019; Jensen *et al.*, 2022; Jiménez *et al.*, 2022; Kourtis *et al.*, 2022; Lapointe *et al.*, 2022; Russo *et al.*, 2023). A esto se suma el cambio climático global que provoca, además de variabilidad en las condiciones meteorológicas, flujos de agua y de masas contaminantes que previamente no ocurrían en su magnitud, ubicación geográfica e impacto ambiental (Kuller *et al.*, 2017; Egemose *et al.*, 2020; Müller *et al.*, 2020; Kourtis *et al.*, 2022; Ramezani *et al.*, 2023).

Uno de los flujos más representativos de agua y contaminación mencionados es la escorrentía urbana. En periodos de clima seco, el polvo y la suciedad se acumulan en las superficies y, cuando ocurre un evento de precipitación, el agua de escorrentía producida arrastra esta contaminación, generando puntas de caudal y concentración que provocan graves problemas en los diferentes medios receptores (estaciones depuradoras de aguas residuales, ríos, lagos, embalses, el mar) (Park *et al.*, 2015; Clark *et al.*, 2007 citados por Hong *et al.*, 2017; Freni *et al.*, 2009b; Zawilski y Dziedziela, 2018; Perera *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2019). La escorrentía también puede arrastrar la contaminación acumulada en periodos secos en los diferentes elementos de

transporte y almacenamiento temporal de aguas pluviales (redes de alcantarillado separativas) o incluso, de aguas residuales de alcantarillado combinado.

En estos procesos, como consecuencia de este arrastre/lavado inicial, se presenta una condición crítica de contaminación conocida como primer lavado (*“First Flush”* en inglés). El primer lavado consiste en la escorrentía inicial de una tormenta que típicamente está más concentrada en comparación con el resto de esta (Lee *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2007a; Alias *et al.*, 2013; Qin *et al.*, 2016; Egemose *et al.*, 2020; Mamun *et al.*, 2020). Así, el caudal en la etapa inicial de un evento de escorrentía contiene cantidades considerablemente mayores de contaminantes en comparación con los de la última fase del evento (Maniquiz-Redillas *et al.*, 2022).

El primer lavado muestra la presencia de altos niveles de contaminantes y, por lo tanto, su vertido inmediato en los medios receptores causa grandes impactos. En consecuencia, muchos investigadores destacan la importancia de retener y almacenar los volúmenes de escorrentía producidos en los minutos iniciales de las tormentas como una medida para mitigar los efectos adversos de esta contaminación eventual y pronunciada (Artina *et al.*, 2007; Mambretti y Sanfilippo, 2011; Qin *et al.*, 2016).

En las últimas décadas, varios investigadores han estudiado el fenómeno del primer lavado, y su definición sigue siendo un tema sujeto a debate. En la literatura, se han propuesto numerosas formulaciones para evaluar la ocurrencia del primer lavado (Russo *et al.*, 2023). Una de las más comunes es el uso de la curva M(V) obtenida de la representación adimensional en sus ejes de los valores de incrementos relativos de masa con respecto a los incrementos relativos de volumen durante un evento. Helsel *et al.*, 1979 citados por Russo *et al.*, 2023, mencionan en su artículo que ya en 1977, dos autores describieron el uso de esta herramienta para describir el primer lavado. Específicamente, describieron que el primer lavado ocurre cuando la carga incremental supera el flujo incremental, o cuando la razón carga incremental/flujo incremental es mayor que 1. Posteriormente, Saget *et al.*, 1996 y Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998 también afirmaron que, para comparar diferentes eventos, una curva adimensional es más pertinente y que, por esta razón, para estudiar la distribución de la carga contaminante, se puede usar para cada evento y cada contaminante, la carga acumulada dividida por la carga total de contaminación frente al volumen acumulado dividido por el volumen total del evento. Sin embargo, Saget *et al.*, 1996 propusieron realizar una regresión lineal para ajustar los valores de la curva M(V) a una función de tipo potencial $Y=X^b$ y, dependiendo de los valores de "b" obtenidos, categorizar los tipos de primer lavado definiendo seis áreas/zonas en el gráfico adimensional. Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998 describieron lo mismo en su artículo, definiendo una brecha entre la curva M(V) y la bisectriz.

Shamseldin, 2011 adaptó el gráfico propuesto por Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998, describiendo mejor los rangos de “b” y definiendo el tipo de primer lavado según las seis zonas diferentes descritas:

Value of b	Zone	Description
$0 \leq b < 0.185$	1	Strong first flush
$0.185 \leq b < 0.862$	2	Moderate first flush
$0.862 \leq b < 1.00$	3	Weak First flush
$1 \leq b < 1.159$	4	No first flush
$1.159 \leq b < 5.395$	5	No first flush with Moderate pollutant delay
$5.395 \leq b < \infty$	6	No first flush with strong pollutant delay

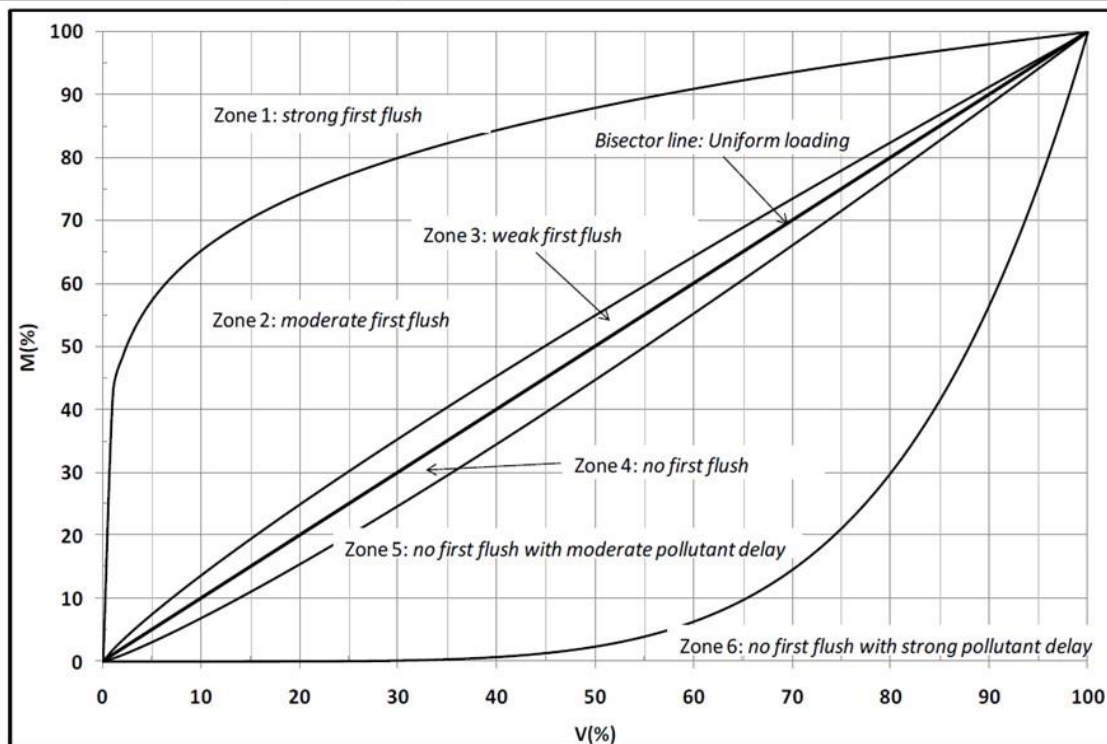


FIG.5.1 Tipología de las curvas $M(V)$ en función del parámetro “b” (Shamseldin, 2011)

Cada curva $M(V)$ real puede ajustarse aproximadamente a una función de potencia $Y=X^b$ (Saget *et al.*, 1996; Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998; Di Modugno *et al.*, 2015; Russo *et al.*, 2023), pero existe un problema: no todas las curvas $M(V)$ reales presentan buenos ajustes a una función potencial. Los coeficientes de determinación R^2 que estas pueden presentar pueden ser deficientes (con valores muy por debajo de 1). Esto se debe a que las curvas $M(V)$ reales pueden tener muchas formas diferentes, como puede observarse, por ejemplo, en la FIG.5.14. Existe la posibilidad de que un lavado de contaminantes se observe en la salida del drenaje en cualquier momento del evento de una tormenta, en respuesta a las puntas en la intensidad de la lluvia o escorrentía (Aryal *et al.*, 2005 citado por Morgan *et al.*, 2017).

Basado en estas consideraciones, el objetivo de este estudio es desarrollar una nueva metodología para evaluar la ocurrencia del primer lavado y su categorización en función de su intensidad. Para ello, se buscan parámetros/variables que permitan llevar a cabo lo anterior sin la necesidad de depender de la realización de regresiones lineales como herramienta para aproximar la forma de una curva $M(V)$ real a una de tipo

potencial. Así, se proponen y analizan los ángulos θ_i y Δ_i como posibles alternativas. Estos ángulos se describen a continuación.

5.1.3.- Metodología

5.1.3.1.- Definición gráfica de los ángulos θ_i y Δ_i

Para el punto "i" de la curva $M(V)$ podemos definir gráficamente los ángulos θ_i y Δ_i :

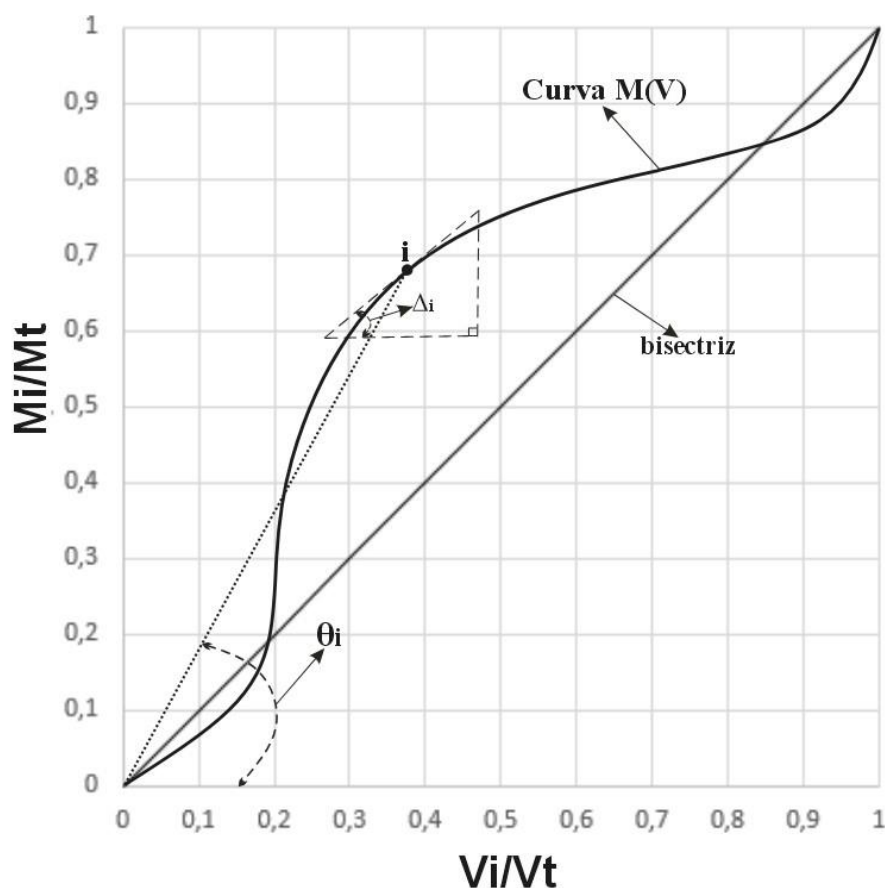


FIG.5.2 Definición gráfica de los ángulos θ_i y Δ_i

5.1.3.2.- Formulación matemática de los ángulos θ_i y Δ_i

a) Ángulo θ_i

Para este ángulo se cumple que:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[\frac{\left(\frac{M_i}{M_t} \right)}{\left(\frac{V_i}{V_t} \right)} \right] \quad [C5-1]$$

b) Ángulo Δ_i

Estimar este ángulo es más complicado. Una de las alternativas sería realizar previamente un ajuste de regresión lineal de la curva $M(V)$ partiendo de la hipótesis $Y = X^b$, es decir:

$$\frac{M_i}{M_t} = \left(\frac{V_i}{V_t} \right)^b \quad [C5-2]$$

Regresión lineal:

$$\ln \left(\frac{M_i}{M_t} \right) = b \cdot \ln \left(\frac{V_i}{V_t} \right) \quad [C5-3]$$

obteniendo el exponente “b” con un coeficiente de determinación asociado R^2 .

Lógicamente, cuanto mejor sea el ajuste ($R^2 \approx 1$) la curva “ajustada” será más parecida a la curva $M(V)$ real.

Si en el punto “i” trazamos una tangente a la curva “ajustada” $Y = X^b$, podemos calcular la pendiente de la tangente trazada calculando su primera derivada (dY/dX):

$$\frac{dY}{dX} = b \cdot X^{b-1} \quad [C5-4]$$

y la pendiente es la tangente del ángulo Δi :

$$\tan(\Delta i) = b \cdot X^{b-1} \quad [C5-5]$$

y el ángulo será:

$$\Delta i = \tan^{-1}(b \cdot X^{b-1}) \quad [C5-6]$$

Para el punto “i” de la curva $M(V)$ ajustada:

$$\Delta i = \tan^{-1} \left[b \cdot \left(\frac{V_i}{V_t} \right)^{b-1} \right] \quad [C5-7]$$

La veracidad del valor del ángulo así obtenido dependerá de la bondad del ajuste lineal realizado, es decir, del valor del coeficiente de determinación R^2 obtenido en el ajuste.

Un cálculo más realista de Δi podría ser, por ejemplo, calculando la pendiente de la curva $M(V)$ a partir de tres de sus puntos de coordenadas $(V_{i-1}/V_t ; M_{i-1}/M_t)$, $(V_i/V_t ; M_i/M_t)$, $(V_{i+1}/V_t ; M_{i+1}/M_t)$, metodología que no fue desarrollada en este artículo.

5.1.3.3.- Estudio de los ángulos θ_i y Δ_i

Para observar el comportamiento y los beneficios que pueden proporcionar estos ángulos, se han calculado asumiendo los diferentes valores de “b” descritos en la FIG.5.1 y con incrementos de 0,05 en el eje de abscisas V_i/V_t .

Se han calculado también los valores de los ángulos definidos a continuación para observar si pueden ayudar a caracterizar el primer lavado que puede presentar cualquier curva posible $M(V)$:

$$\theta_{mean} = \left(\sum_{i=1}^n \theta_i \right) / n \quad [C5-8]$$

$$\Delta_{mean} = \left(\sum_{i=1}^n \Delta_i \right) / n \quad [C5-9]$$

$$\Delta_{mean45} = \left(\sum_{i=1}^{\Delta_i=45^\circ} \Delta_i \right) / n \quad [C5-10]$$

donde:

n: es el número de puntos totales donde se han calculado los ángulos θ_i y Δ_i .

Adicionalmente, después de calcular estos ángulos, para cada ángulo se observa en la curva $M(V)$ a qué V_i/V_t y M_i/M_t corresponde dicho ángulo y así estimar el V_i necesario para eliminar el M_i correspondiente. Estos valores se determinan para ser utilizados como parámetros representativos del evento que permitan comparar la desfavorabilidad de las distintas curvas $M(V)$ y por tanto de sus polutogramas correspondientes.

5.1.4.- Resultados

5.1.4.1.- Valores resultantes

Utilizando las fórmulas descritas anteriormente y la hoja Excel que se encuentra en el Anexo A5.1 HERRAMIENTA PARA GENERAR CURVAS $M(V)$ CON DISTINTOS VALORES DE “b” se pueden obtener las siguientes figuras:

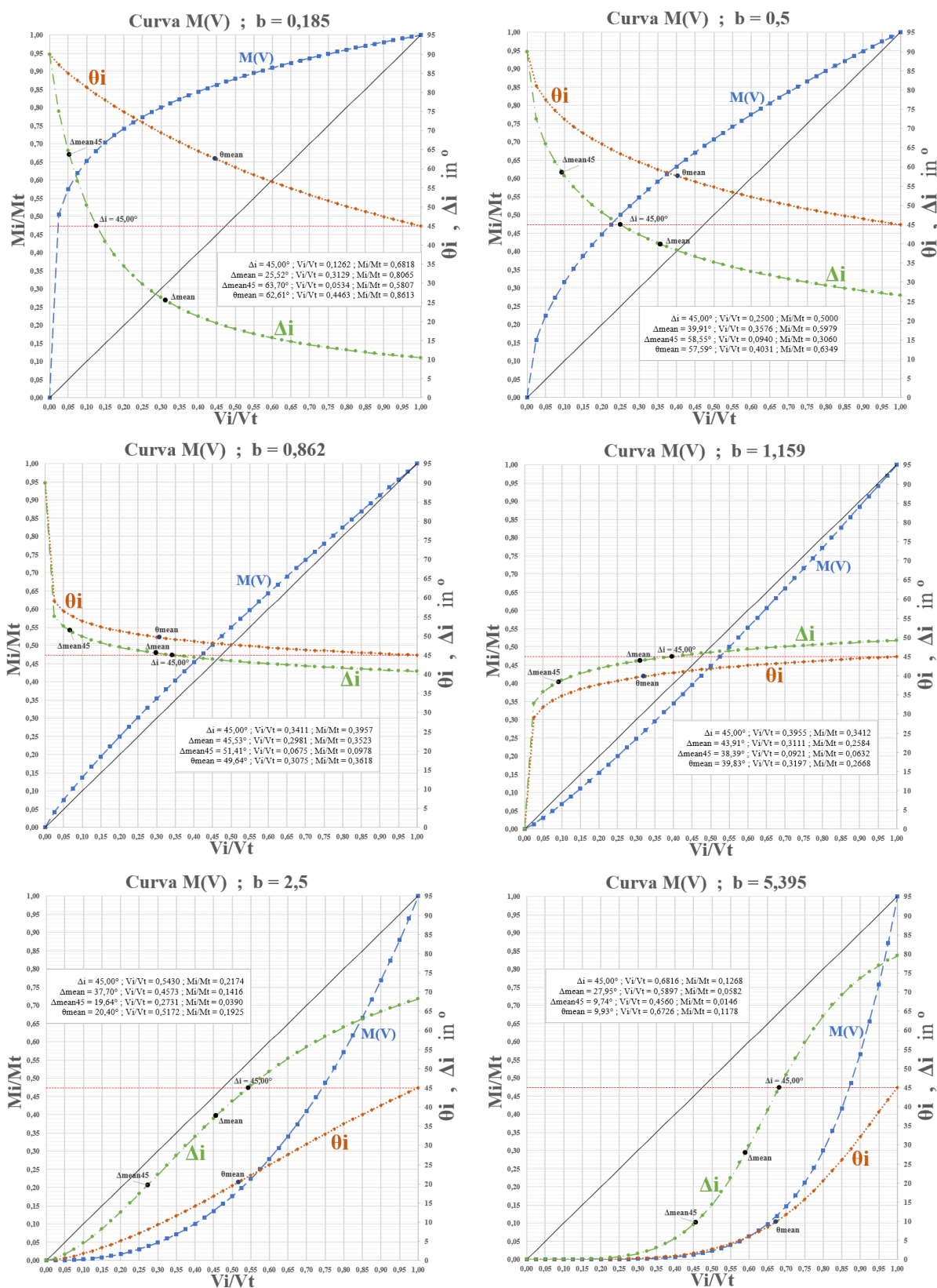


FIG.5.3 Curvas [M(V), θ_i , Δ_i] para los diferentes tipos de primer lavado

5.1.4.2.- Posibles nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando θ_i y Δ_i

Como criterio alternativo a los rangos "b" para definir qué tan intenso puede ser el primer lavado, se buscan criterios con comportamiento homogéneo a lo largo del eje V_i/V_t . Es decir, preferentemente crecientes o decrecientes en todo el eje y que no cambien de signo.

Observando los gráficos de la FIG.5.3 se proponen los siguientes criterios:

Tabla 5.1 Criterios alternativos para analizar polutogramas desfavorables

Criterio	Descripción	Significado
1	$\Delta_i = 45^\circ$	Para las curvas $M(V)$ que se encuentran por encima de la bisectriz, Δ_i disminuye hasta alcanzar los 45° , lo que significaría que el primer flujo es más fuerte en esta sección. Para las curvas $M(V)$ que se encuentran debajo de la bisectriz, Δ_i aumenta a medida que V_i/V_t aumenta. En el punto de la curva Δ_i donde se da $\Delta_i = 45^\circ$, se observarían sus correspondientes valores asociados V_i/V_t y M_i/M_t en la curva $M(V)$, para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.
2	Δ_{mean}	Para las curvas $M(V)$ que se encuentran por encima de la bisectriz, a un valor más bajo de Δ_{mean} debe asociarse un primer lavado más intenso ($\downarrow \Delta_{mean} \downarrow b$). Para las curvas $M(V)$ que se encuentran debajo de la bisectriz, Δ_{mean} disminuye a medida que "b" aumenta. Cualquier curva $M(V)$ que se aleje de la forma de la línea bisectriz, tendrá valores de $\Delta_i \neq 45^\circ$. De tal forma que valores más bajos de Δ_{mean} implicarían curvas $M(V)$ "más abiertas" con respecto a la bisectriz. En el punto de la curva Δ_i donde se da Δ_{mean} , se observarían sus correspondientes valores asociados V_i/V_t y M_i/M_t en la curva $M(V)$, para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.
3	Δ_{mean45}	Para todas las curvas $M(V)$, a un valor más alto de Δ_{mean45} debe asociarse un primer lavado más intenso ($\uparrow \Delta_{mean45} \downarrow b$). En el punto de la curva Δ_i donde se da Δ_{mean45} , se observarían sus correspondientes valores asociados V_i/V_t y M_i/M_t en la curva $M(V)$, para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.
4	θ_{mean}	A un valor más alto de θ_{mean} se debe asociar un primer lavado más intenso ($\uparrow \theta_{mean} \downarrow b$). Los valores de $\theta_{mean} > 45^\circ$ denotan curvas $M(V)$ que se encuentran por encima de la bisectriz y valores de $\theta_{mean} < 45^\circ$ curvas debajo de ella. En el punto de la curva θ_i donde se da θ_{mean} , se observarían sus correspondientes valores asociados V_i/V_t y M_i/M_t en la curva $M(V)$, para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.

Para evaluar y poder comparar los criterios anteriores con sus respectivos pares de valores asociados (V_i/V_t ; M_i/M_t) se realizan las siguientes reflexiones:

- Cuanto mayor sea el valor de M_i/M_t respecto a V_i/V_t significa que el primer lavado será más intenso; por lo tanto, esto corresponderá a valores más altos de la resta ($M_i/M_t - V_i/V_t$).
- Para comparar los valores de esta resta para diferentes criterios, podemos relativizar la mencionada resta respecto a V_i/V_t , obteniendo la expresión $(M_i/M_t - V_i/V_t) / (V_i/V_t)$. Cuanto menor sea el valor de V_i/V_t (menor valor del denominador), mayor será el resultado de la mencionada división, que llamaremos a partir de este instante, índice de masa “MI”.

$$MI = \frac{\left(\frac{M_i}{M_t} - \frac{V_i}{V_t}\right)}{\left(\frac{V_i}{V_t}\right)} = \frac{\left(\frac{M_i}{M_t}\right)}{\left(\frac{V_i}{V_t}\right)} - 1 \quad [C5-11]$$

MI = Índice de masa

MI tendrá valores positivos cuando $[(M_i/M_t) / (V_i/V_t)]$ sea mayor que 1 y por tanto habrá un adelanto de la masa lavada/arrastrada respecto al volumen de agua desplazada. Por tanto, denotará la existencia de un primer lavado. Cuanto mayor sea su valor positivo, más intenso será dicho primer lavado.

MI tendrá valores negativos cuando $[(M_i/M_t) / (V_i/V_t)]$ sea menor que 1 y por tanto habrá un retraso de la masa lavada/arrastrada respecto al volumen de agua desplazada. Cuanto más negativo sea su valor, denotará la inexistencia del primer lavado.

MI será igual a 0 cuando no haya adelanto ni retraso de la masa lavada/arrastrada; es decir, cuando $[(M_i/M_t) / (V_i/V_t)]$ sea igual a 1 y corresponde a un punto de la bisectriz de la curva $M(V)$.

5.1.4.3.- Resultados de los nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando las curvas $[M(V), \theta_i, \Delta_i]$

Para analizar si se cumplen los criterios descritos se utilizan las curvas $[M(V), \theta_i, \Delta_i]$ de la FIG.5.3 y la Ecuación [C5-11].

Tabla 5.2 Resultados de los criterios alternativos para analizar polutogramas desfavorables

“b”	Criterio	Ángulo (°)	Vi/Vt	Mi/Mt	MI
0,185	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,1262	0,6818	4,4010
	$\Delta mean$	25,52	0,3129	0,8065	1,5777
	$\Delta mean45$	63,70	0,0534	0,5807	9,8664
	$\theta mean$	62,61	0,4463	0,8613	0,9298
0,500	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,2500	0,5000	1,0000
	$\Delta mean$	39,91	0,3576	0,5979	0,6720
	$\Delta mean45$	58,55	0,0940	0,3060	2,2561
	$\theta mean$	57,59	0,4031	0,6349	0,5749
0,862	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,3411	0,3957	0,1599
	$\Delta mean$	45,53	0,2981	0,3523	0,1817
	$\Delta mean45$	51,41	0,0675	0,0978	0,4479
	$\theta mean$	49,64	0,3075	0,3618	0,1766
0,950	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,3587	0,3775	0,0526
	$\Delta mean$	45,96	0,1839	0,2001	0,0883
	$\Delta mean45$	49,14	0,0248	0,0298	0,2025
	$\theta mean$	47,39	0,1884	0,2048	0,0869
0,99999	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,3681	0,3681	0,0000
	$\Delta mean$	45,00	0,0260	0,0260	0,0000
	$\Delta mean45$	45,00	0,0237	0,0237	0,0000
	$\theta mean$	45,00	0,0260	0,0260	0,0000
1,00001	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,3681	0,3681	0,0000
	$\Delta mean$	45,00	0,0260	0,0260	0,0000
	$\Delta mean45$	45,00	0,0237	0,0237	0,0000
	$\theta mean$	45,00	0,0260	0,0260	0,0000
1,159	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,3955	0,3412	-0,1371
	$\Delta mean$	43,91	0,3111	0,2584	-0,1693
	$\Delta mean45$	38,39	0,0921	0,0632	-0,3145
	$\theta mean$	39,83	0,3197	0,2668	-0,1657
2,500	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,5430	0,2174	-0,5996
	$\Delta mean$	37,70	0,4573	0,1416	-0,6904
	$\Delta mean45$	19,64	0,2731	0,0390	-0,8571
	$\theta mean$	20,40	0,5172	0,1925	-0,6277
5,395	$\Delta i = 45^\circ$	45,00	0,6816	0,1268	-0,8139
	$\Delta mean$	27,95	0,5897	0,0582	-0,9013
	$\Delta mean45$	9,74	0,4560	0,0146	-0,9681
	$\theta mean$	9,93	0,6726	0,1178	-0,8248

En esta tabla, para cada criterio, es posible observar los diferentes valores de almacenamiento (V_i/V_t) y sus correspondientes fracciones de eliminación de contaminación (M_i/M_t) y por tanto su MI.

5.1.5.- Discusión

Con los valores de la Tabla 5.2 se pueden hacer los siguientes comentarios y gráficos:

5.1.5.1.- Comentarios sobre el criterio N°1 ($\Delta i = 45^\circ$)

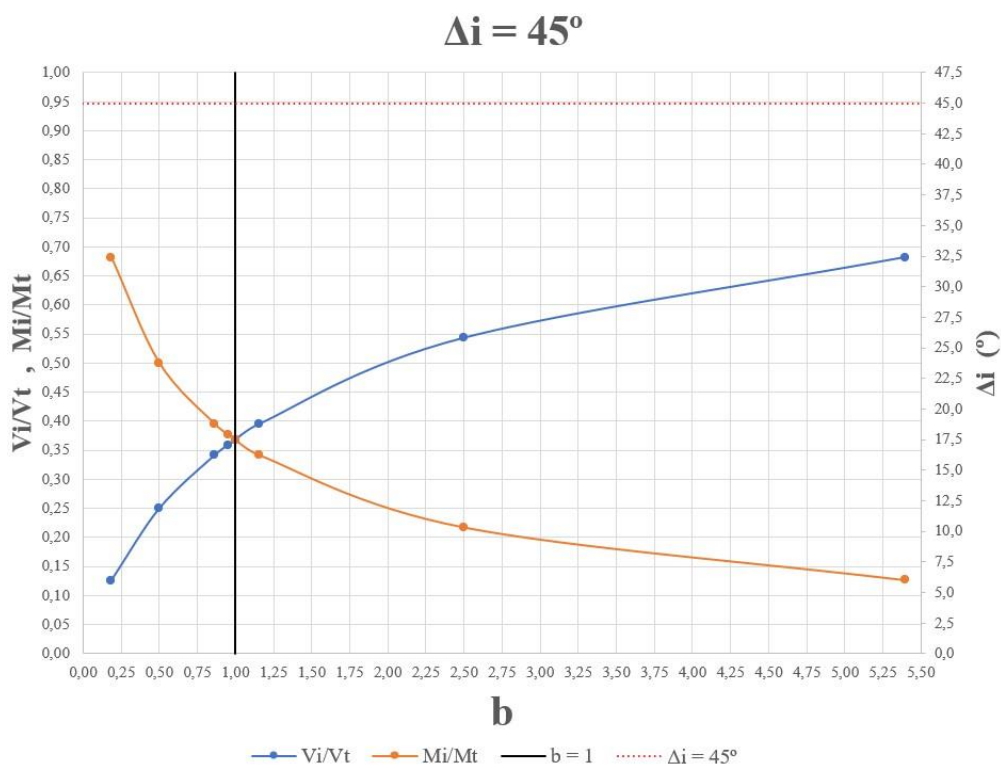


FIG.5.4 Valores de V_i/V_t y M_i/M_t para diferentes “b” (Criterio N°1 $\Delta i = 45^\circ$)

En este criterio, en la figura anterior se puede observar que a medida que “b” aumenta, V_i/V_t también aumenta y la fracción de masa “lavada” M_i/M_t disminuye. Cuanto mayor es la intensidad del lavado, menor volumen V_i debe ser “almacenado” para controlar la masa M_i lavada.

La línea vertical en $b = 1$ marca la posición de la bisectriz de la curva $M(V)$. Por lo tanto, a la izquierda de esta línea se encuentra el primer lavado (“First Flush”) y a la derecha no hay primer lavado, según la definición de *Bertrand-Krajewski et al., 1998*.

En principio, este criterio podría servir para categorizar el primer lavado, pero no está claro que se pueda utilizar para comparar la desfavorabilidad de las diferentes curvas $M(V)$ debido a los siguientes inconvenientes:

- El cálculo de Δi en curvas reales $M(V)$ no es sencillo ni rápido. En este estudio, se realiza bajo el supuesto simplificado de que la curva $M(V)$ se ajusta perfectamente a una función de tipo potencial $Y = X^b$ y, por lo tanto, Δi se calcula a partir de la primera derivada de dicha ecuación. En la Ecuación [C5-

7] se puede ver que Δi depende de los valores de "b". Así que; su veracidad dependerá de que los valores de R^2 del ajuste potencial sean iguales a 1 o muy cercanos a 1; de lo contrario, los valores de Δi no serían apropiados y, por lo tanto, no deberían tomarse en cuenta.

- Las curvas reales $M(V)$ pueden presentar formas muy diferentes que obligarían a calcular en varios puntos donde se daría $\Delta i = 45^\circ$, como se puede observar en la FIG.5.14. Se podrían utilizar métodos matemáticos para calcular Δi en las curvas reales $M(V)$, por ejemplo, aproximar la tangente de la curva real $M(V)$ en un punto B mediante la secante $\overline{AC}$ en tres puntos consecutivos ABC de esa curva. Cuanto más cercanos estén estos puntos entre sí, mejor. O lo que es lo mismo, calcular la pendiente de la curva $M(V)$ a partir de tres puntos consecutivos con coordenadas $(V_{i-1}/V_t ; M_{i-1}/M_t)$, $(V_i/V_t ; M_i/M_t)$, $(V_{i+1}/V_t ; M_{i+1}/M_t)$ de la misma; metodología que no se desarrolló en este estudio porque el objetivo es hallar métodos alternativos simples. Otra alternativa podría ser utilizar un método gráfico dibujando paralelas a la bisectriz del gráfico para encontrar los puntos donde se cumple $\Delta i = 45^\circ$. Sin embargo, ambos métodos tienen su complejidad. Además, el hecho de que una curva $M(V)$ tenga varios puntos donde se cumple $\Delta i = 45^\circ$ complicaría el uso del criterio en cuestión, porque no aclararía la categorización del primer lavado o la comparación de la desfavorabilidad de las diferentes curvas $M(V)$.

5.1.5.2.- Comentarios sobre el criterio N°2 (Δ_{mean})

Análogamente al caso anterior:

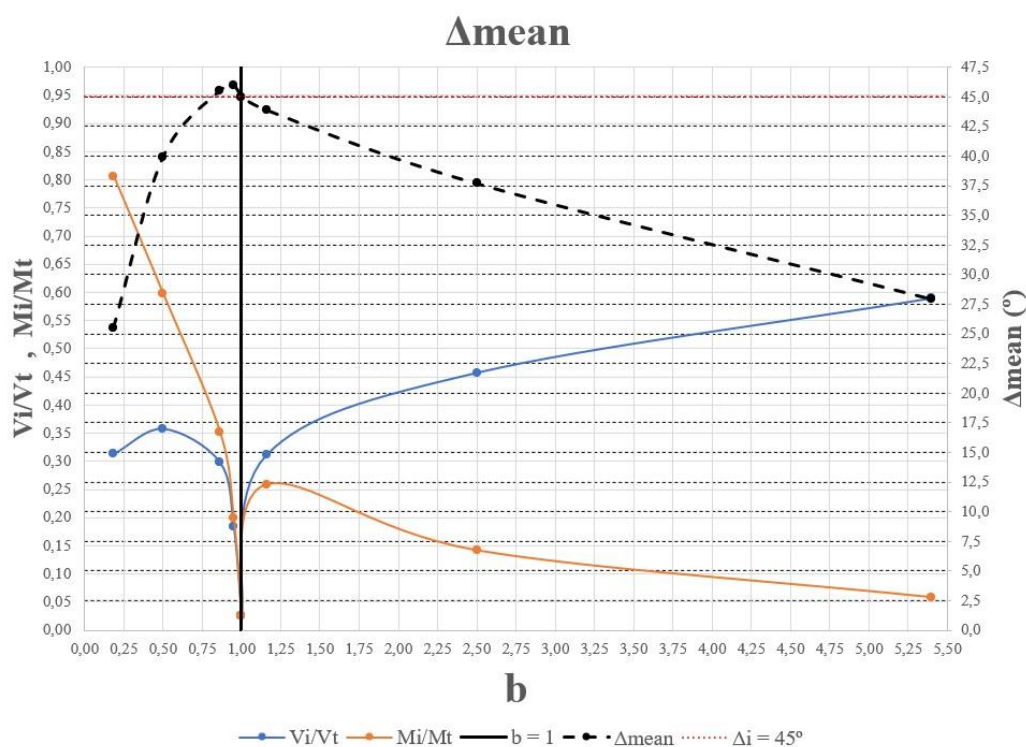


FIG.5.5 Valores de V_i/V_t , M_i/M_t y Δ_{mean} para diferentes "b" (Criterio N°2 Δ_{mean})

En este criterio, en la figura anterior se puede observar que la variable Δ_{mean} (a la izquierda de $b = 1$) aumenta a medida que disminuye la intensidad del primer lavado y decrece desde $b = 1$ hacia la derecha.

A este criterio, además de las desventajas mencionadas en el criterio anterior para el cálculo de Δ_i se le añaden las siguientes:

- Para curvas $M(V)$ que se encuentran por encima de la bisectriz, el comportamiento de Δ_{mean} no es homogéneo, no es uniformemente creciente a medida que aumenta “b”. Para curvas $M(V)$ que se encuentran por debajo de la bisectriz, en cambio, el comportamiento de Δ_{mean} es homogéneo, y es uniformemente decreciente a medida que aumenta “b”.
- Las curvas reales $M(V)$ pueden presentar formas muy diferentes como se puede ver en la FIG.5.14 y por tanto para el cálculo de Δ_{mean} puede ser posible compensar pendientes bajas con pendientes altas o viceversa, distorsionando la utilización del criterio.

5.1.5.3.- Comentarios sobre el criterio N°3 (Δ_{mean45})

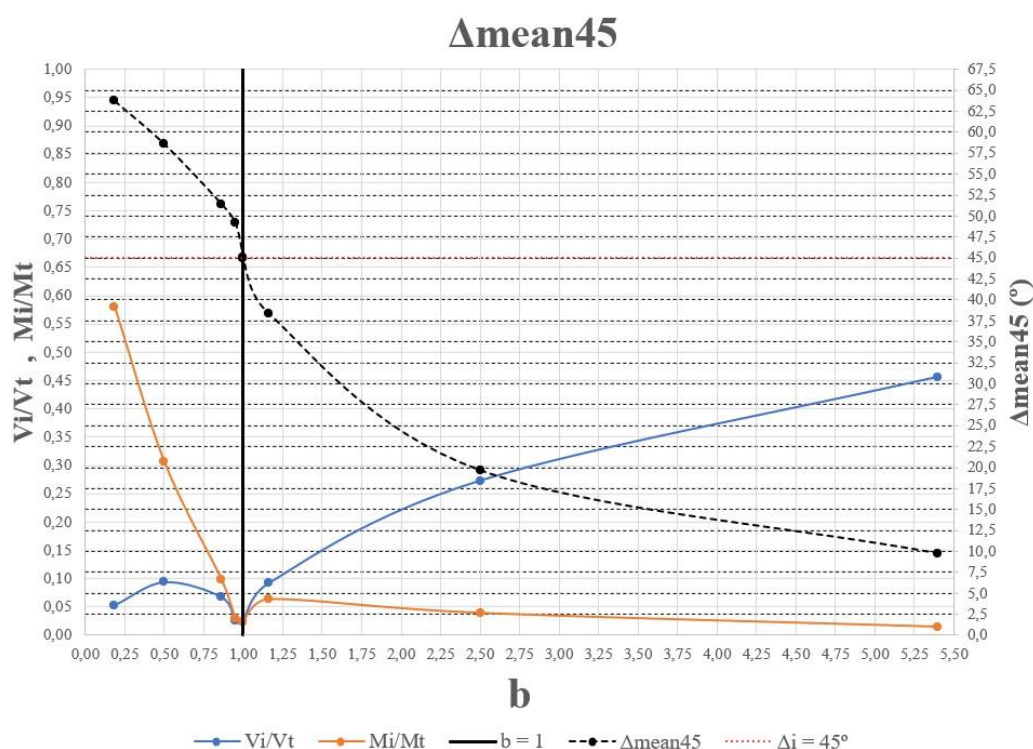


FIG.5.6 Valores de V_i/V_t , M_i/M_t y Δ_{mean45} para diferentes “b” (Criterio N°3 Δ_{mean45})

En este criterio, en la figura anterior se puede observar que a medida que “b” aumenta, Δ_{mean45} disminuye. La curva Δ_{mean45} es continuamente decreciente a lo largo del

eje “b”, su comportamiento es homogéneo. Permitiría diferenciar la situación donde habría un primer lavado ($\Delta\text{mean}_{45} > 45^\circ$) de donde no lo habría ($\Delta\text{mean}_{45} < 45^\circ$).

Sin embargo, la ya comentada dificultad del cálculo de Δi , la estimación del punto donde $\Delta i = 45^\circ$, así como las diferentes formas posibles que pueden presentar las curvas $M(V)$ con diferentes valores punta, dificultan la aplicación práctica de este criterio.

5.1.5.4.- Comentarios sobre el criterio N°4 (θ_{mean})

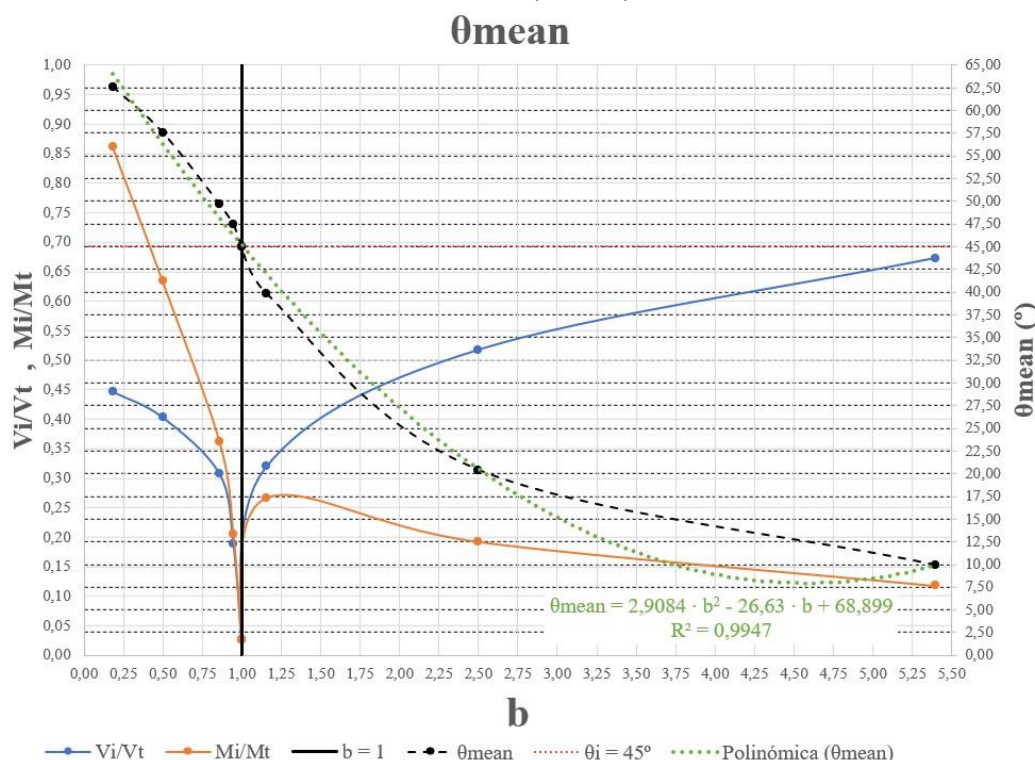


FIG.5.7 Valores V_i/V_t , M_i/M_t y θ_{mean} para diferentes “b” (Criterio N°4 θ_{mean})

Los valores de la curva θ_{mean} disminuyen continuamente a lo largo del eje “b”, mostrando un comportamiento homogéneo.

Las principales ventajas de este criterio son:

- Si se observa la Ecuación [C5-1], se puede ver que θ_i es independiente del valor de “b” y, por lo tanto, se puede calcular tanto para la curva $M(V)$ “ajustada” como para la real (tanto para el polutograma real como para el hidrograma real). θ_{mean} es, por lo tanto, también independiente de “b”.
- Su aplicación podría ser útil para curvas $M(V)$ reales con formas muy diferentes.
- Permitiría diferenciar claramente la situación en la que habría un primer lavado ($\theta_{\text{mean}} > 45^\circ$) de aquella en la que no lo habría ($\theta_{\text{mean}} < 45^\circ$).

Así pues, esta variable podría utilizarse como una alternativa al uso de “b” para describir el primer lavado.

Como complemento, se ha obtenido un ajuste de regresión polinomial entre θ_{mean} y “b”:

$$\theta_{mean} (^{\circ}) = 2,9084 \cdot b^2 - 26,63 \cdot b + 68,899 \quad [C5-12]$$

$$R^2 = 0,9947$$

5.1.5.5.- Volúmenes de almacenamiento (V_i/V_t), fracciones de masa lavada (M_i/M_t) e índices de masa (MI) de los diferentes criterios propuestos

Para cada curva $M(V)$ podemos evaluar los diferentes valores de V_i/V_t , M_i/M_t y MI que nos brindan los diferentes criterios establecidos. Se busca el criterio que ofrezca el valor más bajo de V_i/V_t como un valor representativo del volumen de almacenamiento del depósito de retención (tanque de tormenta) de aguas pluviales que permita remover/eliminar la mayor fracción de masa lavada posible M_i/M_t .

Dado que los pares de valores (V_i/V_t ; M_i/M_t) presentan diferentes combinaciones de valores para los distintos criterios, se utiliza el concepto de MI como una herramienta adicional para “puntuar” su combinación. Es decir, cuanto mayor sea el rango que presente dicha combinación ($M_i/M_t - V_i/V_t$) y menor sea el valor asociado de V_i/V_t , mayor será la puntuación MI. El MI del criterio más adecuado también permitiría categorizar las diferentes curvas $M(V)$ entre sí para saber cuáles polutogramas que las generan son los más desfavorables.

Usando los valores de la Tabla 5.2, se pueden obtener los siguientes gráficos donde se observan los valores de V_i/V_t , M_i/M_t y MI para cada criterio:

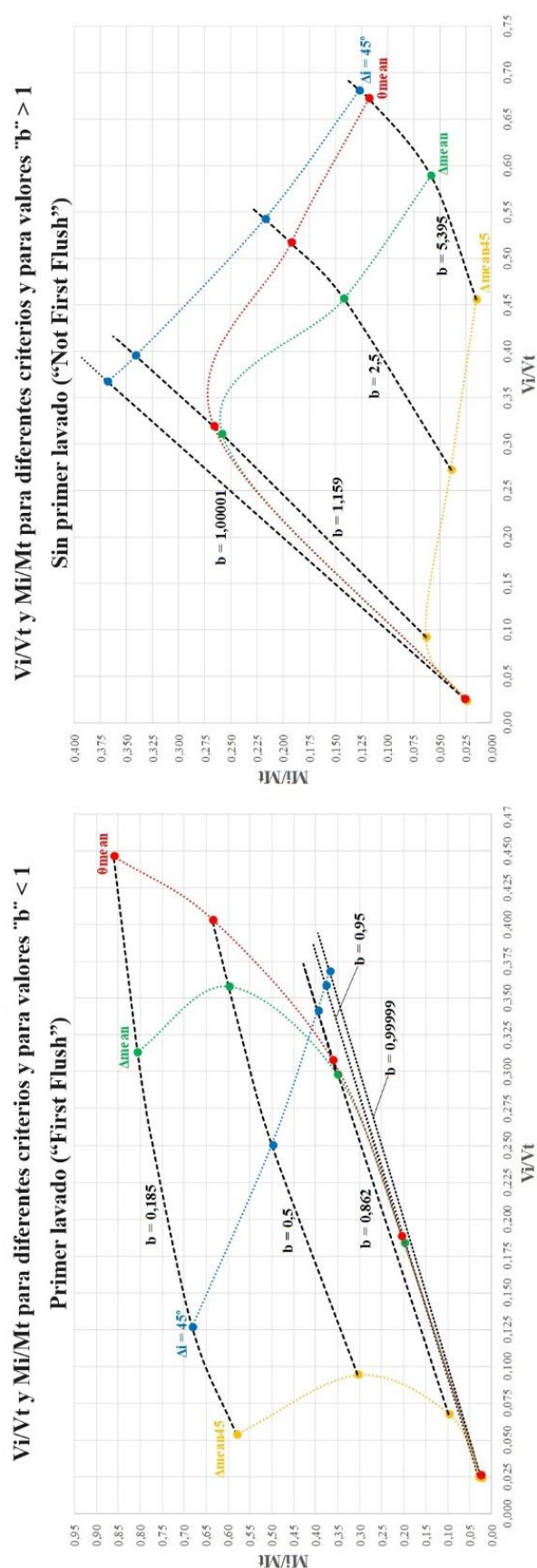


FIG.5.8 Valores V_i/V_t y M_i/M_t para diferentes criterios y para diferentes valores "b"

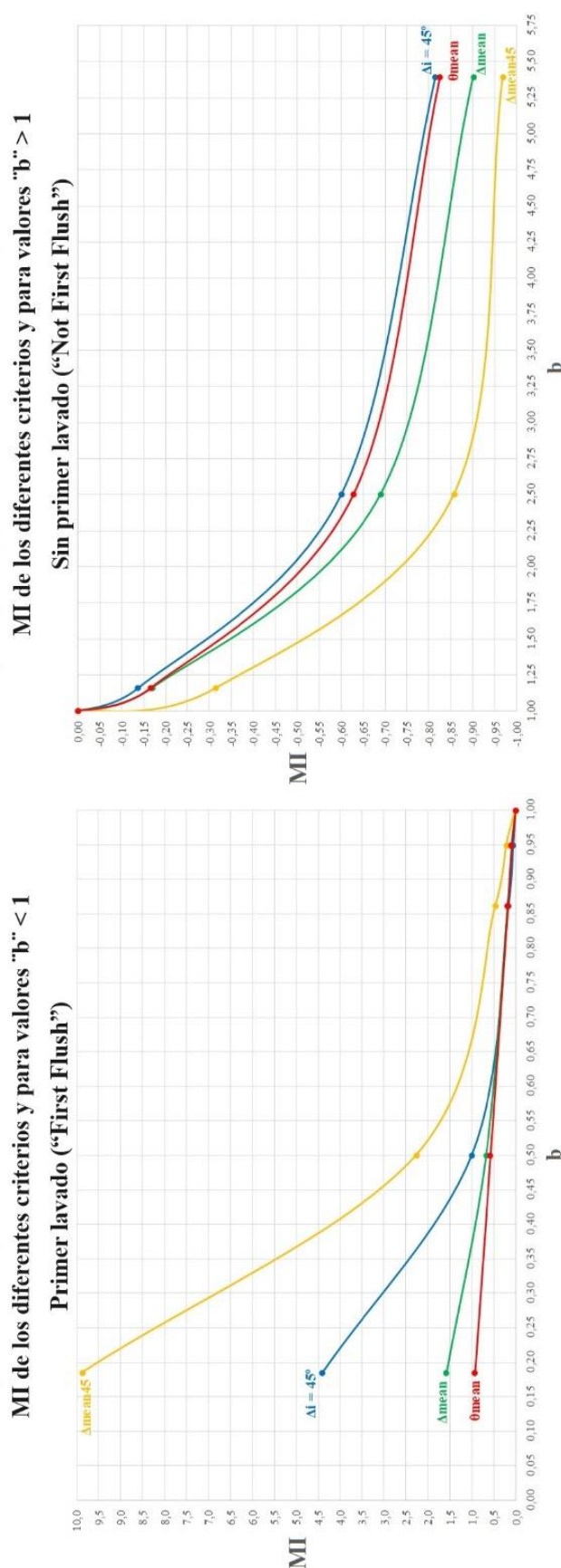


FIG.5.9 Valores de MI de los diferentes criterios para diferentes valores " b "

a) Para las curvas $M(V)$ con valores de $b < 1$, se puede observar lo siguiente en la FIG.5.8 y FIG.5.9:

- Para la curva $M(V)$ con $b = 0,185$ [curva $M(V)$ con el primer lavado más intenso], con el criterio $\Delta mean45$, sería necesario almacenar/retener el 5,34% del volumen total del evento en un tanque de tormenta para lograr la eliminación del 58,07% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía. Los remanentes serían, por lo tanto, el 94,66% del volumen total y el 42,93% de la masa total, lo que correspondería a las características del rebose del tanque de tormenta considerado. El resto de los criterios presentan un orden creciente en ambos ejes V_i/V_t y M_i/M_t . Así, el orden sería: $\Delta mean45$, $\Delta i = 45^\circ$, $\Delta mean$, $\theta mean$. $\theta mean$ necesitaría almacenar/retener en un tanque de tormenta el 44,63% del volumen total del evento para lograr la eliminación del 86,13% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía. Los remanentes serían, por lo tanto, el 55,37% del volumen total y el 13,87% de la masa total.
- Entre los diferentes criterios se consideraría: ¿almacenar menos volumen en el tanque de tormenta con menor masa lavada/arrastrada o almacenar un mayor volumen con una mayor masa lavada/arrastrada? Para identificar qué criterio presentaría, en términos porcentuales, el menor volumen necesario para retener la mayor cantidad de masa lavada/arrastrada, se ha calculado la puntuación MI para cada uno de los criterios. El criterio $\Delta mean45$ tiene la puntuación más alta con un valor de $MI = 9,8664$, la más baja $\theta mean$ con un valor de $MI = 0,9298$. El orden descendente de la puntuación MI sería: $\Delta mean45$, $\Delta i = 45^\circ$, $\Delta mean$, $\theta mean$.
- Para la curva $M(V)$ con $b = 0,5$ se repite todo lo mencionado anteriormente, el orden también sería: $\Delta mean45$, $\Delta i = 45^\circ$, $\Delta mean$, $\theta mean$.
- Para las curvas $M(V)$: $b = 0,862$; $b = 0,95$; $b = 0,99999$, los diferentes criterios presentan un orden creciente de V_i/V_t y M_i/M_t . El orden sería: $\Delta mean45$, $\Delta mean$, $\theta mean$, $\Delta i = 45^\circ$. El orden descendente de la puntuación MI también sería: $\Delta mean45$, $\Delta mean$, $\theta mean$, $\Delta i = 45^\circ$.

b) Para las curvas $M(V)$ con valores de $b > 1$, se puede observar lo siguiente en la FIG.5.8 y FIG.5.9:

- Si para las curvas $M(V)$ con $b < 1$ se analiza la intensidad del primer lavado, para las curvas $M(V)$ con $b > 1$ se analiza el típico efecto de "dilución" para un primer lavado débil o inexistente.
- Para la curva $M(V)$ con $b = 5,395$ [curva $M(V)$ con el efecto de "dilución" más fuerte], con el criterio $\Delta mean45$ sería necesario almacenar/retener el 45,60% del volumen total del evento en un tanque de tormenta para lograr la eliminación del 1,46% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía. El resto de los criterios presentan un orden creciente en ambos ejes V_i/V_t y M_i/M_t . Así, el orden sería: $\Delta mean45$, $\Delta mean$, $\theta mean$, $\Delta i = 45^\circ$. $\Delta i = 45^\circ$ necesitaría almacenar/retener en un tanque de tormenta el 68,16% del volumen total del

evento para lograr la eliminación del 12,68% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía.

- Cuanto más negativo sea el valor de MI, mayor será el efecto de "dilución" correspondiendo a un primer lavado débil o inexistente. El criterio Δmean_{45} tiene la puntuación más negativa con un valor de MI = -0,9681, la puntuación negativa más baja sería $\Delta i = 45^\circ$ con un valor de MI = -0,8139. El orden descendente de la puntuación MI sería: $\Delta i = 45^\circ$, θmean , Δmean , Δmean_{45} .

Entre los diferentes criterios, el criterio $\Delta i = 45^\circ$ es el único que presenta valores crecientes de V_i/V_t y valores decrecientes de M_i/M_t (de forma continua) a medida que aumentan los valores de "b". Sin embargo, caracterizar las diferentes situaciones de primer lavado utilizando este criterio significaría que las curvas $M(V)$ con menor intensidad de primer lavado requerirían mayores volúmenes de retención V_i/V_t para obtener menores porcentajes de lavado de contaminantes M_i/M_t . El criterio $\Delta i = 45^\circ$ no presenta valores intrínsecos asociados al criterio para poder compararlos entre sí, lo que presenta son valores V_i/V_t y M_i/M_t .

El criterio Δmean_{45} para los diferentes valores de "b" presenta bajos valores de almacenamiento V_i/V_t pero fracciones M_i/M_t bajas, inferiores al 58,07%.

El criterio Δmean presenta mayores fracciones de M_i/M_t para los diferentes valores de "b", incluso para $b = 0,185$ (mayor intensidad de primer lavado), presenta valores de V_i/V_t y M_i/M_t similares al 30/80 mencionados en el artículo de *Bertrand-Krajewski et al., 1998*. Este criterio podría ser útil para categorizar los polutogramas producidos por las diferentes curvas $M(V)$ pero su cálculo no es tan fácil como se mencionó anteriormente.

El criterio θmean es el que presenta los valores más altos de M_i/M_t para los diferentes valores de "b" pero acompañados de altos valores de V_i/V_t . El criterio θmean presenta valores crecientes para las curvas $M(V)$ ubicadas a la izquierda de la bisectriz. Para este criterio y valores de $b < 1$, se debe "almacenar" un mayor volumen a medida que el primer lavado es más intenso. Los valores de V_i/V_t a la derecha de $b = 1$ aumentan, un típico efecto de "dilución" para un primer lavado débil o inexistente.

Debido a su facilidad de cálculo, a continuación, se utiliza θmean para ver la posibilidad de usarlo en lugar de "b" para describir el primer lavado.

5.1.5.6.- Aplicación del criterio N°4 (θmean) a un caso específico

Para estudiar la aplicabilidad del criterio θmean , se han tomado las 208 lluvias y sus correspondientes polutogramas estudiados por *Jiménez et al., 2022* para una cuenca urbana de 1 ha. Las características del primer lavado de estos eventos de escorrentía urbana simulados pueden observarse en los Anexos:

- A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS
- A5.3 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS
- A5.4 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y DETERMINACIÓN ENTRE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS

y se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5.3 Resumen de resultados de "b" para los eventos de escorrentía urbana simulados

b	Zona	Descripción	Nº de eventos	% del total de eventos	R² promedio
$0 \leq b < 0,185$	1	Brecha positiva grande, primer lavado intenso	10	4,81	0,380
$0,185 \leq b < 0,862$	2	Brecha positiva media, primer lavado moderado	97	46,63	0,886
$0,862 \leq b < 1$	3	Brecha positiva insignificante, primer lavado débil	98	47,12	0,999
$1 \leq b < 1,159$	4	Brecha negativa insignificante, sin primer lavado	3	1,44	0,997
$1,159 \leq b < 5,395$	5	Brecha negativa media, sin primer lavado con retraso moderado de contaminante	0	0	0
$5,395 \leq b < +\infty$	6	Brecha negativa grande, sin primer lavado con fuerte retraso de contaminante	0	0	0

Nota: Brecha ("GAP" en inglés) se refiere al valor de la resta ($M_i/M_t - V_i/V_t$)

Se pudo observar que el 93,75% (46,63% + 47,12%) de los eventos analizados presentaron valores de "b" entre $0,185 \leq b < 1$, con muy buenos coeficientes de determinación R^2 . A continuación se presentan gráficos de los resultados obtenidos de "b" y su R^2 :

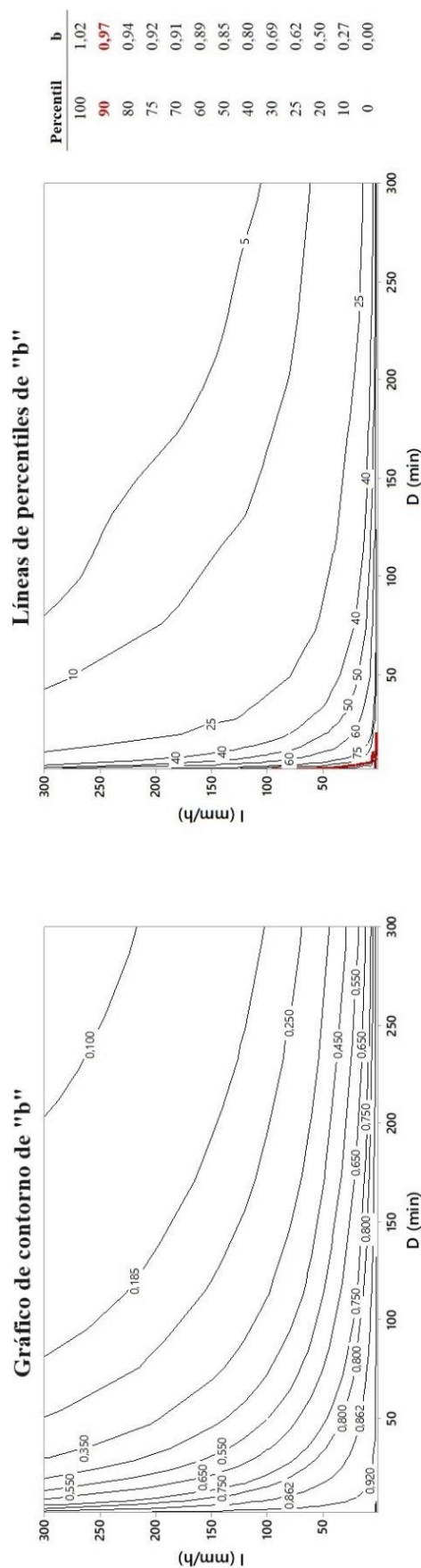


FIG.5.10 Valores de "b" y sus percentiles para el caso específico estudiado

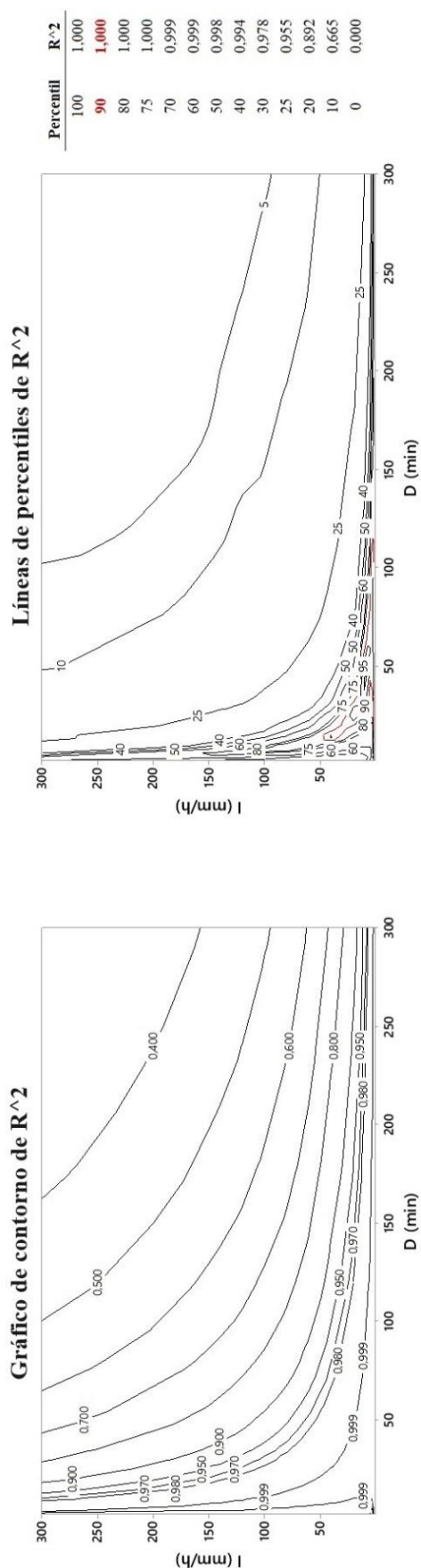


FIG.5.11 Valores R^2 y sus percentiles para el caso específico estudiado

Y calculando para cada evento (cada polutograma) valores θ_{mean}' (θ_{mean} sólo con valores $\theta_i > 45^\circ$), es decir, que cumplan la condición $\left[\frac{M_i}{M_t} - \frac{V_i}{V_t} \right] > 0$, se pueden obtener los siguientes gráficos:

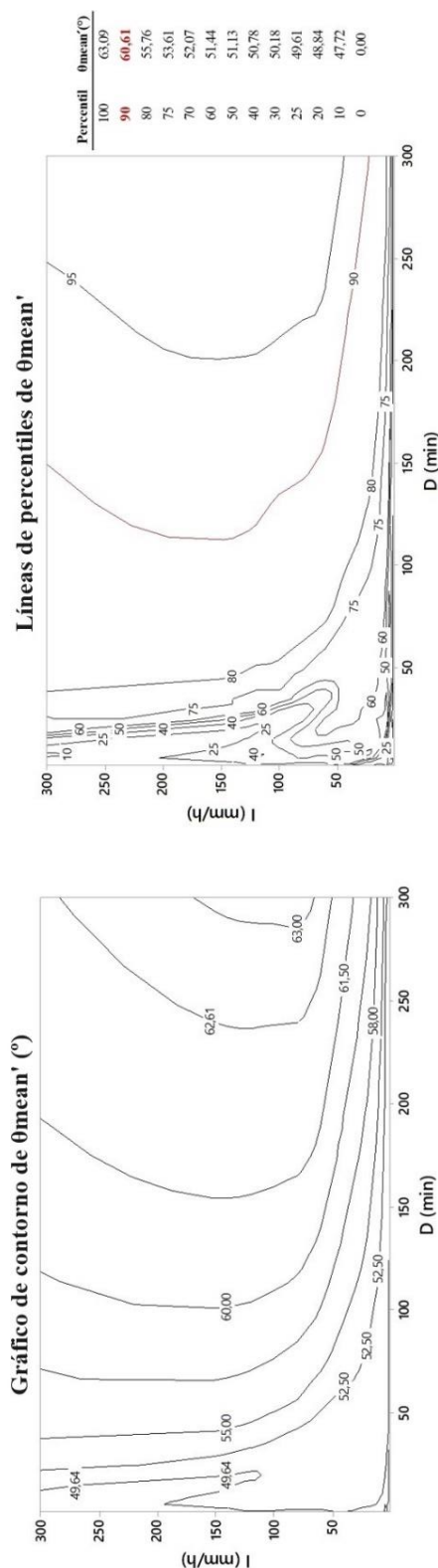


FIG.5.12 Valores de θ_{mean}' y sus percentiles para el caso específico estudiado

El siguiente gráfico presenta los valores de θ_{mean}' para el caso específico estudiado y los valores de θ_{mean} obtenidos en este estudio, que se encuentran en la Tabla 5.2:

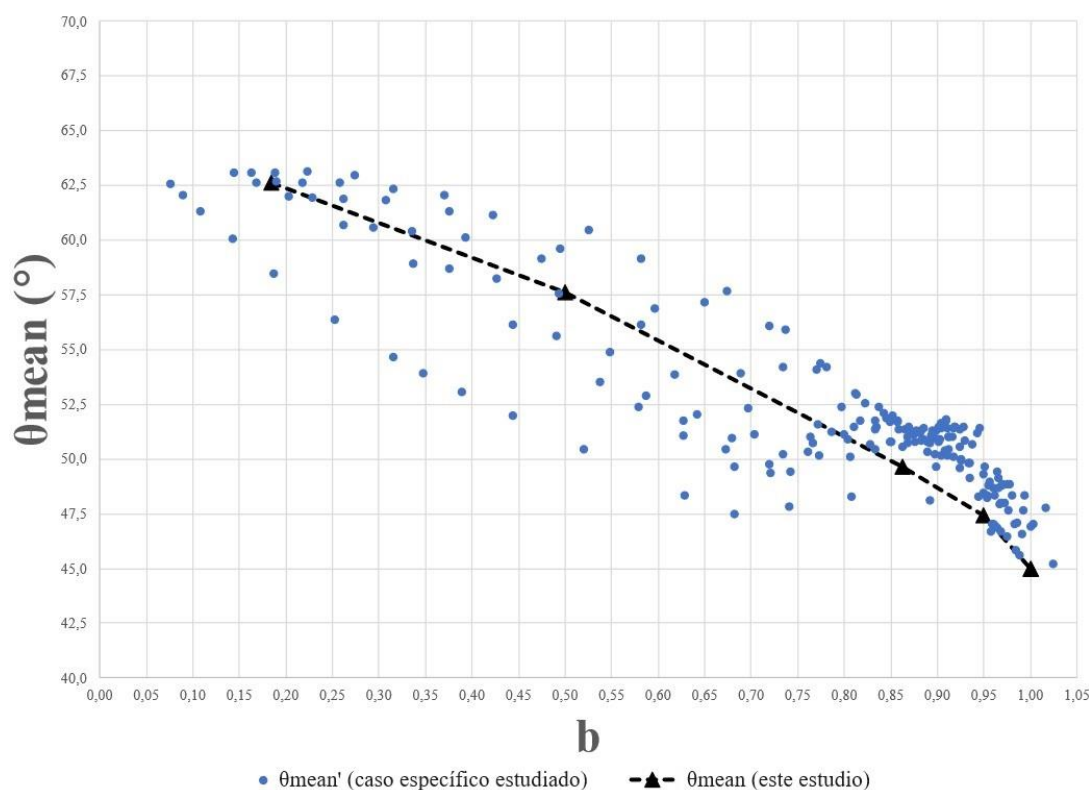


FIG.5.13 Comparación de los valores de θ_{mean}' (caso específico estudiado) y θ_{mean} (Tabla 5.2) para valores de $b \leq 1$

La dispersión que presentan los valores de θ_{mean}' (caso específico estudiado) con respecto a θ_{mean} (Tabla 5.2) se debe a que los valores de "b" calculados para el caso específico no tienen un R^2 asociado igual a 1. Es decir, los ajustes de regresión no son perfectos, como se puede observar en la FIG.5.11.

Analizando el caso específico aplicando el concepto de cálculo de θ_{mean}' (θ_{mean} solo con valores que cumplen $\theta_i > 45^\circ$), permite generalizar la aplicación del método de cálculo para cualquier tipo de curva $M(V)$ (ver FIG.5.14) e incluso con varios picos (es decir, para cualquier forma que pueda presentar el polutograma, con dos valores punta, por ejemplo).

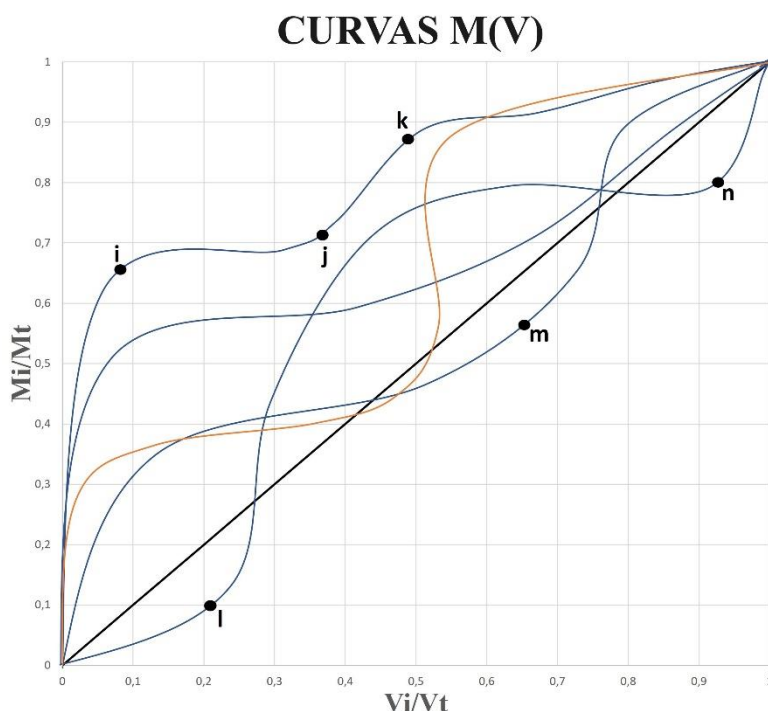


FIG.5.14 Posibles formas de curvas reales M(V)

En esta figura, por ejemplo, $\theta > 45^\circ$ en los puntos: i, j, k; $\theta < 45^\circ$ en los puntos: l, m, n; $\Delta = 45^\circ$ en los puntos: i, j, k, l, m, n.

Por lo tanto, θ_{mean} puede utilizarse en lugar de “b” para describir el primer lavado, y se proponen los valores de θ_{mean} (Tabla 5.2) como alternativa para determinar la existencia o no de primer lavado al analizar las curvas M(V) de los eventos de escorrentía y se los representa en la siguiente:

Tabla 5.4 Propuesta de valores de θ_{mean} para el estudio del primer lavado

b	θ_{mean} (°)	Zona	Descripción
$0 \leq b < 0,185$	$90,00 \leq \theta_{\text{mean}} < 62,61$	1	Brecha positiva grande, primer lavado intenso
$0,185 \leq b < 0,862$	$62,61 \leq \theta_{\text{mean}} < 49,64$	2	Brecha positiva media, primer lavado moderado
$0,862 \leq b < 1$	$49,64 \leq \theta_{\text{mean}} < 45,00$	3	Brecha positiva insignificante, primer lavado débil
$1 \leq b < 1,159$	$45,00 \leq \theta_{\text{mean}} < 39,83$	4	Brecha negativa insignificante, sin primer lavado
$1,159 \leq b < 5,395$	$39,83 \leq \theta_{\text{mean}} < 9,93$	5	Brecha negativa media, sin primer lavado con retraso moderado de contaminante
$5,395 \leq b < +\infty$	$9,93 \leq \theta_{\text{mean}} < 0$	6	Brecha negativa grande, sin primer lavado con fuerte retraso de contaminante

θ_{mean} se puede utilizar para cualquier forma que presente la curva $M(V)$ y lo importante es que no es necesario realizar ajustes potenciales a la curva.

5.1.6.- Conclusiones

Al analizar tres parámetros alternativos para caracterizar el fenómeno del primer lavado en eventos de escorrentía urbana, éstos permiten una identificación y categorización más precisa de las intensidades del primer lavado sin depender del ajuste de la curva $M(V)$ a modelos específicos predeterminados. La metodología propuesta puede mejorar la comprensión de la dinámica de los contaminantes en la gestión de aguas pluviales urbanas, ofreciendo implicaciones prácticas para la protección ambiental y las estrategias de control de escorrentía.

La desventaja fundamental de utilizar el ángulo Δi radica en la dificultad de su cálculo. Aunque la determinación de Δi es compleja y tediosa, se podrían encontrar las coordenadas de $(V_i/V_t ; M_i/M_t)$ de $\Delta i = 45^\circ$ calculando el punto de máxima diferencia ($Maxgap$), que es el punto donde $(M_i/M_t - V_i/V_t)$ tiene su valor máximo.

Para cualquier curva $M(V)$ se puede utilizar la puntuación MI para evaluar, entre diferentes puntos de dicha curva, cuáles tienen el mayor rango de diferencia entre M_i/M_t y V_i/V_t para valores más bajos de V_i/V_t . Es decir, cuáles puntos de la curva tienen menores volúmenes de almacenamiento V_i/V_t con mayores valores de masa lavada/arrastrada M_i/M_t . Para valores $b < 1$, MI denotaría eventos con una masa adelantada, y para valores $b > 1$, MI denotaría eventos con una masa asociada retrasada.

La aplicación de la metodología propuesta (en cualquier situación, lugar o tipo de tormenta) es muy sencilla, teniendo como datos V_i/V_t y M_i/M_t de cada punto real "i" de cualquier curva $M(V)$, se calculan θ_i y θ_{mean} con la Ecuación [C5-1] y la Ecuación [C5-8] respectivamente y se procede a evaluar el primer lavado con la Tabla 5.4 Si se quiere ser más estricto, en el cálculo de θ_{mean} se pueden tomar solo los valores que cumplan $\theta_i > 45^\circ$. Metodología más corta y sencilla que el método tradicional del ajuste de la función potencial aplicando logaritmos y realizando una regresión lineal. Así, las fórmulas para calcular θ_i y θ_{mean} son efectivamente independientes del valor "b" y por tanto pueden calcularse para cualquier tipo de curva real $M(V)$ y son valores que representan la curva con mayor precisión en comparación con "b". θ_{mean} se ha mostrado como una alternativa conveniente para evaluar el primer lavado a través de las curvas $M(V)$, incluso cuando se calcula para los valores que cumplen las condiciones de $\theta_i > 45^\circ$ o, lo que es lo mismo, cuando $[M_i/M_t - V_i/V_t] > 0$ [θ_{mean}].

5.2.- GAP, MI Y EMC DINÁMICA DE LA CURVA M(V) COMO ALTERNATIVAS PARA EL ESTUDIO DEL PRIMER LAVADO

5.2.1.- Resumen

La escorrentía urbana puede presentar flujos de agua y niveles de contaminación muy desfavorables para el entorno urbano, tales como un arrastre/lavado inicial que genera una condición crítica de contaminación conocida como primer lavado ("*First Flush*" en inglés). En las últimas décadas, numerosos investigadores han estudiado este fenómeno utilizando curvas adimensionales M(V). Si bien cada curva M(V) real puede mediante una regresión lineal ajustarse aproximadamente a una función de tipo potencial $Y = X^b$, es posible que una curva M(V) real ajustada presente un coeficiente de determinación R^2 bajo (con un valor considerablemente inferior a 1). Esto se debe a que las curvas M(V) reales pueden presentar diversas formas. En consecuencia, el objetivo de este estudio es desarrollar una nueva metodología para evaluar la ocurrencia del primer lavado, su intensidad y su categorización. Para ello, además de las variables GAP y Maxgap, se utilizan Gapmean, un Índice de Masa (MI) y la EMC Dinámica de la curva M(V) como nuevas variables para el estudio del primer lavado y como alternativas novedosas para su caracterización. Se encontró que las variables Gapmean, MImean y DynEMCmean/EMC permiten estudiar el primer lavado sin depender de la realización de una regresión lineal como herramienta para aproximar la forma de una curva M(V) real a una de tipo potencial.

5.2.2.- Introducción

Como ya se comentó en el apartado 5.1.2 el vertido inmediato del primer lavado a los medios receptores puede causar graves impactos debido a sus altos niveles de contaminantes. Por lo tanto, muchos investigadores destacan la necesidad de almacenar/retener un volumen de escurrimiento en los primeros minutos para mitigar sus efectos adversos (Artina *et al.*, 2007; Mambretti y Sanfilippo, 2011; Qin *et al.*, 2016).

Toda curva M(V) real puede ajustarse aproximadamente a una función potencial $Y = X^b$ (Saget *et al.*, 1996; Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998; Di Modugno *et al.*, 2015; Russo *et al.*, 2023), pero la curva M(V) real ajustada puede presentar un coeficiente de determinación R^2 bajo (con un valor considerablemente inferior a 1). La razón de esto es que las curvas M(V) reales pueden tener muchas formas diferentes, como se puede observar, por ejemplo, en la FIG.5.14.

Consecuentemente, el objetivo de este apartado 5.2 es desarrollar otra nueva metodología para evaluar la ocurrencia del primer lavado y su categorización en función de su intensidad. Para ello, se buscan nuevamente otros parámetros/variables que permitan llevar a cabo lo mencionado sin la necesidad de depender del uso de regresiones lineales como herramienta para aproximar la forma de una curva M(V) real a una de tipo potencial. En este sentido, se proponen y analizan en esta ocasión

Maxgap, Gapmean, MImean y DynEMCmean/EMC como posibles alternativas. Todas estas variables se describen a continuación.

5.2.3.- Metodología

5.2.3.1.- Definición de GAP, Maxgap, Gapmean, G1, G2

Considerando el siguiente gráfico:

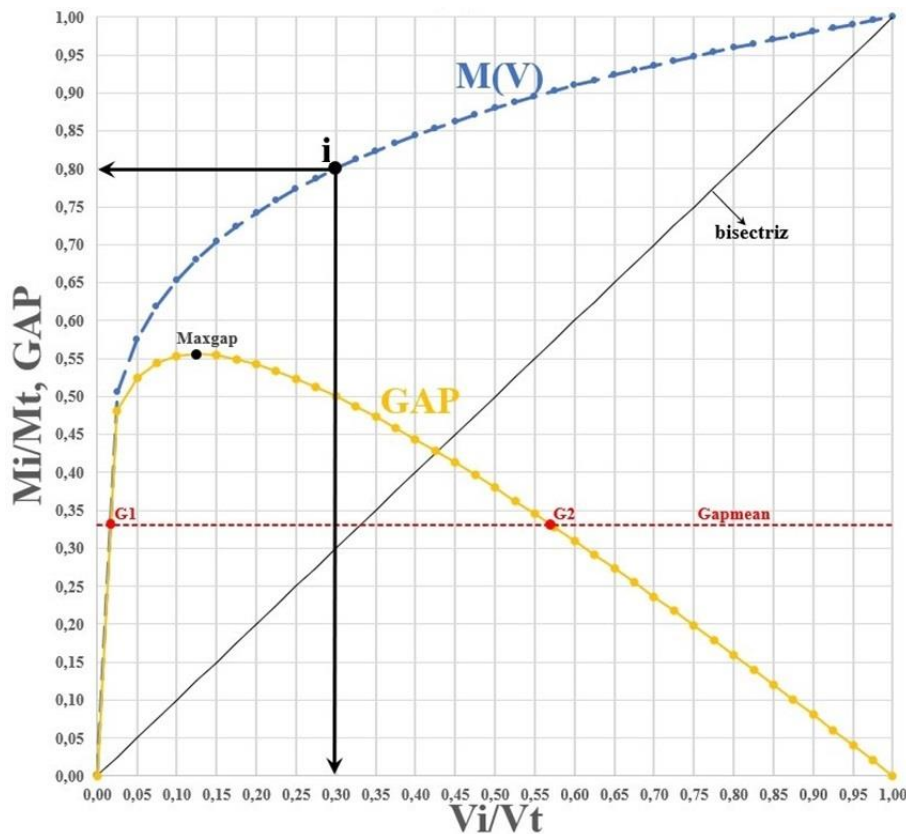


FIG.5.15 Variables de caracterización de la curva M(V)

Para cualquier punto "i" de la curva M(V) se puede definir:

$$GAP = \left[\frac{Mi}{Mt} - \frac{Vi}{Vt} \right] \quad [C5-13]$$

Maxgap es la diferencia máxima de valores $\left[\frac{Mi}{Mt} - \frac{Vi}{Vt} \right]$.

Gapmean se define como el promedio de los valores $\left[\frac{Mi}{Mt} - \frac{Vi}{Vt} \right]$.

$$Gapmean = \left(\sum_{i=1}^n \left[\frac{Mi}{Mt} - \frac{Vi}{Vt} \right]_i \right) / n \quad [C5-14]$$

"n" es el número total de par de valores $[Mi/Mt; Vi/Vt]$ representados en la curva $M(V)$.

G1 y G2 son los puntos de intersección de la curva GAP con la línea Gapmean en la FIG.5.15.

5.2.3.2.- Definición de MI, MI_{mean}, EMC, DynEMCi, DynEMC_{mean}, DynEMC_{mean}/EMC

En la FIG.5.15:

- Cuanto mayor sea el valor de Mi/Mt respecto a Vi/Vt significa que el primer lavado será mayor, por lo que corresponderá a mayores valores de la resta $(Mi/Mt - Vi/Vt)$.
- Para poder comparar los valores de esta resta para distintos criterios, podemos relativizar la sustracción mencionada respecto Vi/Vt , obteniendo la expresión $(Mi/Mt - Vi/Vt) / (Vi/Vt)$. Cuanto menor sea el valor de Vi/Vt (menor valor del denominador), mayor será el resultado de la división mencionada, al que llamaremos índice de masa "MI".

$$MI = \frac{\left(\frac{Mi}{Mt} - \frac{Vi}{Vt}\right)}{\left(\frac{Vi}{Vt}\right)} = \frac{\left(\frac{Mi}{Mt}\right)}{\left(\frac{Vi}{Vt}\right)} - 1 \quad [C5-15]$$

MI = Índice de Masa

MI tendrá valores positivos cuando $[(Mi/Mt) / (Vi/Vt)]$ sea mayor que 1 y por tanto habrá un adelanto de la masa lavada/arrastrada respecto del volumen de agua desplazado. Por tanto, denotará la existencia de primer lavado. Cuanto mayor sea su valor positivo, más intenso será el primer lavado.

MI tendrá valores negativos cuando $[(Mi/Mt) / (Vi/Vt)]$ sea menor que 1 y por tanto habrá un retraso de la masa lavada/arrastrada respecto del volumen de agua desplazado. Cuanto más negativo sea su valor, denotará la inexistencia del primer lavado.

MI será igual a 0 cuando no haya ni adelanto ni retraso de la masa lavada/arrastrada, es decir, $[(Mi/Mt) / (Vi/Vt)]$ es igual a 1 correspondiente a un punto de la bisectriz de la curva $M(V)$.

También se puede definir:

$$MI_{mean} = \left(\sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\frac{Mi}{Mt}\right)}{\left(\frac{Vi}{Vt}\right)} - 1 \right] \right) / n \quad [C5-16]$$

MI_{mean} es el promedio de los valores de MI's.

Por otra parte, en cualquier punto de la bisectriz (“bisectriz”, recta a 45°) de la curva M(V) se cumple la condición $M_i/M_t = V_i/V_t$. Para que se produzca el primer lavado, por tanto, debe cumplirse que:

$$\frac{M_i}{M_t} > \frac{V_i}{V_t} \quad [C5-17]$$

Kim *et al.*, 2007a mencionan que la concentración media del evento o concentración media ponderada (“EMC” en inglés) es útil para estimar cargas contaminantes; sin embargo, la EMC no proporciona información de las variaciones en el tiempo de las concentraciones de contaminantes o emisiones de masa, por lo que proponen el uso de una EMC dinámica.

Si multiplicamos cada miembro por M_t/V_i en la desigualdad de la Ecuación [C5-17], la desigualdad no cambia de signo ya que el valor de M_t/V_i es siempre positivo (> 0):

$$\frac{M_i}{M_t} \cdot \frac{M_t}{V_i} > \frac{V_i}{V_t} \cdot \frac{M_t}{V_i} \quad [C5-18]$$

La desigualdad se convierte en:

$$\frac{M_i}{V_i} > \frac{M_t}{V_t} \quad [C5-19]$$

pero:

$$EMC = \frac{M_t}{V_t} \quad [C5-20]$$

y (Lee *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2007a; Kim *et al.*, 2007b):

$$DynEMC_i = \frac{M_i}{V_i} \quad [C5-21]$$

DynEMC_i es la concentración media dinámica del evento o EMC dinámica al tiempo *i*.

La condición para que se produzca el primer lavado se definiría mediante la expresión:

$$DynEMCi > EMC$$

[C5-22]

Se puede definir:

$$DynEMCmean = \left(\sum_{i=1}^n \{DynEMCi > EMC\}_i \right) / n$$

[C5-23]

"n" es el número de valores que cumplen la condición dentro de los paréntesis.

y DynEMCmean, por definición, también debe ser mayor que EMC:

$$DynEMCmean > EMC$$

[C5-24]

Si el valor de EMC no es cero y es positivo (> 0), se puede dividir cada miembro por EMC en la desigualdad mencionada anteriormente y la desigualdad no cambiará de signo:

$$\frac{DynEMCmean}{EMC} > 1$$

[C5-25]

Así, para que exista un primer lavado, debe cumplirse que $[DynEMCmean/EMC] > 1$ y además, cuanto mayor sea el valor de DynEMCmean/EMC, mayor será la intensidad del primer lavado. Si $[DynEMCmean/EMC] < 1$ habrá un retraso de la masa lavada/arrastrada respecto del volumen de agua desplazado. Denotará la no existencia del primer lavado.

5.2.4.- Resultados

5.2.4.1.- Valores resultantes

Utilizando las fórmulas descritas anteriormente y la hoja Excel que se encuentra en el Anexo A5.1 HERRAMIENTA PARA GENERAR CURVAS M(V) CON DISTINTOS VALORES DE "b" se pueden obtener las siguientes figuras:

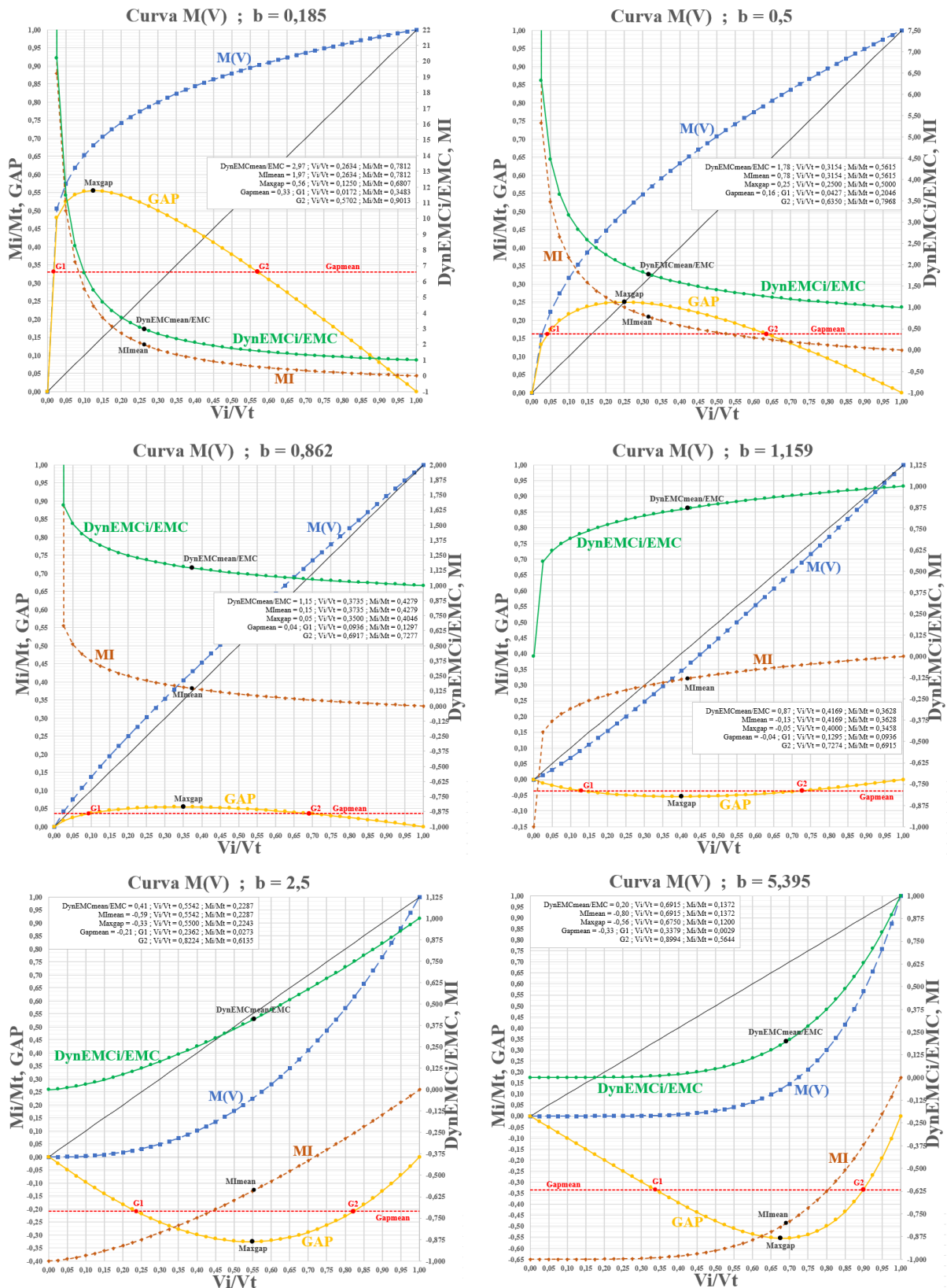


FIG.5.16 Curvas [M(V), GAP, MI, DynEMCi/EMC] para los diferentes tipos de primer lavado

5.2.4.2.- Posibles nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando Maxgap, Gapmean, MImean y DynEMCmean/EMC

Como criterios alternativos a los rangos de “b” para definir qué tan intenso puede ser el primer lavado, se buscan criterios donde su comportamiento sea homogéneo a lo largo del eje V_i/V_t . Es decir, preferentemente crecientes o decrecientes en todo el eje y que no cambien de signo.

Observando los gráficos de la FIG.5.16 se proponen los siguientes criterios:

Tabla 5.5 Criterios alternativos para analizar polutogramas desfavorables

Criterio	Descripción	Significado
1	Maxgap	Para las curvas $M(V)$ que se encuentran por encima de la bisectriz, Maxgap tiene valores positivos y cuanto mayor sea su valor, mayor será el primer lavado. Maxgap disminuye a medida que “b” aumenta ($\downarrow$ Maxgap $\uparrow$ b). Para las curvas $M(V)$ que se encuentran por debajo de la bisectriz, Maxgap adquiere valores negativos y disminuye a medida que su V_i/V_t se hace mayor. En el punto donde ocurre Maxgap, se observarían en la curva $M(V)$ sus valores asociados V_i/V_t y M_i/M_t , para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.
2	Gapmean	Gapmean se determina como una medida representativa de la curva GAP. Gapmean tiene un comportamiento similar a Maxgap. Para las curvas $M(V)$ que se encuentran por encima de la bisectriz, Gapmean tiene valores positivos y cuanto mayor sea su valor, mayor será el primer lavado. Para las curvas $M(V)$ que se encuentran por debajo de la bisectriz, Gapmean disminuye a medida que “b” aumenta ($\downarrow$ Gapmean $\uparrow$ b). En el gráfico, se determinan dos posiciones en la línea Gapmean, G1 y G2. En los puntos G1 y G2, se observarían sus valores asociados correspondientes V_i/V_t y M_i/M_t en la curva $M(V)$, para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.
3	MImean	Para todas las curvas $M(V)$, a un valor mayor de MImean se le debe asociar un primer lavado más intenso ($\uparrow$ MImean $\downarrow$ b). En el punto de la curva MI dónde ocurre MImean, se observarían sus valores asociados correspondientes V_i/V_t y M_i/M_t en la curva $M(V)$, para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.
4	DynEMCmean/ EMC	A un valor mayor de DynEMCmean/EMC se le debe asociar un primer lavado más intenso ($\uparrow$ DynEMCmean/EMC $\downarrow$ b). En el punto de la curva DynEMCi/EMC donde se da DynEMCmean/EMC, se observarían sus valores asociados correspondientes V_i/V_t y M_i/M_t en la curva $M(V)$, para estimar la fracción de volumen necesaria que se debe almacenar y qué cantidad o porcentaje de masa se eliminaría con dicho almacenamiento.

5.2.4.3.- Resultados de los nuevos criterios para hallar polutogramas más desfavorables utilizando las curvas [M(V), GAP, MI, DynEMCi/EMC]

Para analizar si se cumplen los criterios descritos, se utilizan las curvas [M(V), GAP, MI, DynEMCi/EMC] de la FIG.5.16 y las Ecuaciones [C5-23] y [C5-25].

Tabla 5.6 Resultados de los criterios alternativos para analizar los polutogramas más desfavorables

"b"	Criterio	Valor	Vi/Vt	Mi/Mt
0,185	Maxgap	0,5557	0,1250	0,6807
	Gapmean (G1)	0,3311	0,0172	0,3483
	Gapmean (G2)	0,3311	0,5702	0,9013
	MImean	1,9709	0,2634	0,7812
	DynEMCmean/EMC	2,9709	0,2634	0,7812
0,500	Maxgap	0,2500	0,2500	0,5000
	Gapmean (G1)	0,1618	0,0427	0,2046
	Gapmean (G2)	0,1618	0,6350	0,7968
	MImean	0,7816	0,3154	0,5615
	DynEMCmean/EMC	1,7816	0,3154	0,5615
0,862	Maxgap	0,0546	0,3500	0,4046
	Gapmean (G1)	0,0361	0,0936	0,1297
	Gapmean (G2)	0,0361	0,6917	0,7277
	MImean	0,1456	0,3735	0,4279
	DynEMCmean/EMC	1,1456	0,3735	0,4279
0,950	Maxgap	0,0189	0,3687	0,3820
	Gapmean (G1)	0,0125	0,1048	0,1173
	Gapmean (G2)	0,0125	0,7032	0,7157
	MImean	0,0486	0,3870	0,4058
	DynEMCmean/EMC	1,0486	0,3870	0,4058
0,99999	Maxgap	0,0000	0,3750	0,3750
	Gapmean (G1)	0,0000	0,1112	0,1112
	Gapmean (G2)	0,0000	0,7092	0,7092
	MImean	0,0000	0,3944	0,3944
	DynEMCmean/EMC	1,0000	0,3944	0,3944
1,00001	Maxgap	0,0000	0,3750	0,3750
	Gapmean (G1)	0,0000	0,1112	0,1112
	Gapmean (G2)	0,0000	0,7092	0,7092
	MImean	0,0000	0,3944	0,3944
	DynEMCmean/EMC	1,0000	0,3944	0,3944
1,159	Maxgap	-0,0542	0,4000	0,3458
	Gapmean (G1)	-0,0359	0,1295	0,0936

"b"	Criterio	Valor	Vi/Vt	Mi/Mt
2,500	Gapmean (G2)	-0,0359	0,7274	0,6915
	MImean	-0,1299	0,4169	0,3628
	DynEMCmean/EMC	0,8701	0,4169	0,3628
	Maxgap	-0,3257	0,5500	0,2243
	Gapmean (G1)	-0,2089	0,2362	0,0273
	Gapmean (G2)	-0,2089	0,8224	0,6135
5,395	MImean	-0,5874	0,5542	0,2287
	DynEMCmean/EMC	0,4126	0,5542	0,2287
	Maxgap	-0,5550	0,6750	0,1200
	Gapmean (G1)	-0,3350	0,3379	0,0029
	Gapmean (G2)	-0,3350	0,8994	0,5644
	MImean	-0,8019	0,6915	0,1372
	DynEMCmean/EMC	0,1981	0,6915	0,1372

En esta tabla, para cada criterio, es posible observar los diferentes valores de almacenamiento (V_i/V_t) y sus correspondientes fracciones de lavado/arrastre de contaminación (M_i/M_t). Se puede observar que los criterios MImean y DynEMCmean/EMC presentan, para cada valor "b", los mismos pares de valores de (V_i/V_t ; M_i/M_t).

5.2.5.- Discusión

Con los valores de la Tabla 5.6 se pueden realizar los siguientes comentarios y gráficos:

5.2.5.1.- Comentarios sobre el criterio N°1 (Maxgap)

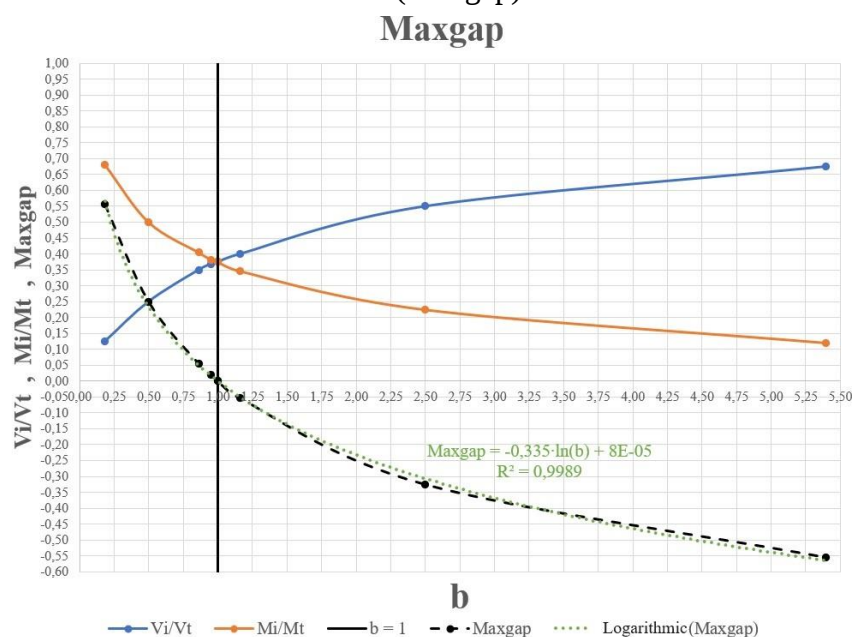


FIG.5.17 Valores de V_i/V_t y M_i/M_t para distintos "b" (Criterio N°1 Maxgap)

En este criterio, en la figura anterior se puede observar que a medida que “b” aumenta, V_i/V_t también aumenta y tanto la fracción de masa “lavada” M_i/M_t como $Maxgap$ disminuyen. A mayor intensidad de lavado, menor volumen de V_i debe “almacenarse” para controlar la masa M_i lavada.

La línea vertical en $b = 1$ marca la posición de la bisectriz de la curva $M(V)$. Por lo tanto, a la izquierda de esta línea ocurre el primer lavado y a la derecha no hay primer lavado, según la definición de *Bertrand-Krajewski et al., 1998*.

El comportamiento homogéneo de $Maxgap$ (decreciente) a medida que “b” aumenta hace que esta variable sea representativa para categorizar el primer lavado y puede utilizarse para comparar la desfavorabilidad de las distintas curvas $M(V)$.

5.2.5.2.- Comentarios sobre el criterio N°2 (Gapmean)

Sobre la curva GAP para distintos valores de “b” se pueden determinar dos posiciones sobre la recta Gapmean, G_1 y G_2 . De forma análoga al caso anterior se puede representar:

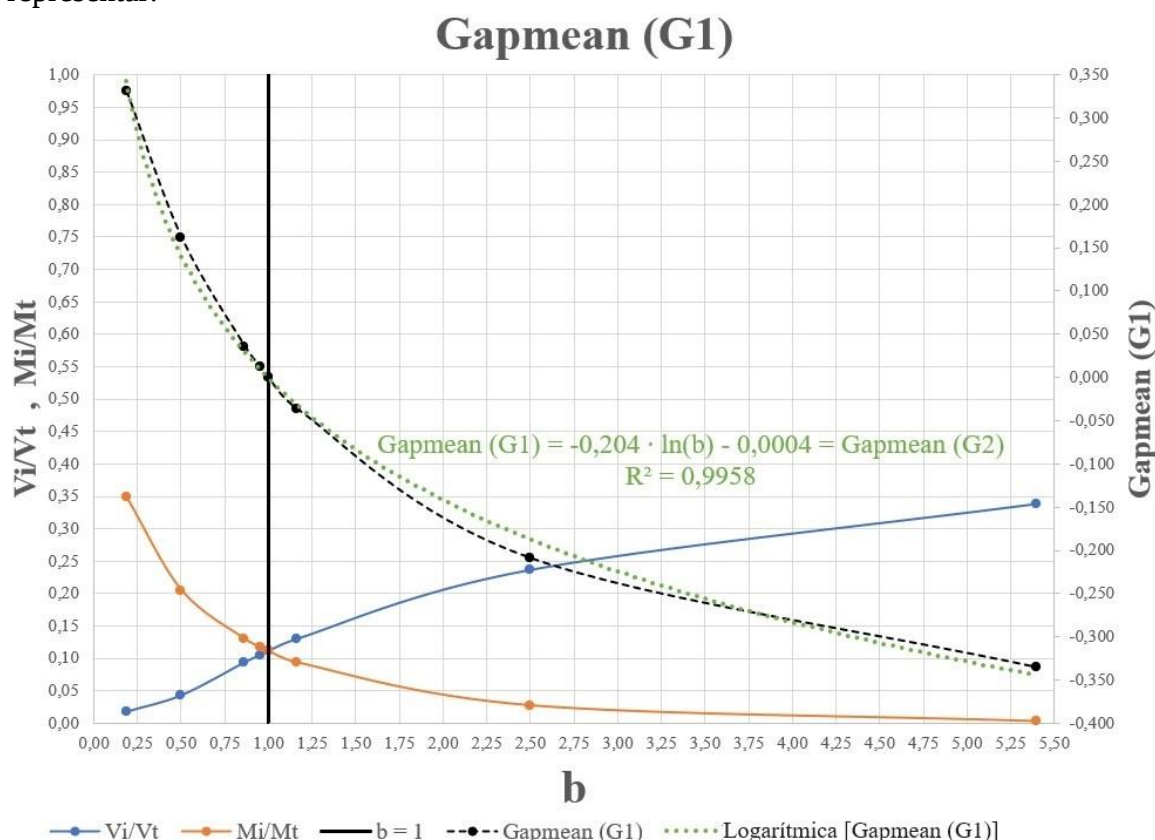


FIG.5.18 Valores de V_i/V_t , M_i/M_t y Gapmean para diferentes “b” [Criterio N°2 Gapmean (G1)]

Este criterio es como el anterior. En la figura se puede observar que a medida que “b” aumenta, V_i/V_t también aumenta y tanto la fracción de masa “lavada” M_i/M_t como la

Gapmean (G1) disminuyen. Cuanto mayor es la intensidad del lavado, menor es el volumen V_i que debe “almacenarse” para controlar la masa M_i lavada.

La curva Gapmean (G1) es continuamente decreciente a lo largo del eje “b”, su comportamiento es homogéneo.

Y, para el otro punto G2:

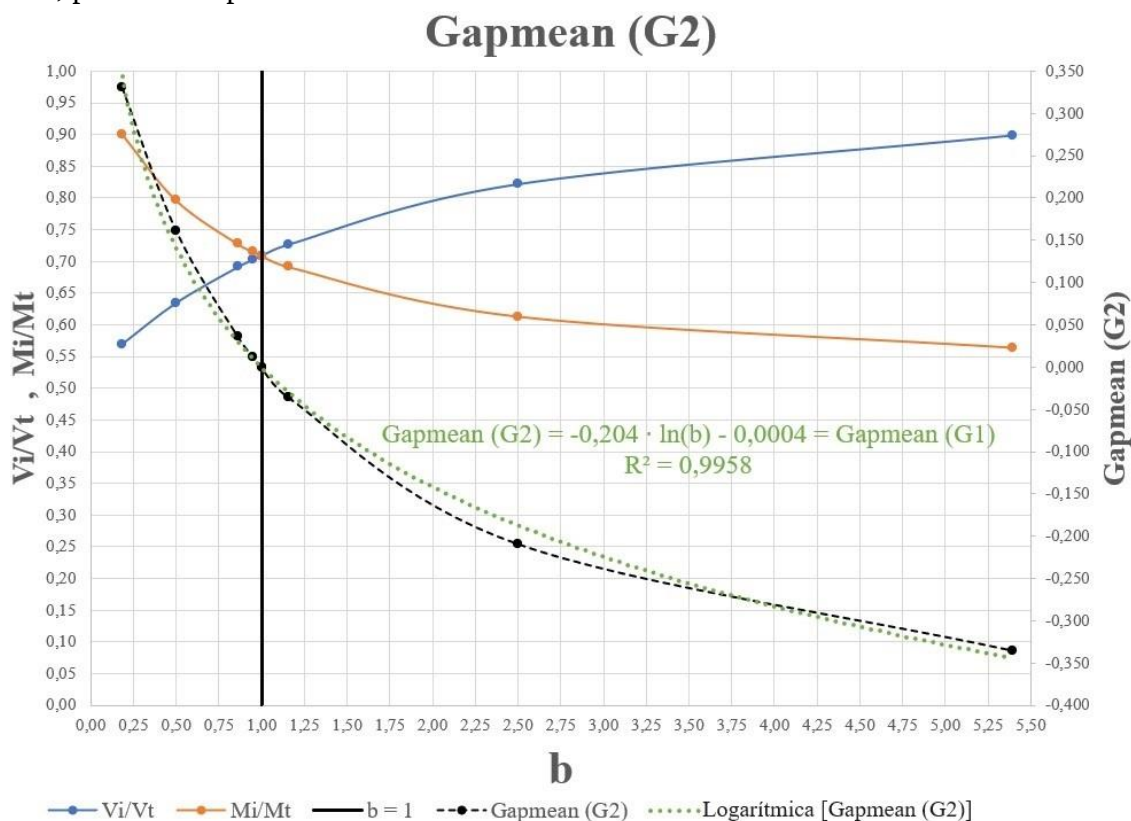


FIG.5.19 Valores de V_i/V_t , M_i/M_t y Gapmean para diferentes “b” [Criterio N°2 Gapmean (G2)]

El comportamiento de este criterio sigue la tendencia de los dos anteriores. Sin embargo, se observa que los correspondientes par de valores (V_i/V_t ; M_i/M_t) para el mismo Gapmean, dan como resultado soluciones muy diferentes. Gapmean (G1) para una “b” específica presenta valores más pequeños tanto de V_i/V_t como de M_i/M_t en comparación con los de Gapmean (G2).

5.2.5.3.- Comentarios sobre el criterio N°3 (MImean)

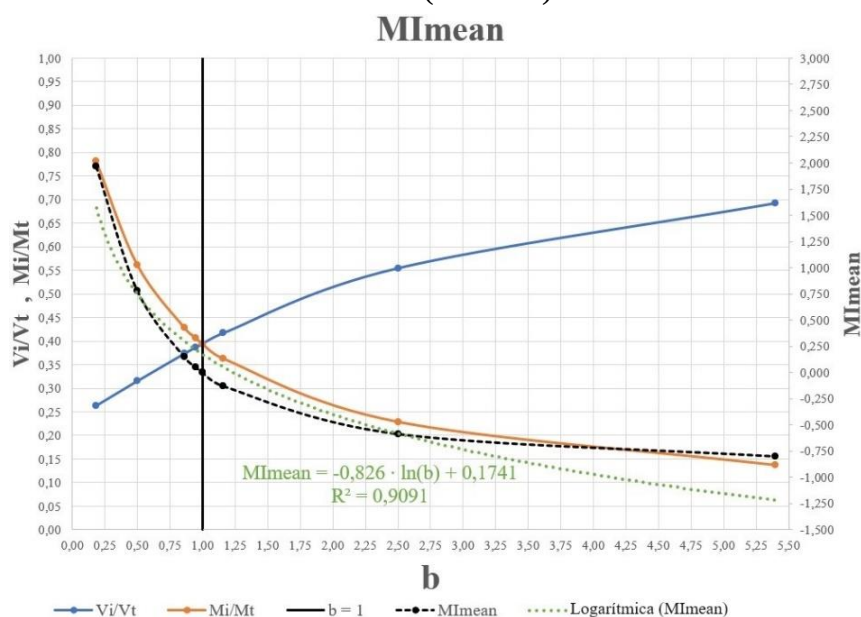


FIG.5.20 Valores de V_i/V_t , M_i/M_t y MI_{mean} para diferentes "b" (Criterio N°3 MI_{mean})

En este criterio, en la figura anterior también se puede observar que a medida que aumenta "b", también aumenta V_i/V_t y tanto la fracción de masa "lavada" M_i/M_t como MI_{mean} disminuyen. Cuanto mayor es la intensidad del lavado, menor es el volumen V_i que debe "almacenarse" para controlar la masa M_i lavada.

La curva MI_{mean} va decreciendo continuamente a lo largo del eje "b", su comportamiento es homogéneo.

5.2.5.4.- Comentarios sobre el criterio N°4 (DynEMCmean/EMC)

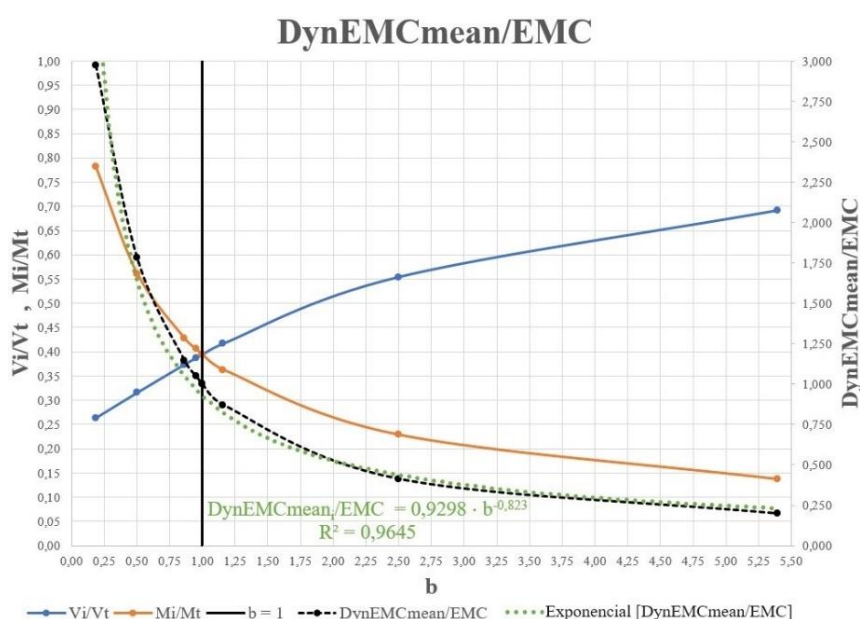


FIG.5.21 Valores de V_i/V_t , M_i/M_t y $DynEMC_{mean}/EMC$ para distintos "b" (Criterio N°4 $DynEMC_{mean}/EMC$)

La curva DynEMCmean/EMC es decreciente de forma continua a lo largo del eje “b”, su comportamiento es también homogéneo. Comportamiento similar al resto de criterios anteriormente mencionados.

5.2.5.5.- Volúmenes de almacenamiento (V_i/V_t) y fracciones de masa lavada (M_i/M_t) de los distintos criterios propuestos

Todos los criterios anteriormente descritos presentan curvas homogéneas decrecientes a medida que aumentan los valores de “b”. Para comparar y dilucidar qué criterio puede ser potencialmente mejor respecto de los demás, es necesario realizar un análisis complementario. Se busca el criterio que ofrezca el menor valor de V_i/V_t como valor representativo del almacenamiento del tanque de tormenta que permita retirar/lavar la mayor fracción de masa lavada M_i/M_t posible.

Utilizando los valores de la Tabla 5.6, se pueden obtener los siguientes gráficos donde se observan los valores de V_i/V_t , M_i/M_t y MI para cada criterio:

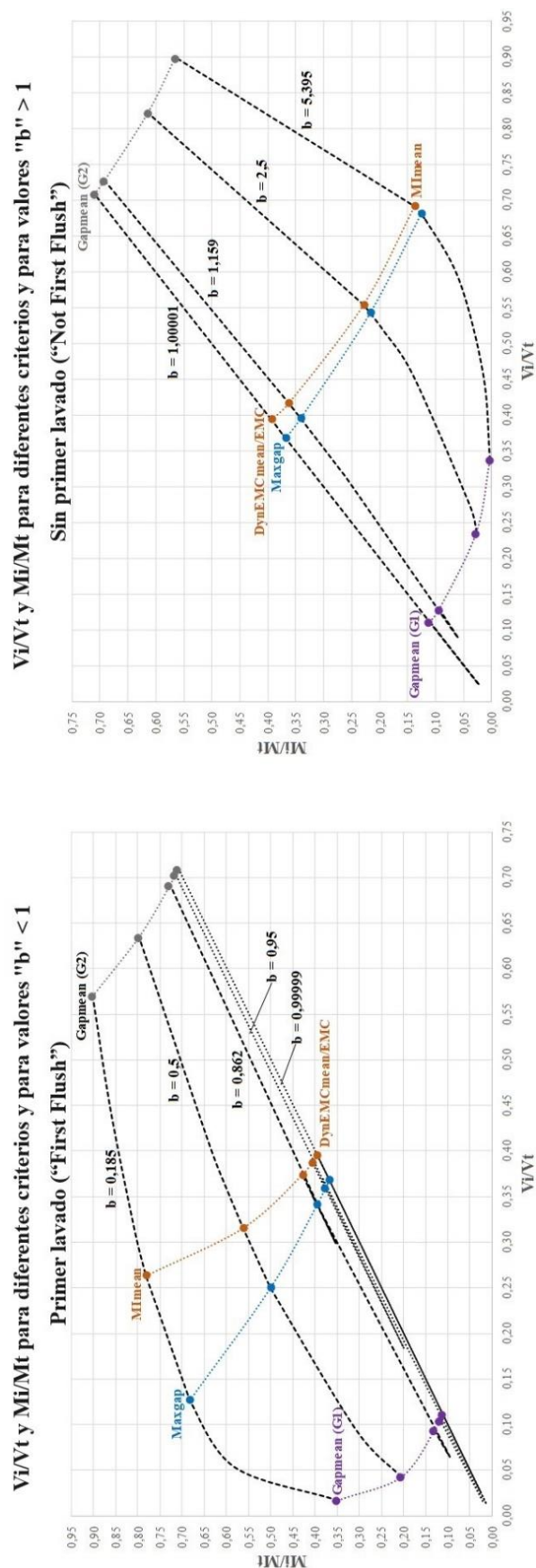


FIG.5.22 Valores V_i/V_t y M_i/M_t para diferentes criterios y para diferentes valores de "b"

Para cada criterio, con cada par de valores (V_i/V_t ; M_i/M_t) se puede calcular su valor MI con la Ecuación [C5-15] obteniéndose los siguientes gráficos para diferentes valores de “b”.

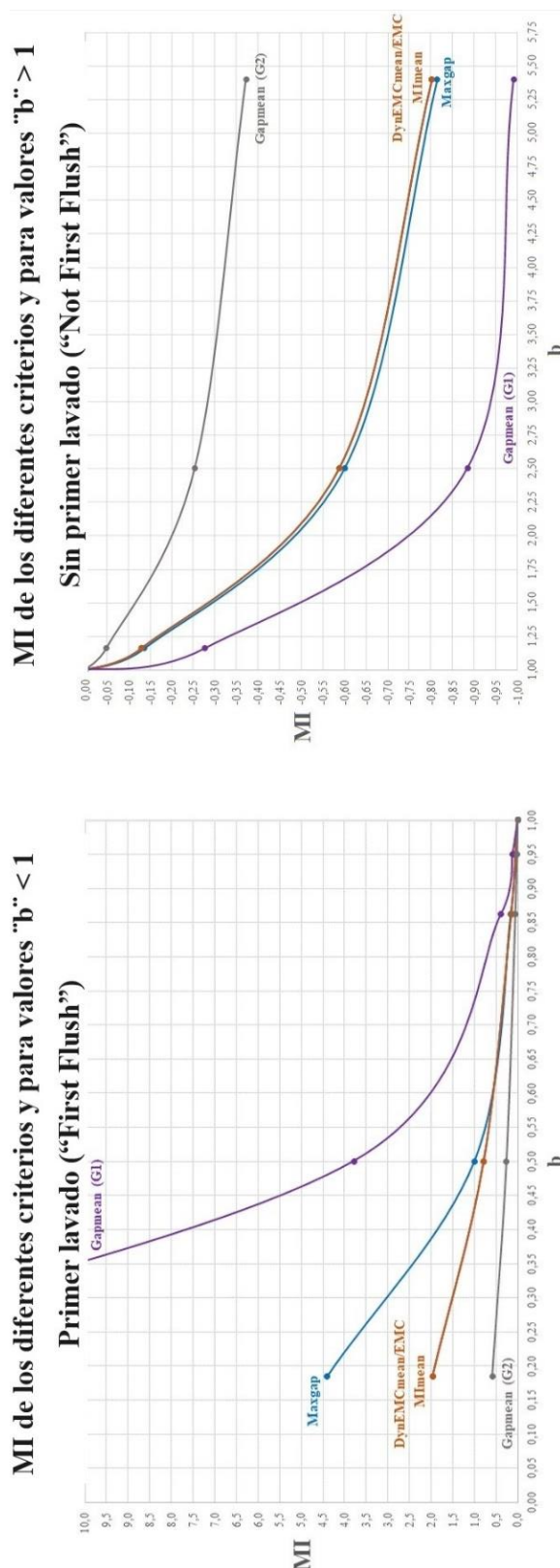


FIG.5.23 Valores de MI de los diferentes criterios para diferentes valores “b”

a) Para las curvas $M(V)$ con valores de $b < 1$, se puede observar lo siguiente en la FIG.5.22 y en la FIG.5.23:

- Para la curva $M(V)$ con $b = 0,185$ [la curva $M(V)$ con el primer lavado más intenso], con el criterio Gapmean (G1), sería necesario almacenar/retener en un tanque de tormenta el 1,72% del volumen total del evento para lograr la eliminación del 34,83% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía. Los remanentes serían, por lo tanto, el 98,28% del volumen total y el 65,17% de la masa total, lo que correspondería a las características del rebose del tanque de tormenta considerado. El orden creciente en ambas fracciones, V_i/V_t y M_i/M_t , se presenta en el resto de los criterios. Así, el orden sería: Gapmean (G1), Maxgap, MImean o DynEMCmean/EMC, Gapmean (G2). Con el criterio Gapmean (G2), sería necesario almacenar/retener en un tanque de tormenta el 57,02% del volumen total del evento para lograr la eliminación del 90,13% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía. Los remanentes serían, por lo tanto, el 42,98% del volumen total y el 9,87% de la masa total.
- Entre los diferentes criterios se consideraría: ¿almacenar menos volumen en el tanque de tormenta con menor masa lavada/arrastrada o almacenar un mayor volumen con una mayor masa lavada/arrastrada? Para identificar qué criterio presentaría, en términos porcentuales, el menor volumen necesario para retener la mayor cantidad de masa lavada/arrastrada, se han representado las curvas MI (FIG.5.23) para cada uno de los criterios. El criterio Gapmean (G1) tiene la puntuación más alta, y la más baja sería Gapmean (G2). El orden descendente de la puntuación MI sería: Gapmean (G1), Maxgap, MImean o DynEMCmean/EMC, Gapmean (G2).
- Para la curva $M(V)$ con $b = 0,5$, se repite todo lo mencionado anteriormente, y el orden también sería: Gapmean (G1), Maxgap, MImean o DynEMCmean/EMC, Gapmean (G2).
- Para las curvas $M(V)$: $b = 0,862$; $b = 0,95$; $b = 0,99999$, los diferentes criterios presentan un orden creciente de V_i/V_t y M_i/M_t . El orden sería: Gapmean (G1), Maxgap, MImean o DynEMCmean/EMC, Gapmean (G2). El orden descendente de la puntuación MI también sería: Gapmean (G1), Maxgap, MImean o DynEMCmean/EMC, Gapmean (G2).

b) Para las curvas $M(V)$ con valores de $b > 1$, se puede observar lo siguiente en la FIG.5.22 y en la FIG.5.23:

- Si para las curvas $M(V)$ con $b < 1$ se analiza la intensidad del primer lavado, para las curvas $M(V)$ con $b > 1$ se analiza el típico efecto de "dilución" para un primer lavado débil o inexistente.
- Para la curva $M(V)$ con $b = 5,395$ [la curva $M(V)$ con el efecto de "dilución" más fuerte], con el criterio Gapmean (G1), sería necesario almacenar/retener en un tanque de tormenta el 33,79% del volumen total del evento para lograr la eliminación del 0,29% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía. El

resto de los criterios presentan un orden creciente en ambos ejes V_i/V_t y M_i/M_t . Así, el orden sería: Gapmean (G1), Maxgap, MImean o DynEMCmean/EMC, Gapmean (G2). Con el criterio Gapmean (G2), sería necesario almacenar/retener en un tanque de tormenta el 89,94% del volumen total del evento para lograr la eliminación del 56,44% de la masa lavada/arrastrada por la escorrentía.

- Cuanto más negativo sea el valor de MI, mayor será el efecto de "dilución" correspondiente a un primer lavado débil o inexistente. El criterio Gapmean (G1) tiene la puntuación más negativa de MI, y la puntuación negativa más baja de MI sería Gapmean (G2). El orden descendente de la puntuación MI sería: Gapmean (G2), MImean o DynEMCmean/EMC, Maxgap, Gapmean (G1).

De todos los criterios, Maxgap es un criterio homogéneo. Sin embargo, corresponde a un único punto en la curva $M(V)$ y las curvas $M(V)$ reales pueden tener múltiples formas (ver FIG.5.14), lo que hace que seleccionar un solo punto de ellas sea poco representativo. Por esta razón, los criterios Gapmean, MImean y DynEMCmean/EMC son criterios más amplios y representativos de cualquiera de las curvas $M(V)$ que podrían ocurrir en situaciones reales.

5.2.5.6.- Aplicación del criterio N°2 (Gapmean) a un caso específico

Para estudiar la aplicabilidad del criterio Gapmean, se tomó el mismo caso específico detallado en el apartado 5.1.5.6.

De forma similar, calculando para cada evento (cada polutograma) Gapmean' (sólo con Gapmean > 0), es decir, que cumplan la condición $\left[\frac{M_i}{M_t} - \frac{V_i}{V_t} \right] > 0$, se pueden obtener los siguientes gráficos:

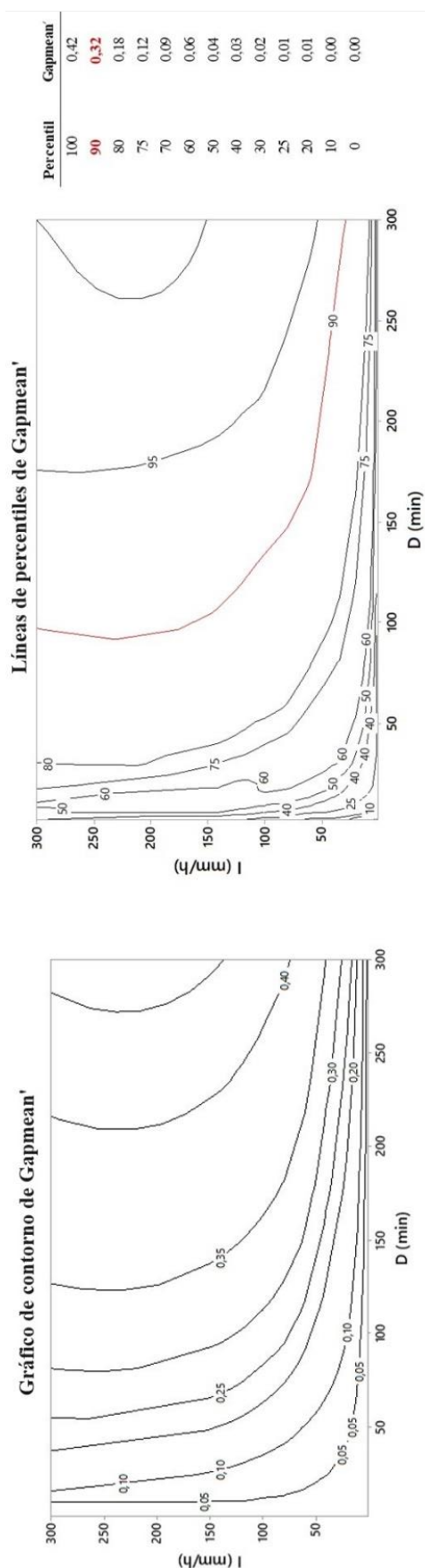


FIG.5.24 Valores de Gapmean' y sus percentiles para el caso específico estudiado

En la siguiente figura se presentan los valores de Gapmean' para el caso específico estudiado y los valores de Gapmean obtenidos en este estudio y que aparecen en la Tabla 5.6:

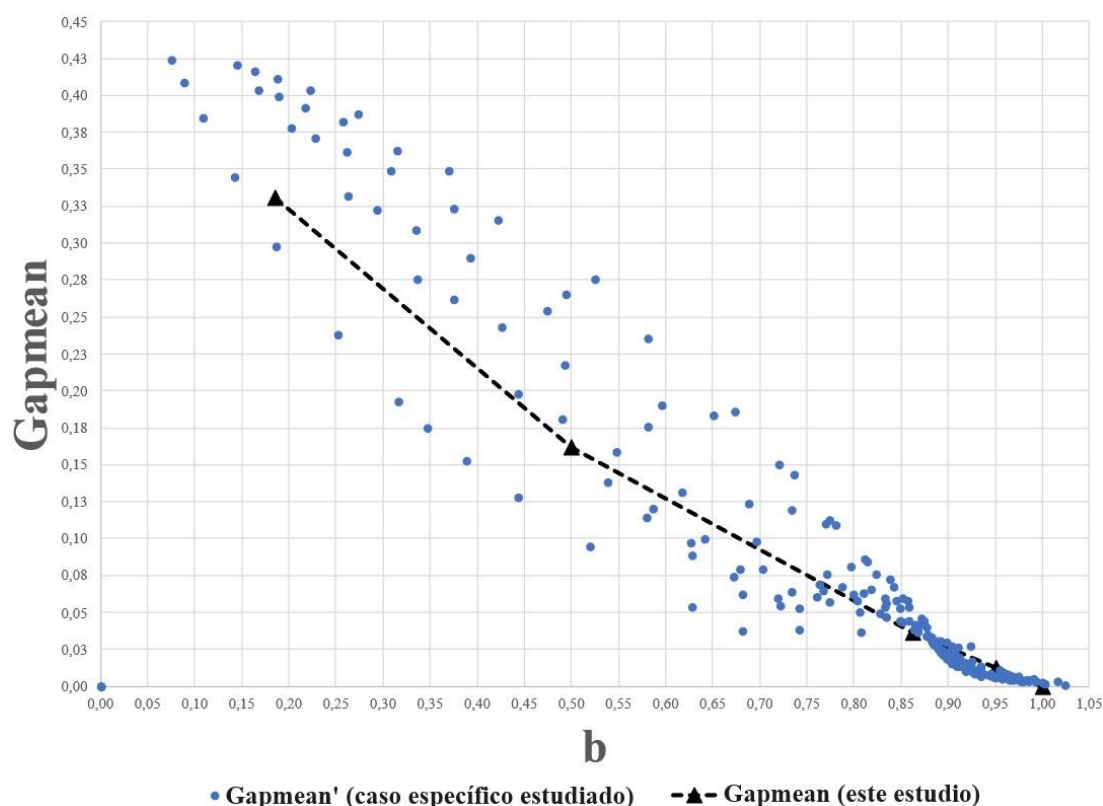


FIG.5.25 Comparación de valores de Gapmean' (caso específico estudiado) y Gapmean (Tabla 5.6), para valores de $b \leq 1$

Repitiendo la misma metodología descrita anteriormente, para valores de $b \leq 1$ y:

- MImean' (MImean solo con los valores que cumplen $MImean > 0$).
- $[DynEMCmean/EMC]'$ (DynEMCmean/EMC solo con los valores que cumplen $DynEMCmean/EMC > 1$).

También se pueden obtener los siguientes gráficos:

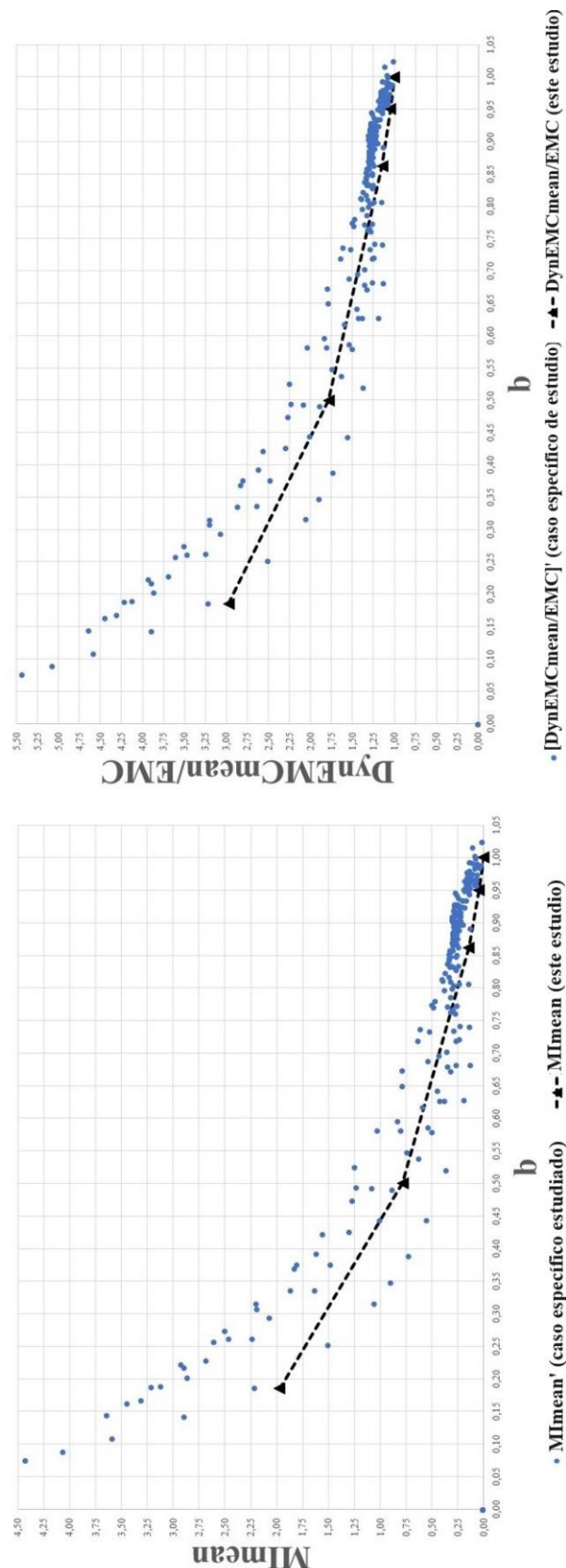


FIG.5.26 Comparación de los valores (MI_{mean} y $DynEMC_{mean}/EMC$) del caso específico estudiado y los obtenidos en esta investigación (Tabla 5.6), para valores de $b \leq 1$

La dispersión que presentan los valores de los tres criterios (caso específico estudiado) respecto de los valores (Tabla 5.16) (FIG.5.25 y FIG.5.26) se debe a que los “b” calculados para el caso específico no tienen asociado $R^2 = 1$. Es decir, los ajustes de regresión no son perfectos como se puede observar en la FIG.11.

Analizar el caso específico aplicando los conceptos de cálculo de Gapmean', MImean' y [DynEMCmean/EMC]' permite generalizar la aplicación del método de cálculo para cualquier tipo de curva M(V) (ver FIG.5.14) e incluso con varios picos (es decir, para cualquier forma que pueda presentar el polutograma, con dos valores punta, por ejemplo).

En la FIG.5.14, por ejemplo, valores máximos de Maxgap ocurren en los puntos: i, k; valores más negativos de Maxgap en los puntos: l, m, n.

De esta manera, Gapmean, MImean y DynEMCmean/EMC pueden utilizarse en lugar de “b” para describir el primer lavado y se proponen los valores de estas variables (Tabla 5.6) como alternativa para determinar la existencia o no de primer lavado al analizar las curvas M(V) de los eventos de escorrentía:

Tabla 5.7 Propuesta de valores de Gapmean, MImean y DynEMCmean/EMC para el estudio del primer lavado

b	Gapmean	MImean	DynEMCmean/EMC	Zona	Descripción
$0 \leq b < 0,185$	$0,5000 \geq \text{Gapmean} > 0,3311$	$+\infty \geq \text{MImean} > 1,9709$	$+\infty \geq \text{DynEMCmean/EMC} > 2,9709$	1	Brecha positiva grande, primer lavado intenso
$0,185 \leq b < 0,862$	$0,3311 \geq \text{Gapmean} > 0,0361$	$1,9709 \geq \text{MImean} > 0,1456$	$2,9709 \geq \text{DynEMCmean/EMC} > 1,1456$	2	Brecha positiva media, primer lavado moderado
$0,862 \leq b < 1$	$0,0361 \geq \text{Gapmean} > 0,0000$	$0,1456 \geq \text{MImean} > 0,0000$	$1,1456 \geq \text{DynEMCmean/EMC} > 1,0000$	3	Brecha positiva insignificante, primer lavado débil
$1 \leq b < 1,159$	$0,0000 \geq \text{Gapmean} > -0,0359$	$0,0000 \geq \text{MImean} > -0,1299$	$1,0000 \geq \text{DynEMCmean/EMC} > 0,8701$	4	Brecha negativa insignificante, sin primer lavado
$1,159 \leq b < 5,395$	$-0,0359 \geq \text{Gapmean} > -0,3350$	$-0,1299 \geq \text{MImean} > -0,8019$	$0,8701 \geq \text{DynEMCmean/EMC} > 0,1981$	5	Brecha negativa media, sin primer lavado con retraso moderado de contaminante
$5,395 \leq b < +\infty$	$-0,3350 \geq \text{Gapmean} > -0,5000$	$-0,8019 \geq \text{MImean} > -1,0000$	$0,1981 \geq \text{DynEMCmean/EMC} > 0,0000$	6	Brecha negativa grande, sin primer lavado con fuerte retraso de contaminante

Gapmean, MI_{mean} y DynEMC_{mean}/EMC pueden utilizarse para cualquier forma que presente la curva $M(V)$, y lo importante es que no es necesario realizar un ajuste de curva potencial.

5.2.6.- Conclusiones

Para cualquier curva $M(V)$, el uso de los valores MI y las curvas MI puede utilizarse para evaluar entre distintos puntos de dicha curva $M(V)$ qué puntos tienen mayor rango de diferencia entre M_i/M_t y V_i/V_t para valores menores de V_i/V_t . Es decir, qué puntos de la curva tienen menores volúmenes de almacenamiento V_i/V_t con mayores valores de masa lavada/transportada M_i/M_t . Para valores $b < 1$, MI denotaría eventos que tienen una masa adelantada y para valores $b > 1$, MI denotaría eventos con una masa retrasada asociada.

Maxgap es un criterio homogéneo; sin embargo, corresponde a un único punto de la curva $M(V)$ y las curvas $M(V)$ reales pueden ser de múltiples formas, haciendo que seleccionar un único punto de estos no sea representativo.

Las fórmulas para el cálculo de GAP, Gapmean, MI, MI_{mean}, DynEMC_{mean}/EMC son independientes del valor “b” y por lo tanto pueden calcularse para cualquier tipo de curva real $M(V)$. Estas variables se establecen como buenas alternativas para evaluar el primer lavado mediante el uso de curvas $M(V)$.



5.3.- VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE POLUTOGRAMAS DE ESCORRENTÍA URBANA. ANÁLISIS E IMPACTO DEL PRIMER LAVADO

5.3.1.- Resumen

En este apartado, se generaron hidrogramas y polutogramas de escorrentía de una cuenca urbana ficticia de una hectárea utilizando el modelo *Stormwater Management Model* (SWMM). Se analizaron los valores de las variables de caracterización de los polutogramas obtenidos a partir de la escorrentía de un conjunto específico de lluvias simuladas para tres contaminantes (ST, DBO₅ y NT). Además, se estudiaron las condiciones de ocurrencia del primer lavado ("*First Flush*") utilizando tres nuevos métodos que establecieron variables de caracterización adecuadas. Se analizaron los coeficientes de correlación y determinación existentes entre las variables (polutogramas y primer lavado), realizando también una caracterización multivariante con análisis de componentes principales (PCA, en inglés, *Principal Component Analysis*) y análisis de conglomerados (CA, en inglés, *Cluster Analysis*). A los valores tomados por todas estas variables se les asignó una probabilidad de ocurrencia (Tr) utilizando las curvas IDF de la ciudad de Santander. Dentro del conjunto de lluvias seleccionadas para identificar los polutogramas más desfavorables, se utilizó el exponente bMiMt del ajuste potencial de la curva M(V). Se creó una variable adicional, Tdose (Dosis-Tiempo de Exposición), para evaluar el impacto de los polutogramas utilizando variables fundamentales como EMC, bMiMt y el tiempo Tff (duración del tiempo en el cual los valores de la curva M(V) están por encima de la bisectriz del gráfico). Se detallaron las líneas de diseño de las variables tradicionales que cuantifican el primer lavado para la matriz de lluvias elegida, así como las líneas de diseño P90 de las nuevas variables propuestas. Finalmente, se simuló un rebose de alcantarillado pluvial, derivando un caudal máximo para tratamiento (EDAR), dimensionando así los tanques de tormenta para diferentes fracciones del volumen total de escorrentía retenido y para controlar los polutogramas más desfavorables desde el punto de vista del primer lavado. Tomando un periodo de retorno de diseño $Tr_{ssd} = 10$ años, los resultados obtenidos con la novedosa metodología propuesta fueron 146,50 m³/ha imp para una retención del 100% del volumen total de escorrentía y 117,20 m³/ha imp para una retención del 80%.

5.3.2.- Introducción

La escorrentía urbana representa un grave problema de contaminación para el medio ambiente, ya que está lejos de tener características de agua poco contaminada y limpia. Sus efectos han sido estudiados extensamente durante las últimas dos décadas, y el cambio climático global ha aumentado la gravedad de sus posibles impactos.

En áreas urbanas, la contaminación por escorrentía es un problema importante, ya que muchas investigaciones han demostrado que puede presentar los mismos tipos de

contaminantes que las aguas residuales urbanas, e incluso sus valores pueden ser más altos, especialmente en los primeros minutos de un evento de lluvia (*De Paola y Ranucci, 2010; Jiménez Gallardo, 1999; Suárez López et al., 2005; Zafra Mejía et al., 2009*).

Las cuencas naturales se ven drásticamente afectadas por factores antropogénicos. El crecimiento de la población humana y la intensa urbanización en las últimas décadas han provocado un cambio significativo en los paisajes, reduciendo la vegetación natural e impermeabilizando las superficies de los asentamientos urbanos. Esto ha provocado que el agua de lluvia que fluye por las áreas urbanas presente hidrogramas con picos pronunciados, grandes caudales y, generalmente, concentraciones muy altas de contaminantes urbanos durante la parte inicial de las tormentas. Las masas/cargas totales de contaminantes movilizados son muy grandes y, al verse en los medios acuáticos receptores, causan graves problemas a los organismos vivos, modificando así las características naturales de los ecosistemas (*Suárez et al., 2008; Rodríguez Hernández et al., 2013; Wang et al., 2017; Andrés-Doménech et al., 2018; Xia et al., 2018; Gorgoglione et al., 2019*).

La caracterización de la escorrentía urbana es muy compleja, ya que intervienen muchos factores. Existen numerosos estudios al respecto para determinar la calidad y cantidad de este tipo de aguas residuales, pero su estudio siempre está asociado a la inversión de una gran cantidad de recursos materiales. Por lo tanto, se requieren equipos, laboratorios y recursos humanos para caracterizar las aguas de escorrentía debido a múltiples eventos de lluvia y no solo en un punto de una cuenca, sino en varios puntos para obtener datos representativos. Esto implica tiempo y costos elevados (*Freni et al., 2009a; Gorgoglione et al., 2016; Sun y Bertrand-Krajewski, 2012*). A veces, la modelización matemática es una alternativa complementaria o total para el estudio de la escorrentía urbana cuando se dispone de pocos o nulos datos hidrológicos o para realizar previsiones futuras con los modelos ajustados. Para resolver el problema de la falta de datos, varios investigadores utilizan casos hipotéticos o semihipotéticos, donde las diferentes partes del sistema han sido simuladas utilizando datos de casos reales bien documentados, pero no completamente vinculados entre sí (*Freni et al., 2009a; Vanrolleghem et al., 2015*).

El comportamiento hidráulico de la escorrentía puede analizarse mediante hidrogramas que representan, en un punto específico de análisis, la variación del caudal de escorrentía en el tiempo $Q(t)$. Sin embargo, predecir en el tiempo qué grado de contaminación, expresado en concentración $C(t)$, está asociado con ese caudal de escorrentía es más complicado, ya que la cantidad de contaminantes (en masa) transportados por la lluvia y la propia escorrentía puede obedecer a múltiples factores. Para una cuenca, estas dos curvas varían de un evento de lluvia a otro dependiendo de varios parámetros: el hietograma que proporciona la variación de la precipitación $P(t)$, el período de tiempo seco y la lluvia, el estado del sistema de alcantarillado, la cantidad de contaminante depositado, la masa acumulada de contaminantes sobre la cuenca, las características de la cuenca y del sistema de alcantarillado, etc. (*Bertrand-Krajewski et al., 1998*). Actualmente, existen diferentes modelos matemáticos propuestos por varios investigadores basados en ecuaciones de lavado/arrastre de contaminantes y en la acumulación previa de contaminantes (curvas de acumulación) en los días secos

previos a la ocurrencia de la escorrentía generada por la lluvia (Freni *et al.*, 2009b; Andrés-Doménech *et al.*, 2018).

En tiempo seco, se acumulan en las superficies una variedad de contaminantes, cuya cantidad y composición dependen del tipo de ciudad y su grado de industrialización. Cuando llueve, la lluvia arrastra a su paso por la atmósfera la contaminación presente en ella; cuando una fracción de la lluvia llega al suelo como escorrentía superficial (cuya magnitud será mayor cuanto más impermeables sean las superficies), lava y arrastra contaminación adicional. Además, la escorrentía entra en el sistema de alcantarillado pluvial y/o combinado, lavando la suciedad acumulada en las tuberías durante los días secos anteriores. En este proceso, como consecuencia de este arrastre inicial, se produce una condición crítica de contaminación conocida como el primer lavado (*"First Flush"* en inglés). El primer lavado consiste en la escorrentía inicial de una tormenta que suele estar más concentrada en comparación con el resto de esta (Lee *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2007a; Alias *et al.*, 2013; Qin *et al.*, 2016). Esto muestra la presencia de altos niveles de contaminantes y, por lo tanto, su vertido inmediato en los medios receptores causa grandes impactos. En consecuencia, muchos investigadores destacan la importancia de retener y almacenar los volúmenes de escorrentía que ocurren en los minutos iniciales de las tormentas como medida para mitigar los efectos adversos de esta contaminación eventual y pronunciada (Artina *et al.*, 2007; Mambretti y Sanfilippo, 2011; Qin *et al.*, 2016).

Si el primer lavado, es decir, la primera proporción del volumen vertido contiene la mayor proporción de la carga contaminante transportada durante un evento de tormenta, entonces solo interceptar este volumen es suficiente para proteger eficientemente el medio acuático receptor. Por lo tanto, para definir la "proporción del primer volumen" y la "proporción de carga final", Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998 propusieron el estudio de la distribución de la carga contaminante frente al volumen de los efluentes pluviales. Este apartado investiga varios enfoques de la metodología propuesta por ellos, analizando las condiciones de ocurrencia del primer lavado, dando lugar a tres nuevos métodos de análisis. Así pues, el objetivo principal, una vez identificadas las principales variables de caracterización de los polutogramas de escorrentía generados por un conjunto representativo de lluvias en una cuenca urbana específica, es encontrar los eventos de contaminación más desfavorables teniendo en cuenta el efecto del primer lavado y un rebose del alcantarillado pluvial acompañado de su almacenamiento en tanques de tormenta.

El SWMM se utilizó como herramienta básica para la simulación de la escorrentía y su contaminación. El uso generalizado del programa SWMM en todo el mundo por científicos e investigadores para la simulación de la escorrentía en cuencas urbanas lo convierte en una herramienta ideal para obtener los hidrogramas y polutogramas discutidos anteriormente, caracterizando cuantitativa y cualitativamente los eventos de contaminación que producen las lluvias. El SWMM permite la simulación de flujos y cargas contaminantes de la escorrentía urbana, así como su transporte a través de la red de drenaje (Temprano *et al.*, 2006).

5.3.3.- Metodología

5.3.3.1.- Caso de estudio y datos iniciales

Se utilizaron todos los datos detallados en el apartado 4.1.2 utilizando las mismas curvas de acumulación y lavado de contaminantes del apartado 4.1.3. La matriz de lluvias simulada fue la misma que la detallada en 4.1.4 obteniendo; con la simulación del SWMM, los hidrogramas y polutogramas detallados en el apartado 4.1.5.4.

También se utilizaron las variables de caracterización de hidrogramas y polutogramas detalladas en el apartado 4.2.3.1.

Para el estudio del primer lavado y como complemento a lo realizado en los apartados 5.1 y 5.2 se procede a efectuar un análisis más pormenorizado del mismo acompañado de definición y estudio de variables complementarias que se describen a continuación.

5.3.3.2.- Estudio del primer lavado

Para el análisis del primer lavado se utiliza el procedimiento descrito por *Bertrand-Krajewski et al., 1998*, en el que se analizan las curvas $M(V)$, permitiendo un estudio comparativo de las curvas de flujo másico de contaminantes para diferentes lluvias. En este estudio, para cada lluvia simulada se construyó su respectiva curva $M(V)$:

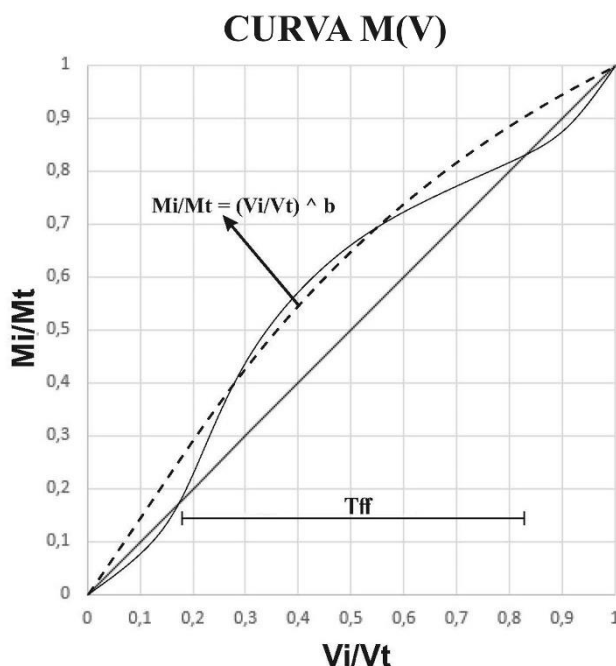


FIG.5.27 Curva $M(V)$ y su ajuste con fórmula potencial

Se ajustó:

$$\frac{M_i}{M_t} = \left(\frac{V_i}{V_t} \right)^b$$

[C5-26]

mediante regresión lineal (*Bertrand-Krajewski et al., 1998*):

$$\ln \left(\frac{M_i}{M_t} \right) = b \cdot \ln \left(\frac{V_i}{V_t} \right) \quad [\text{C5-27}]$$

obteniendo el exponente “b”. Este parámetro permite evaluar cuantitativamente la existencia del primer lavado. Valores del parámetro menores a 1 indican la existencia de un primer lavado. Cuanto menor sea el valor de “b”, más intenso será el primer lavado debido a que la mayor proporción de la carga contaminante total se transporta en la primera parte del volumen total. (*Bertrand-Krajewski et al., 1998; Suárez y Puertas, 2005*).

Se realizaron dos ajustes:

- 1) Con los valores de M_i y V_i durante el tiempo T_t :

Obteniendo un coeficiente de determinación de la regresión lineal R^2 que se denominará R^2_{MiMt} y un exponente “b” que se designará como b_{MiMt} para diferenciarlo del siguiente ajuste que se describe a continuación.

- 2) Con los valores de M_i y V_i durante el tiempo T_{ff} (ver FIG.5.28):

Obteniendo un coeficiente de determinación de la regresión lineal R^2 que se denominará $R^2_{MiMtTff}$ y un exponente “b” que se designará como $b_{MiMtTff}$.

Se calcularon otras variables que caracterizan la curva $M(V)$:

CURVA $M(V)$

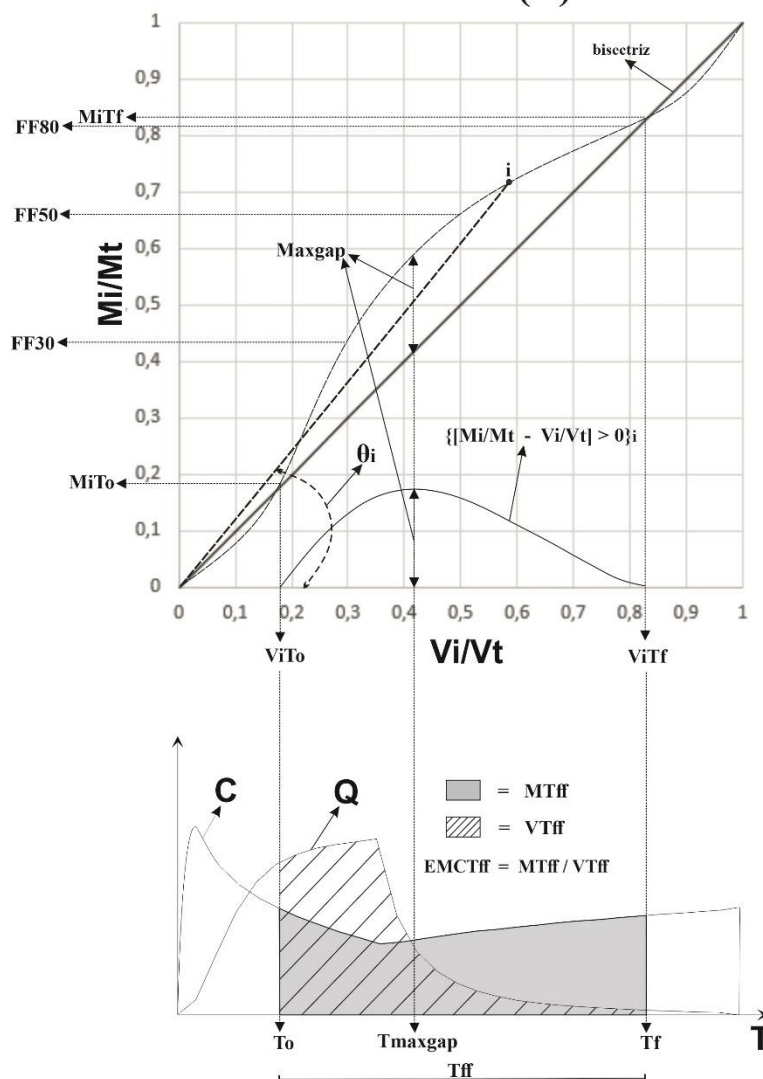


FIG.5.28 Variables de caracterización de la curva $M(V)$

Donde:

- T_o , T_f y T_{ff} son: inicio, fin y duración de la condición $M_i/M_t > V_i/V_t$.
- V_{iTo} , M_{iTo} son fracciones al tiempo T_o .
- V_{iTf} , M_{iTf} son fracciones al tiempo T_f .
- FF_{30} , FF_{50} y FF_{80} son las fracciones M_i/M_t que corresponden al 30%, 50% y 80% de V_i/V_t respectivamente y se hallan por interpolación bilineal "bilinear interpolation" (entre 2 pares de valores M_i/M_t y V_i/V_t adyacentes).
- $Maxgap$ es la máxima diferencia positiva de $[M_i/M_t - V_i/V_t]$.
- MT_{ff} , VT_{ff} y $EMCT_{ff}$ son respectivamente: la masa de contaminante lavado, el

volumen de escurrentía y la concentración media del evento, durante el tiempo Tff.

$$EMCTff = \frac{MTff}{VTff} = \frac{\int_{T_o}^{T_f} C(t) \cdot Q(t) dt}{\int_{T_o}^{T_f} Q(t) dt} \quad [C5-28]$$

Además, se calculó:

$$\%VTff = \frac{VTff}{V_t} \cdot 100 \quad [C5-29]$$

$$\%MTff = \frac{MTff}{M_t} \cdot 100 \quad [C5-30]$$

$$VTffrate = \frac{VTff}{Tff} \quad [C5-31]$$

$$MTffrate = \frac{MTff}{Tff} \quad [C5-32]$$

El criterio para el cálculo del exponente “b” del ajuste potencial de la curva M(V) ya ha sido muy estudiado, se proponen a continuación alternativas a este método para evaluar la condición del primer lavado y que además permitan establecer criterios de evaluación/comparación para los diferentes polutogramas generados por las lluvias estudiadas. Los nuevos criterios para establecer la condición de que ocurra o no un primer lavado son:

5.3.3.2.1.- Criterio de primer lavado N°1: $[Mi/Mt - Vi/Vt] > 0$

En cualquier punto de la bisectriz (“bisectriz”, recta a 45°) del gráfico M(V) se cumple la condición $Mi/Mt = Vi/Vt$. Para que se produzca un primer lavado, por tanto, debe cumplirse que:

$$\frac{Mi}{Mt} > \frac{Vi}{Vt} \quad [C5-33]$$

Si restamos a ambos miembros de la desigualdad Vi/Vt , la condición para que se produzca un primer lavado estaría definida por la expresión:

$$\left[\frac{M_i}{M_t} - \frac{V_i}{V_t} \right] > 0 \quad [C5-34]$$

y los tiempos en que se cumple esta condición en la curva M(V) son To, Tf y su duración Tff.

Así, como criterio de evaluación de los diferentes polutogramas, se define el parámetro GapmeanTff(M) como la media de los valores $\left[\frac{M_i}{M_t} - \frac{V_i}{V_t} \right]$ que cumplen el condicionante $\left[\frac{M_i}{M_t} - \frac{V_i}{V_t} \right] > 0$ durante el tiempo Tff. "n" es el número de valores que satisfacen la desigualdad.

$$GapmeanTff(M) = \left(\sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{M_i}{M_t} - \frac{V_i}{V_t} \right] > 0 \right\}_i \right) / n \quad [C5-35]$$

En consecuencia, para que haya un primer lavado, se debe cumplir que GapmeanTff(M) > 0 y además, cuanto mayor sea el valor de GapmeanTff(M), mayor será el efecto del primer lavado.

Adicionalmente, se pueden definir otras variables, como:

$$MassGapmean = GapmeanTff(M) \cdot M_t \quad [C5-36]$$

$$\%MassGapmean = \frac{MassGapmean}{M_t} \cdot 100 = GapmeanTff(M) \cdot 100 \quad [C5-37]$$

$$MassGapmeanrate = \frac{MassGapmean}{Tff} \quad [C5-38]$$

De manera análoga se puede analizar esta condición:

$$\left[\frac{V_i}{V_t} - \frac{M_i}{M_t} \right] > 0 \quad [C5-39]$$

Si se define "Tv" como la duración del tiempo (min) en el que Vi/Vt > Mi/Mt; es decir, el tiempo en el que los valores de la curva M(V) están por debajo de la bisectriz del gráfico, también se podrían definir las siguientes variables:

$$GapmeanTff(V) = \left(\sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{V_i}{V_t} - \frac{M_i}{M_t} \right] > 0 \right\}_i \right) / n \quad [C5-40]$$

"n" es el número de valores que cumplen la condición dentro de los paréntesis.

$$VolGapmean = GapmeanTff(V) \cdot V_t \quad [C5-41]$$

$$\%VolGapmean = \frac{VolGapmean}{V_t} \cdot 100 = GapmeanTff(V) \cdot 100 \quad [C5-42]$$

$$VolGapmeanrate = \frac{VolGapmean}{T_v} \quad [C5-43]$$

5.3.3.2.2.- Criterio de primer lavado N°2: $\theta_i > 45^\circ$

El valor de V_i/V_t es siempre positivo (> 0); por lo tanto, si dividimos cada miembro por V_i/V_t en la desigualdad de la Ecuación [C5-33] la desigualdad no cambia de signo:

$$\frac{\left(\frac{M_i}{M_t}\right)}{\left(\frac{V_i}{V_t}\right)} > \frac{V_i}{V_t} \quad [C5-44]$$

Por lo tanto:

$$\frac{\left(\frac{M_i}{M_t}\right)}{\left(\frac{V_i}{V_t}\right)} > 1 \quad [C5-45]$$

Algunos autores denominan $(M_i/M_t) / (V_i/V_t)$ como MFFR (*"Mass First Flush Ratio"* en inglés) y corresponde a la tangente de la curva $M(V)$ y como ambos miembros de la desigualdad anterior son siempre positivos (> 0) al aplicar la función trigonométrica inversa ($\tan^{-1}$) la desigualdad no cambia de signo:

$$\tan^{-1} \left[\frac{\left(\frac{M_i}{M_t}\right)}{\left(\frac{V_i}{V_t}\right)} \right] > \tan^{-1}(1) \quad [C5-46]$$

El valor izquierdo de la desigualdad corresponde al ángulo θ_i (ver FIG.5.28) y el valor derecho corresponde a 45° . La condición para que se produzca un primer lavado quedaría definida por la expresión:

$$\theta_i > 45^\circ \quad [C5-47]$$

y los tiempos de inicio, fin y duración en que se cumple esta condición en la curva M(V) se denominarán en este estudio Toθ, Tfθ, y Tffθ respectivamente.

Así, como criterio de evaluación de los diferentes polutogramas, se define el parámetro θmean como el promedio de los valores θi que cumplen el condicionante θi > 45° durante el tiempo Tffθ. “n” es el número de valores que cumplen la condición dentro del paréntesis.

$$\theta_{mean} = \left(\sum_{i=1}^n \{\theta_i > 45^\circ\}_i \right) / n \quad [C5-48]$$

En consecuencia, para que haya un primer lavado, debe cumplirse que θmean > 45° y además, cuanto mayor sea el valor de θmean, mayor será el efecto del mismo.

5.3.3.2.3.- Criterio de primer lavado N°3: [DynEMCmean/EMC] > 1

El desarrollo de este criterio se explicó ya con las Ecuaciones [C5-17], [C5-18], [C5-25].

Así pues, se define el parámetro DynEMCmean/EMC también como un criterio adicional para evaluar los diferentes polutogramas. Para que exista un primer lavado se debe cumplir que [DynEMCmean/EMC] > 1 y además, cuanto mayor sea el valor de DynEMCmean/EMC, mayor será el efecto del primer lavado.

5.3.3.3.- Criterios para la selección de los polutogramas más desfavorables dentro de la matriz de lluvias elegida

Para seleccionar los polutogramas más desfavorables dentro de la matriz de lluvias elegida, es esencial definir qué se entiende por un evento más desfavorable, ya que esto puede variar según el objetivo de aplicación. Este concepto puede diferir si se considera el vertido de escorrentía a un cuerpo de agua receptor, como un río, estuario o mar, o si se trata de su entrada directa a una estación depuradora de aguas residuales (EDAR); asimismo, varía si el objetivo es diseñar un sistema de control y tratamiento de reboses.

Desde un punto de vista cualitativo, el polutograma más desfavorable será aquel que aporte mayor contaminación. Es necesario precisar qué se entiende por mayor contaminación, ya que esto puede referirse a la concentración, al flujo másico instantáneo o a la masa vertida.

5.3.3.3.1.- Exponente “b” del ajuste potencial de la curva M(V)

Un criterio generalizado para evaluar un evento de contaminación por escorrentía urbana es determinar si ocurre un primer lavado o no. Al realizar un ajuste potencial de la curva M(V), la determinación del exponente "b" permite una evaluación cuantitativa de la existencia del primer lavado. Dentro de la matriz de lluvias elegida, el cálculo del exponente "b" permitirá identificar aquellos polutogramas que son más desfavorables. Cuanto menor sea el valor de "b", más intenso será el primer lavado.

5.3.3.3.2.- Criterio “Dosis - Tiempo de Exposición” con variables: EMC, bMiMt, Tff

Un evento desfavorable de contaminación será más crítico cuanto más contaminación transporte y vierta en su destino final; sin embargo, además de la cantidad de contaminación, otro factor predominante será la duración del vertido de dicha contaminación. Consecuentemente, se puede hablar de un efecto "Dosis - Tiempo de Exposición". Existen varias investigaciones que representan este efecto para diversos tipos de contaminantes, relacionando en un gráfico tridimensional las variables: concentración del contaminante (Dosis), duración del evento (Tiempo de Exposición) y período de retorno (House *et al.*, 1993; Lijklema *et al.*, 1993; Suárez López y Cagiao Villar, 2005). Para un período de retorno dado, una curva del gráfico tridimensional mencionado puede representarse mediante la ecuación:

$$Tdose = Dose^{\alpha} \cdot (Exposure Time)^{\beta} \quad [C5-49]$$

Donde:

α y β : Son exponentes (valores adimensionales) de ajuste de la curva Dosis – Tiempo de Exposición

Tdose: Valor adimensional que denota el grado de impacto de la combinación Dosis – Tiempo de Exposición

En la ecuación anterior, se puede forzar que $\beta = 1$ y recalcular α y Tdose. El nuevo valor de Tdose se utilizará para comparar e identificar dentro de todos los polutogramas de la matriz de lluvias elegida, aquellos polutogramas que sean más desfavorables; es decir, aquellos con valores de Tdose más elevados. Así, la ecuación sería:

$$Tdose = Dose^{\alpha} \cdot Exposure Time \quad [C5-50]$$

Utilizando las variables de caracterización de los polutogramas y las variables de caracterización de la curva M(V), se puede utilizar la EMC como Dosis y Tff como Tiempo de Exposición. Adicionalmente, en esta investigación se utilizará α como el inverso del valor del exponente “b”; “b” del ajuste potencial de la curva M(V):

$$\alpha = \frac{1}{b} = \frac{1}{bMiMt} \quad [C5-51]$$

Resumiendo:

$$Tdose = (EMC)^{1/bMiMt} \cdot Tff \quad [C5-52]$$

Tff: Duración del tiempo (min) en el que $Mi/Mt > Vi/Vt$

EMC: Concentración Media del Evento (kg/m^3). Se expresa en kg/m^3 en lugar de mg/L simplemente para que los valores de Tdose no sean demasiado grandes

bMiMt: Exponente del ajuste potencial de la curva $M(V)$

Tdose: Dosis - Tiempo de Exposición

Es importante señalar que esta ecuación no pretende representar ninguna curva de las gráficas tridimensionales comentadas en las referencias bibliográficas citadas anteriormente en este apartado, lo que permite esta ecuación es crear una herramienta metodológica para poder evaluar y comparar los diferentes polutogramas obtenidos dentro de la matriz de lluvias elegida; obteniendo así el más desfavorable desde el punto de vista de la contaminación.

5.3.3.3.3.- Criterio “Dosis - Tiempo de Exposición” con variables: EMCTff, bMiMtTff, Tff

Puesto que se realizan dos ajustes potenciales para determinar el primer lavado, se presenta también la siguiente ecuación:

$$TdoseTff = (EMCTff)^{1/bMiMtTff} \cdot Tff \quad [C5-53]$$

Tff: Duración del tiempo (min) en el que $Mi/Mt > Vi/Vt$

EMCTff: Concentración media del evento (kg/m^3) durante Tff

bMiMtTff: Exponente del ajuste potencial exclusivo durante Tff de la curva $M(V)$

TdoseTff: Dosis - Tiempo de Exposición durante Tff

De esta manera se definen todas las variables de caracterización tanto las de los polutogramas como las de la curva $M(V)$. Son en total, 65 variables de caracterización.

5.3.4.- Resultados y discusión

5.3.4.1.- Valores resultantes de las variables para cada contaminante simulado

Las simulaciones realizadas con SWMM 5.2.4 arrojaron valores de las variables de caracterización para los tres contaminantes simulados ST, DBO₅, NT (TS, BOD₅, TN, en inglés), observándose el siguiente comportamiento:

Variables independientes del tipo de contaminante:

I, D, P, Qmean, Qmax, Qfp, Vrain, Vt, Vloss, Tqmax, Tt: El comportamiento de estas variables es independiente del tipo de contaminante.

Variables con valores iguales para cada tipo de contaminante:

Tcp, Tclast, Tfp, R2MiMt, bMiMt, Tff, FF30, FF50, FF80, R2MiMtTff, bMiMtTff, Maxgap, Tmaxgap, To, ViTo, MiTo, Tf, ViTf, MiTf, VTff, %VTff, VTffrate, %MTff, GapmeanTff(M), %MassGapmean, Tv, GapmeanTff(V), VolGapmean, %VolGapmean, VolGapmeanrate, Toθ, Tfθ, Tffθ, θmean, ToDynEMC, TfDynEMC, TffDynEMC, DynEMCmean/EMC: Estas variables presentan valores iguales para los tres contaminantes simulados.

Variables cuyos valores pueden expresarse como una fracción de TS:

Cp, Clast, Cm, EMC, EMCTff, Cfp, Fp, Fm, Mt, MTff, MTffrate, MassGapmean, MassGapmeanrate, DynEMCmean: Si se conocen los valores de estas variables para TS, se pueden calcular para BOD₅ = 5,03/1000 de TS, y TN = 0,48/1000 de TS, o cualquier otro contaminante. *Temprano et al., 2006*, por ejemplo, citan TSS = 200/1000 de TS.

Variables cuyos valores pueden expresarse indirectamente como una fracción de TS:

Tdose, TdoseTff

$$Tdose_{BOD_5} = \left(\frac{5,03}{1000} \right)^{1/bMiMt} \cdot Tdose_{TS} \quad [C5-54]$$

$$Tdose_{TN} = \left(\frac{0,48}{1000} \right)^{1/bMiMt} \cdot Tdose_{TS} \quad [C5-55]$$

$$TdoseTff_{BOD_5} = \left(\frac{5,03}{1000} \right)^{1/bMiMtTff} \cdot TdoseTff_{TS} \quad [C5-56]$$

$$TdoseTff_{TN} = \left(\frac{0,48}{1000} \right)^{1/bMiMtTff} \cdot TdoseTff_{TS} \quad [C5-57]$$

5.3.4.2.- Gráficos representativos de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado)

Con los datos de las simulaciones SWMM y con la ayuda del libro Excel (Anexo A4.6 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN), se realizaron gráficos adicionales. De la matriz de lluvias se tomó como ejemplo la misma lluvia con $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$ para presentar gráficos de caracterización de las variables mencionadas. Todas las figuras que se presentan a continuación sirven para comprender de mejor forma en que consisten las nuevas variables de caracterización propuestas.

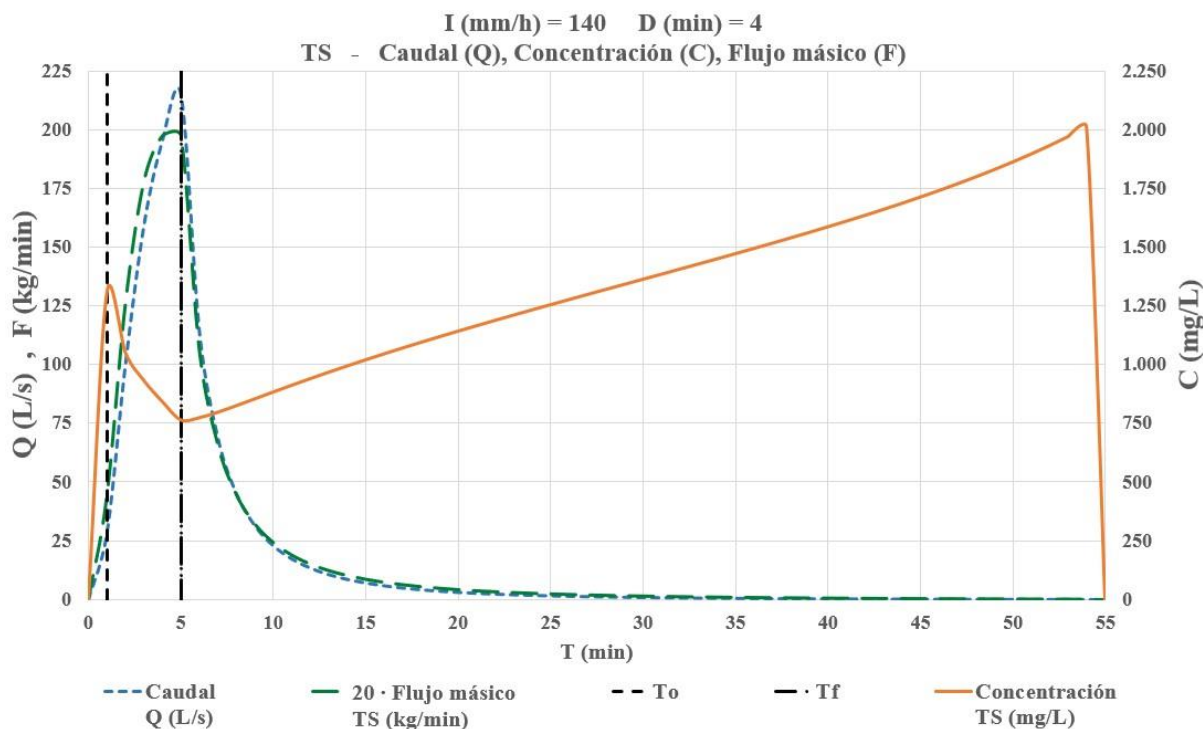


FIG.5.29 Representación de T_o y T_f en el hidrograma y polutogramas (Contaminante TS) obtenidos para la lluvia $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$

T_o y T_f caracterizan la duración T_{ff} en la que se cumple la condición $M_i/M_t > V_i/V_t$ que provoca el primer lavado. Se puede observar que, para este evento de contaminación, el primer lavado ocurre dentro de los primeros cinco minutos de escorrentía. Para observar mejor este efecto, se realiza una ampliación (“Zoom”) del polutograma (concentración) durante los primeros ocho minutos de escorrentía, agregando más variables de caracterización.

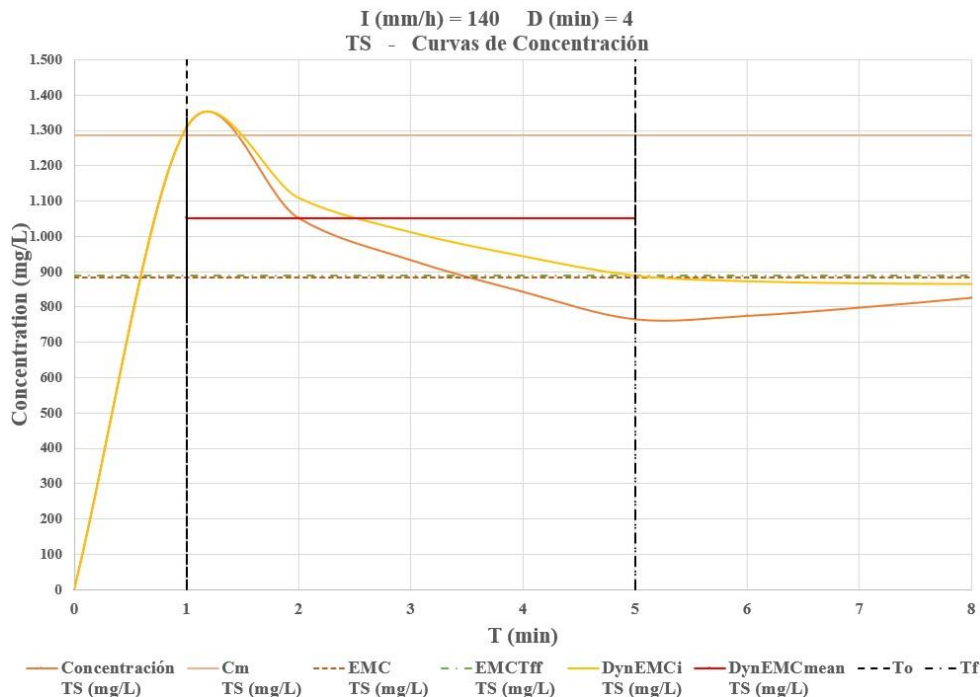


FIG.5.30 Variables de caracterización de la concentración (Contaminante TS) obtenidas para la lluvia $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$ durante los primeros ocho minutos

En esta figura se puede observar claramente que:

- EMC y EMCTff son prácticamente iguales (se solapan).
- La condición $\text{DynEMCi} > \text{EMC}$ se cumple entre los tiempos T_o y T_f . El valor de la concentración de DynEMCi a medida que pasa el tiempo se aproxima al valor de EMC.

Los hidrogramas, polutogramas y otras variables de caracterización también se pueden representar en una figura donde el eje de abscisas esté normalizado, como por ejemplo V_i/V_t :

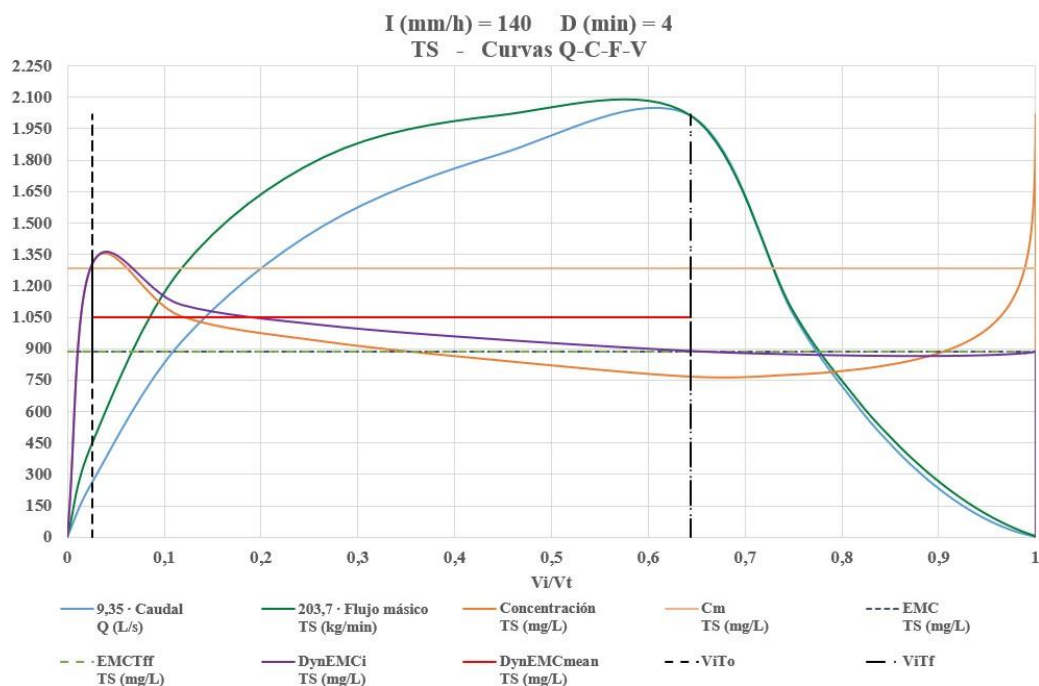


FIG.5.31 Hidrograma, polutogramas y variables de caracterización (Contaminante TS) obtenidos para la lluvia $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$ con eje de abscisas normalizado V_i/V_t

De manera similar, para M_i/M_t :

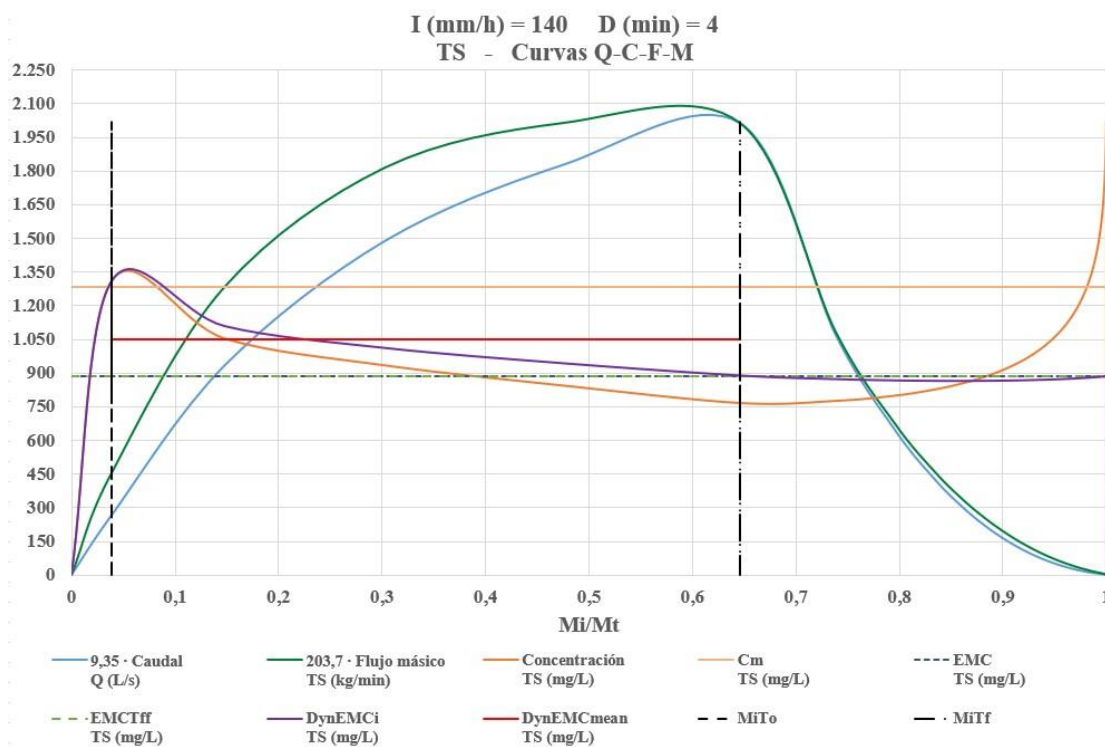


FIG.5.32 Hidrograma, polutogramas y variables de caracterización (Contaminante TS) obtenidos para la lluvia $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$ con eje de abscisas estandarizado M_i/M_t

Para el estudio del primer lavado fue necesario representar las curvas $M(V)$ de los eventos de contaminación.

a) Ajuste de regresión durante el tiempo T_t :

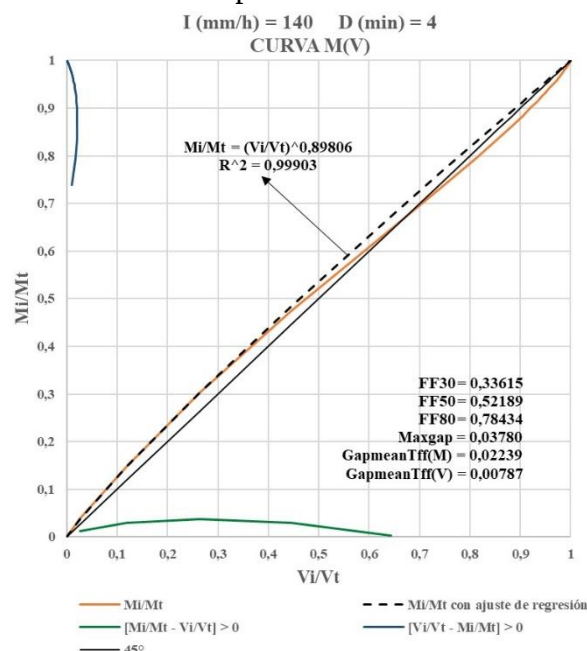


FIG.5.33 Curva $M(V)$ y ajuste de regresión durante el tiempo T_t obtenido para la lluvia $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$

b) Ajuste de regresión durante el tiempo T_{ff} :

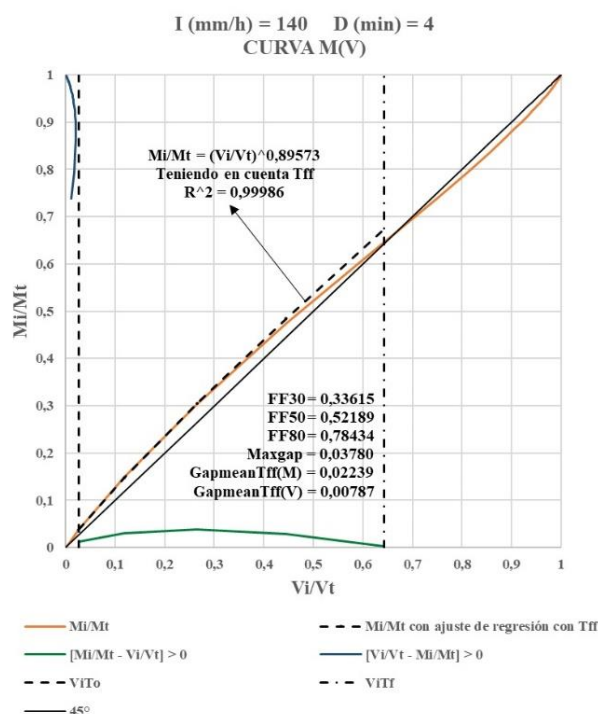


FIG.5.34 Curva $M(V)$ y ajuste de regresión durante el tiempo T_{ff} obtenido para la lluvia $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$

De las figuras anteriores se puede afirmar que los ajustes de regresión presentan valores ligeramente diferentes de “b” con $b_{MiMt} = 0,89806$ y $b_{MiMtTff} = 0,89573$.

Las curvas $M(V)$ también se pueden representar en un gráfico donde el eje de abscisas está normalizado respecto del tiempo, T_i/T_t :

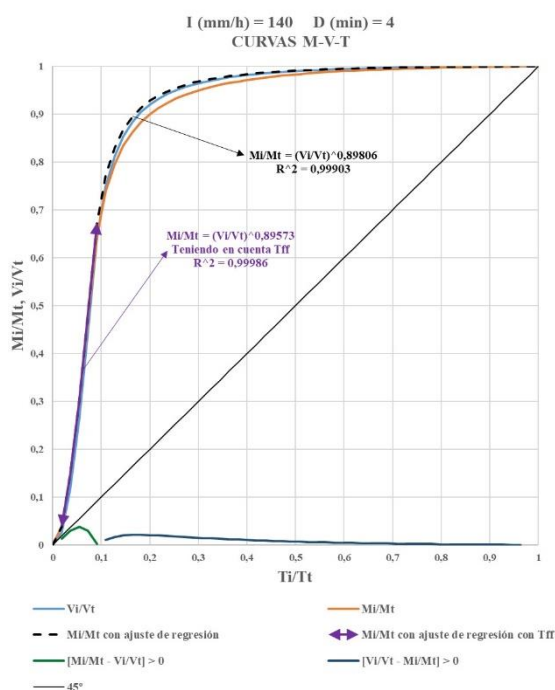


FIG.5.35 Curvas $M(V)$ y ajustes de regresión obtenidos para la lluvia $I = 140$ mm/h, $D = 4$ min, con eje de abscisas estandarizado T_i/T_t

El gráfico θ_i -T también puede representarse mediante la herramienta auxiliar utilizada:

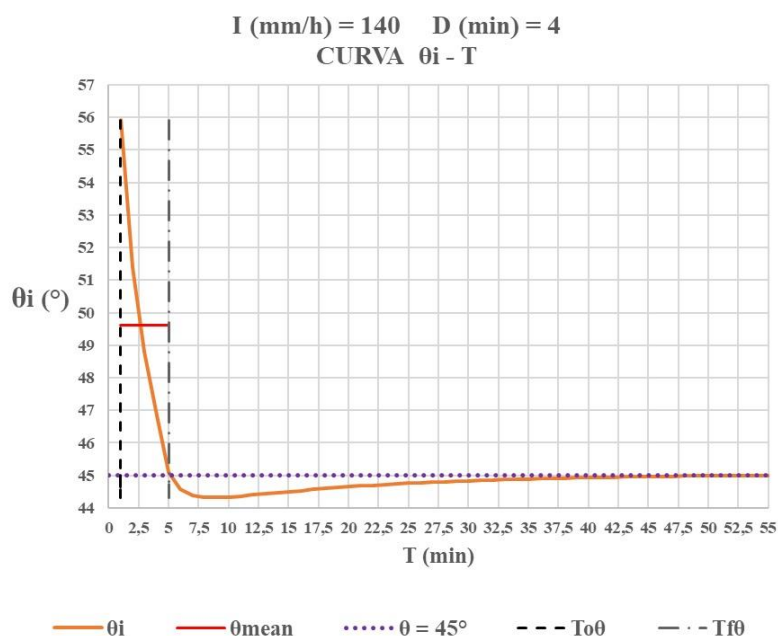


FIG.5.36 Curva θ_i -T obtenida para la lluvia $I = 140$ mm/h, $D = 4$ min

En esta figura se puede observar claramente que la condición $\theta_i > 45^\circ$ se cumple entre los instantes T_o y T_f . El valor del ángulo θ_i a medida que transcurre el tiempo se aproxima al valor de 45° .

Por último, la figura anterior también se puede representar con el eje de abscisas normalizado V_i/V_t :

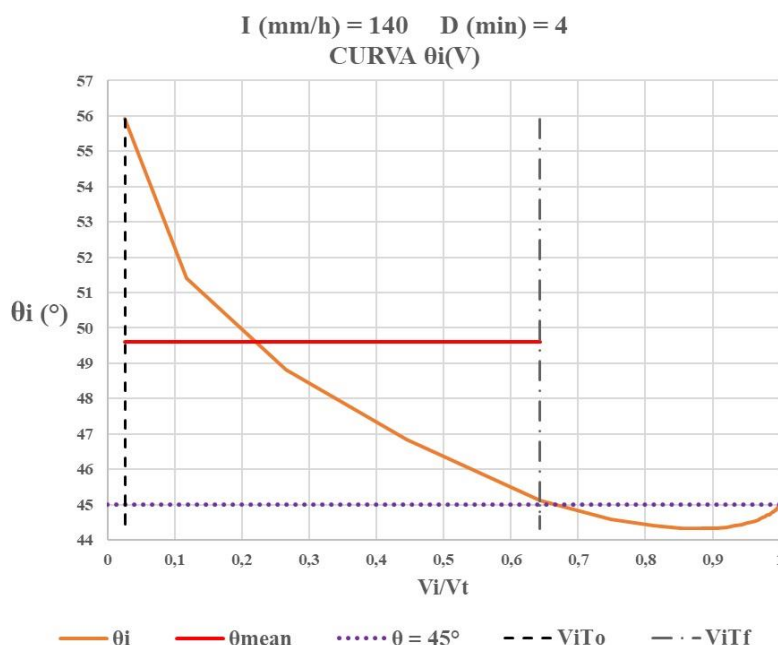


FIG.5.37 Curva $\theta_i(V)$ obtenida para la lluvia $I = 140 \text{ mm/h}$, $D = 4 \text{ min}$

5.3.4.3.- Valores de las variables de caracterización para cada I-D de la matriz de lluvias elegida y sus gráficos de contorno

En el Anexo A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS se pueden observar todos los valores de las variables de caracterización (de los polutogramas y del primer lavado para el contaminante TS) que se obtienen de las simulaciones de las lluvias seleccionadas. En dicho Anexo también se han detallado para cada una de las variables, los valores de su: media aritmética, máximo, mínimo, desviación estándar, coeficiente de variación (%) y P90.

Tomando como único ejemplo bMiMt (de 64 posibles), los valores obtenidos de esta variable para la matriz de lluvias elegida se pueden representar de la siguiente manera:

a) En forma de tabla:

Tabla 5.8 Valores de bMiMt en la matriz de lluvias para el contaminante TS

I (mm/h)	D (min)																
	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	50	80	120	180	240	300	
300	0,89	0,81	0,74	0,68	0,63	0,52	0,44	0,39	0,35	0,32	0,25	0,19	0,14	0,11	0,09	0,08	
140	0,95	0,90	0,86	0,83	0,81	0,74	0,68	0,63	0,58	0,54	0,44	0,34	0,26	0,20	0,17	0,14	
120	0,96	0,91	0,88	0,85	0,83	0,77	0,72	0,67	0,63	0,59	0,49	0,38	0,29	0,23	0,19	0,16	
100	0,97	0,92	0,89	0,87	0,85	0,80	0,76	0,72	0,68	0,64	0,55	0,43	0,34	0,26	0,22	0,19	
80	0,97	0,92	0,90	0,88	0,87	0,83	0,80	0,77	0,73	0,70	0,62	0,49	0,39	0,31	0,26	0,22	
60	0,98	0,93	0,91	0,90	0,88	0,86	0,83	0,81	0,79	0,76	0,70	0,58	0,47	0,38	0,32	0,27	
40	0,99	0,95	0,92	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,77	0,69	0,60	0,49	0,42	0,37	
20	1,02	0,97	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,85	0,80	0,73	0,65	0,58	0,53	
10	1,00	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,86	0,82	0,77	0,72	0,67	
7	0,99	0,98	0,96	0,96	0,95	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,88	0,85	0,81	0,77	0,74	
5	1,02	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,84	0,81	0,78	
3	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,84	
1	0,00	0,00	0,00	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,92	0,91	0,90	0,90	
Media aritmética: 0,74																Desviación estándar: 0,26	
Mínimo: 0,00																Coeficiente de variación (%): 35,64	
Máximo: 1,02																P90: 0,97	

También esta tabla puede completarse añadiendo a cada valor de la variable bMiMt su correspondiente probabilidad de ocurrencia, es decir su período de retorno asociado (Tr), aspecto explicado en el apartado 4.2.4.2.1 utilizando la Ecuación [C4-10] y reflejado, por ejemplo, en la Tabla 4.3.

b) En forma de gráfico de contorno:

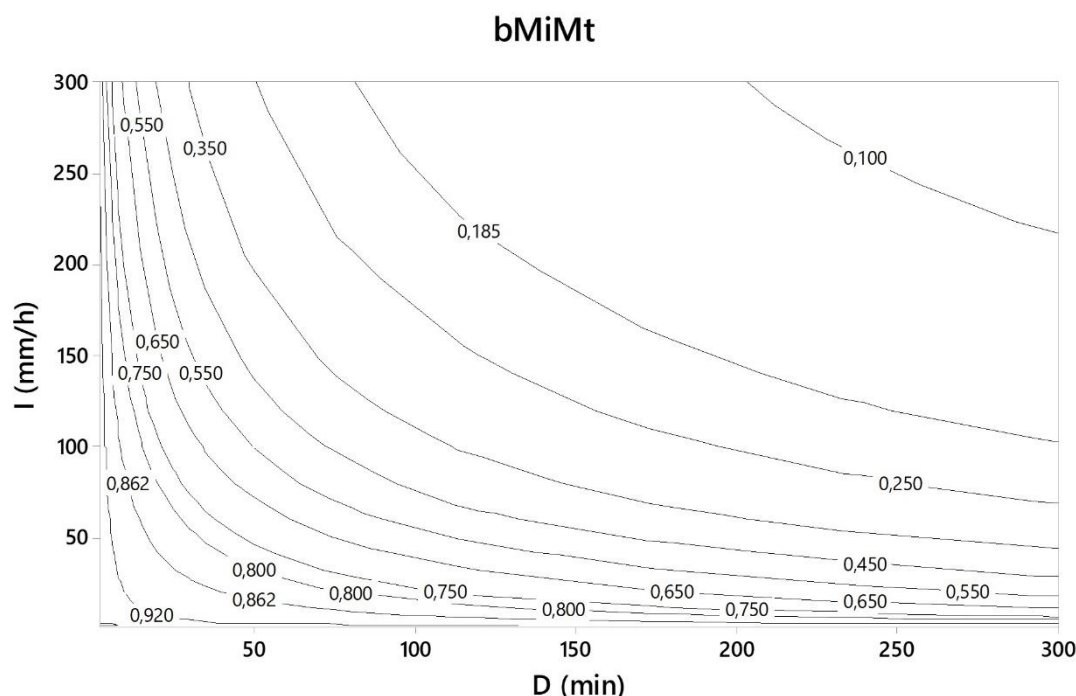


FIG.5.38 Gráfico de contorno de bMiMt para el contaminante TS

Análogamente, el resto de las variables de caracterización tanto de los polutogramas como del primer lavado con sus valores y sus gráficos de contorno (para el contaminante TS) se pueden observar en el Anexo A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS y en el Anexo A5.3 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS.

5.3.4.4.- Coeficientes de correlación y coeficientes de determinación de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado)

Añadida la variable periodo de retorno T_r (años) como variable adicional a considerar, en el Anexo A5.4 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y DETERMINACIÓN ENTRE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS se pueden observar los coeficientes de correlación “R” y coeficientes de determinación “R²” existentes entre todas las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado) para el contaminante TS.

5.3.4.4.1.- Mejores coeficientes de determinación para cada variable de caracterización

La siguiente tabla muestra los cinco mejores R² para cada variable de caracterización del contaminante TS.

Tabla 5.9 Mejores coeficientes de determinación R^2 de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado) para el contaminante TS

I (mm/h)	Qfp (L/s); 0,994	Fp (kg/min); 0,982	Qmax (L/s); 0,945	VTffrate (m3/min); 0,682	Cp (mg/L); 0,606
D (min)	Tclast (min); 0,983	Tt (min); 0,983	Tff (min); 0,966	Tf0 (min); 0,966	TffDynEMC (min); 0,966
P (mm)	Vrain (m3); 1,000	VTff (m3); 0,995	Vt (m3); 0,995	Qmean (L/s); 0,834	DynEMCmean/EMC; 0,819
Qmean (L/s)	VTffrate (m3/min); 0,914	VTff (m3); 0,837	Vt (m3); 0,836	P (mm); 0,834	Vrain (m3); 0,834
Qmax (L/s)	Qfp (L/s); 0,951	I (mm/h); 0,945	Fp (kg/min); 0,922	VTffrate (m3/min); 0,800	Qmean (L/s); 0,719
Qfp (L/s)	I (mm/h); 0,994	Fp (kg/min); 0,988	Qmax (L/s); 0,951	VTffrate (m3/min); 0,694	Cp (mg/L); 0,608
Vrain (m3)	P (mm); 1,000	VTff (m3); 0,995	Vt (m3); 0,995	Qmean (L/s); 0,834	DynEMCmean/EMC; 0,819
Vt (m3)	VTff (m3); 1,000	P (mm); 0,995	Vrain (m3); 0,995	Tr (years); 0,847	Qmean (L/s); 0,836
Vloss (m3)	GapmeanTff(M); 0,940	%MassGapmean; 0,940	MassGapmean (kg); 0,940	DynEMCmean/EMC; 0,872	Maxgap; 0,862
Cp (mg/L)	Cfp (mg/L); 0,718	Fp (kg/min); 0,682	DynEMCmean (mg/L); 0,679	MassGapmeanrate (kg/min); 0,661	EMC (mg/L); 0,637
Clast (mg/L)	Cm (mg/L); 0,949	Mt (kg); 0,936	MTff (kg); 0,932	EMC (mg/L); 0,865	DynEMCmean (mg/L); 0,855
Cm (mg/L)	Clast (mg/L); 0,949	DynEMCmean (mg/L); 0,926	EMCTff (mg/L); 0,901	Mt (kg); 0,883	MTff (kg); 0,865
EMC (mg/L)	EMCTff (mg/L); 0,929	DynEMCmean (mg/L); 0,913	Cfp (mg/L); 0,868	Clast (mg/L); 0,865	Cm (mg/L); 0,846
Cfp (mg/L)	EMC (mg/L); 0,868	EMCTff (mg/L); 0,769	DynEMCmean (mg/L); 0,749	Cp (mg/L); 0,718	Cm (mg/L); 0,578
EMCTff (mg/L)	DynEMCmean (mg/L); 0,987	EMC (mg/L); 0,929	Cm (mg/L); 0,901	Clast (mg/L); 0,841	Mt (kg); 0,783
Fp (kg/min)	Qfp (L/s); 0,988	I (mm/h); 0,982	Qmax (L/s); 0,922	VTffrate (m3/min); 0,686	Cp (mg/L); 0,682
Fm (kg/min)	Fp (kg/min); 0,557	Cp (mg/L); 0,536	MassGapmeanrate (kg/min); 0,505	Qfp (L/s); 0,500	Cfp (mg/L); 0,483
Mt (kg)	MTff (kg); 0,988	Clast (mg/L); 0,936	Cm (mg/L); 0,883	FF50; 0,816	EMC (mg/L); 0,805
Tqmax (min)	Vloss (m3); 0,782	Tclast (min); 0,745	Tt (min); 0,745	Tf (min); 0,742	Tf0 (min); 0,742
Tcp (min)	To (min); 0,898	To0 (min); 0,898	ToDynEMC (min); 0,898	Cfp (mg/L); 0,496	Tfp (min); 0,398
Tclast (min)	Tt (min); 1,000	D (min); 0,983	Tff (min); 0,975	Tf0 (min); 0,975	TffDynEMC (min); 0,975
Tfp (min)	TdoseTff; 0,799	Tdose; 0,798	To (min); 0,434	To0 (min); 0,434	ToDynEMC (min); 0,434
Tt (min)	Tclast (min); 1,000	D (min); 0,983	Tff (min); 0,975	Tf0 (min); 0,975	TffDynEMC (min); 0,975
R2MiMt	R2MiMtTff; 0,865	bMiMtTff; 0,766	bMiMt; 0,761	MassGapmean (kg); 0,589	P (mm); 0,589
bMiMt	bMiMtTff; 0,999	Maxgap; 0,809	R2MiMtTff; 0,800	MassGapmean (kg); 0,764	R2MiMt; 0,761
Tff (min)	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000	Tt (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000
Tdose	TdoseTff; 1,000	Tfp (min); 0,798	Tmaxgap (min); 0,618	To (min); 0,245	To0 (min); 0,245
FF30	Maxgap; 0,972	FF50; 0,958	MassGapmean (kg); 0,914	CapmeanTff(M); 0,911	%MassGapmean; 0,911
FF50	FF30; 0,958	Maxgap; 0,881	MTff (kg); 0,826	Mt (kg); 0,816	FF80; 0,810
FF80	FF50; 0,810	0mean (°); 0,663	FF30; 0,659	MTff (kg); 0,609	Mt (kg); 0,604
R2MiMtTff	R2MiMt; 0,865	bMiMtTff; 0,806	bMiMt; 0,800	P (mm); 0,507	Vrain (m3); 0,507
bMiMtTff	bMiMt; 0,999	Maxgap; 0,809	R2MiMtTff; 0,806	R2MiMt; 0,766	MassGapmean (kg); 0,766
TdoseTff	Tdose; 1,000	Tfp (min); 0,799	Tmaxgap (min); 0,617	Cp (mg/L); 0,245	To (min); 0,245
Maxgap	FF30; 0,972	MassGapmean (kg); 0,957	CapmeanTff(M); 0,951	%MassGapmean; 0,951	FF50; 0,881
Tmaxgap (min)	D (min); 0,690	Tclast (min); 0,655	Tt (min); 0,655	Tf (min); 0,620	Tf0 (min); 0,620
To (min)	To0 (min); 1,000	ToDynEMC (min); 1,000	Tcp (min); 0,898	Tfp (min); 0,434	Cfp (mg/L); 0,416
ViTo	MTff; 0,674	EMCTff (mg/L); 0,151	EMC (mg/L); 0,136	VTff; 0,135	%VTff; 0,135
MiTo	ViTo; 0,674	I (mm/h); 0,396	Qfp (L/s); 0,368	Qmax (L/s); 0,328	Fp (kg/min); 0,322
Tf (min)	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000	Tff (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000
ViTf	%VTff; 1,000	MTff; 1,000	%MTff; 1,000	GapmeanTff(V); 0,803	%VolGapmean; 0,803
MTff	%MTff; 1,000	VTff; 1,000	%VTff; 1,000	GapmeanTff(V); 0,803	%VolGapmean; 0,803
VTff (m3)	Vt (m3); 1,000	P (mm); 0,995	Vrain (m3); 0,995	Tr (years); 0,847	Qmean (L/s); 0,837
% VTff	VTff; 1,000	MTff; 1,000	%MTff; 1,000	GapmeanTff(V); 0,803	%VolGapmean; 0,803
VTffrate (m3/min)	Qmean (L/s); 0,914	Qmax (L/s); 0,800	Vt (m3); 0,747	VTff (m3); 0,746	P (mm); 0,739
MTff (kg)	Mt (kg); 0,988	Clast (mg/L); 0,932	Cm (mg/L); 0,865	FF50; 0,826	EMC (mg/L); 0,746
% MTff	MTff; 1,000	VTff; 1,000	%VTff; 1,000	GapmeanTff(V); 0,803	%VolGapmean; 0,803
MTffrate (kg/min)	VolGapmean (m3); 0,424	VolGapmeanrate (m3/min); 0,416	MassGapmeanrate (kg/min); 0,386	Fm (kg/min); 0,349	Cp (mg/L); 0,280
GapmeanTff(M)	%MassGapmean; 1,000	MassGapmean (kg); 0,997	Maxgap; 0,951	Vloss (m3); 0,940	FF30; 0,911
MassGapmean (kg)	GapmeanTff(M); 0,997	%MassGapmean; 0,997	Maxgap; 0,957	Vloss (m3); 0,940	FF30; 0,914
% MassGapmean	GapmeanTff(M); 1,000	MassGapmean (kg); 0,997	Maxgap; 0,951	Vloss (m3); 0,940	FF30; 0,911
MassGapmeanrate (kg/min)	Fp (kg/min); 0,667	Cp (mg/L); 0,661	Qfp (L/s); 0,599	DynEMCmean (mg/L); 0,585	I (mm/h); 0,572
Tv (min)	VolGapmeanrate (m3/min); 0,648	VolGapmean (m3); 0,593	Maxgap; 0,524	bMiMtTff; 0,521	bMiMt; 0,520
GapmeanTff(V)	%VolGapmean; 1,000	VTff; 0,803	%VTff; 0,803	MTff; 0,803	%MTff; 0,803
VolGapmean (m3)	VolGapmeanrate (m3/min); 0,996	Tv (min); 0,593	MTffrate (kg/min); 0,424	Tf (min); 0,215	Tf0 (min); 0,215
% VolGapmean	GapmeanTff(V); 1,000	VTff; 0,803	%VTff; 0,803	MTff; 0,803	%MTff; 0,803
VolGapmeanrate (m3/min)	VolGapmean (m3); 0,996	Tv (min); 0,648	MTffrate (kg/min); 0,416	Tf (min); 0,238	Tf0 (min); 0,238
To0 (min)	To (min); 1,000	ToDynEMC (min); 1,000	Tcp (min); 0,898	Tfp (min); 0,434	Cfp (mg/L); 0,416
Tf0 (min)	Tf (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000	Tff (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000
Tf00 (min)	Tff (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000	Tf (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000
0mean (°)	FF80; 0,663	FF50; 0,511	DynEMCmean/EMC; 0,475	FF30; 0,445	GapmeanTff(M); 0,397
ToDynEMC (min)	To (min); 1,000	To0 (min); 1,000	Tcp (min); 0,898	Tfp (min); 0,434	Cfp (mg/L); 0,416
TfDynEMC (min)	Tf (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	Tff (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000
TffDynEMC (min)	Tff (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	Tf (min); 1,000	Tf0 (min); 1,000	TffDynEMC (min); 1,000
DynEMCmean (mg/L)	EMCTff (mg/L); 0,987	Cm (mg/L); 0,926	EMC (mg/L); 0,913	Clast (mg/L); 0,855	Mt (kg); 0,789
DynEMCmean/EMC	GapmeanTff(M); 0,892	%MassGapmean; 0,892	MassGapmean (kg); 0,888	Vloss (m3); 0,872	Maxgap; 0,831
Tr (years)	Vt (m3); 0,847	VTff (m3); 0,847	P (mm); 0,800	Vrain (m3); 0,800	Qmean (L/s); 0,686

Algunos valores R^2 interesantes de la tabla anterior son:

- a) **GapmeanTff(M) con:** Maxgap; 0,951. Vloss (m³); 0,940. FF30; 0,911
- b) **θmean con:** FF80; 0,663. FF50; 0,511. DynEMCmean/EMC; 0,475. FF30; 0,445. GapmeanTff(M); 0,397
- c) **DynEMCmean con:** EMCTff (mg/L); 0,987. Cm (mg/L); 0,926. EMC (mg/L); 0,913. Clast (mg/L); 0,855. Mt (kg); 0,789
- d) **bMiMt con:** Maxgap; 0,809. R2MiMtTff; 0,800. MassGapmean (kg); 0,764. R2MiMt; 0,761
- e) **bMiMtTff con:** Maxgap; 0,809. R2MiMtTff; 0,806. R2MiMt; 0,766. MassGapmean (kg); 0,766
- f) **Mt con:** FF50; 0,816. EMC (mg/L); 0,805
- g) **Tdose con:** Tfp (min); 0,798. Tmaxgap (min); 0,618
- h) **FF30 con:** Maxgap; 0,972. GapmeanTff(M); 0,91
- i) **DynEMCmean/EMC con:** GapmeanTff(M); 0,892. MassGapmean (kg); 0,888. Maxgap; 0,831

En el Anexo A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS se puede observar que para cualquier evento de la matriz de lluvias elegida se cumple que $T_o = T_{o\theta} = T_{oDynEMC}$ y $T_f = T_{f\theta} = T_{fDynEMC}$; y por lo tanto $T_{ff} = T_{ff\theta} = T_{ffDynEMC}$. Lo mismo se puede deducir observando los valores de R^2 en la última tabla para las mismas variables. Esto se debe a que los métodos propuestos parten de la misma premisa, es decir, $[Mi/Mt - Vi/Vt] > 0$.

5.3.4.5.- Análisis de componentes principales (PCA) y análisis de conglomerados (CA)

El análisis de componentes principales (PCA, en inglés, *Principal Component Analysis*) y el análisis de conglomerados (CA, en inglés, *Cluster Analysis*) se encuentran entre los métodos estadísticos multivariantes más comunes utilizados en estudios de contaminación ambiental. El PCA puede usarse para revelar relaciones en conjuntos de datos complejos y grandes mediante la reducción de la dimensionalidad de los datos. El conjunto de datos se transforma en un nuevo conjunto de variables, componentes principales, que representan la mayor parte de la variación en los datos originales. El primer componente principal explica la mayor varianza posible de los datos y cada componente subsecuente explica la mayor cantidad posible de la varianza restante. Los resultados de un PCA generalmente se informan como puntuaciones y pesos (Björklund, 2011).

En esta investigación se ha utilizado el programa MINITAB 21.1.0 para el análisis.

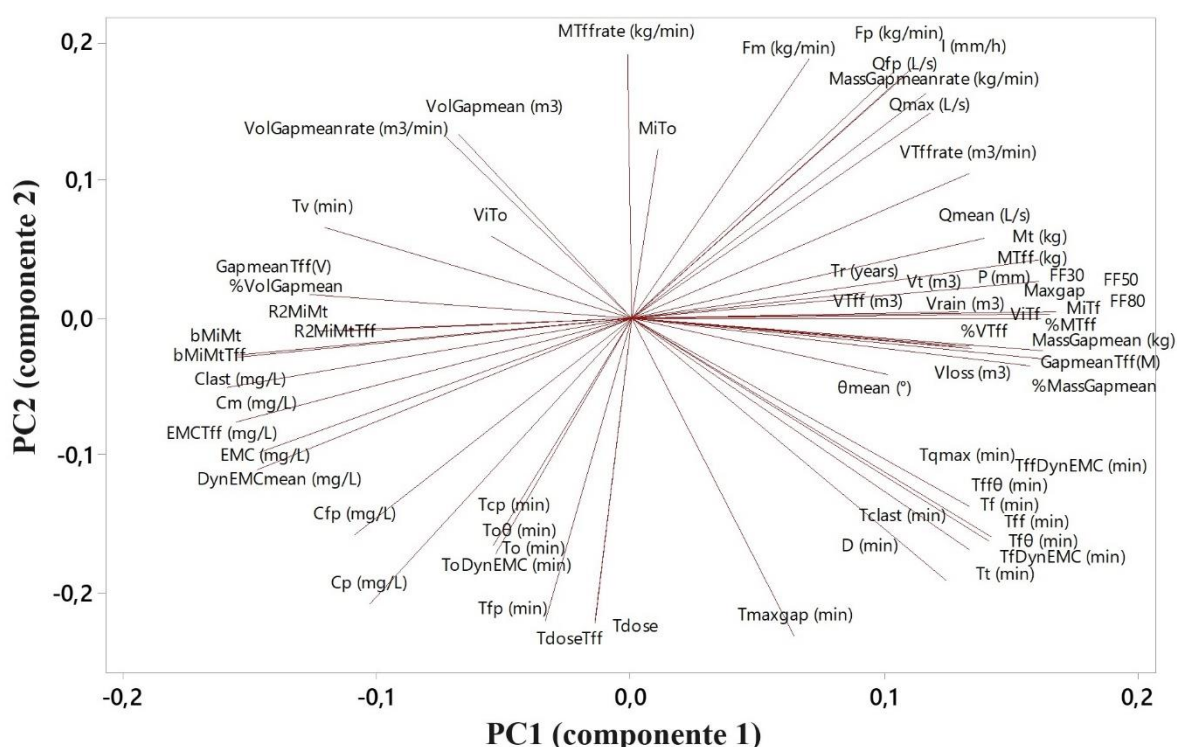


FIG.5.39 Análisis de componentes principales (PCA) de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado) para el contaminante TS

El primer componente, correspondiente al mayor valor propio (*eigenvalue*) de 32,83, explicó más del 49,70% de la varianza total. El segundo componente, correspondiente al segundo valor propio de 11,38, explicó más del 17,30%, y el tercer componente, correspondiente al tercer valor propio de 6,67, explicó más del 10,1%, dando un valor acumulado de aproximadamente 77,10%.

La figura muestra dos grupos diferenciados [PC1 (-'s) y PC1 (+'s)] cuyo coeficiente de correlación entre cada variable de un grupo con otra variable del otro grupo es negativo:

- a) PC1 (-'s) de mayor a menor PC1: Clast, bMiMt, bMiMtTff, Cm, DynEMCmean, EMC, EMCTff, GapmeanTff(V), %VolGapmean, R2MiMt, Tv, R2MiMtTff, Cfp, Cp, VolGapmeanrate, VolGapmean, ViTo, Tcp, To, To θ , ToDynEMC, Tfp, TdoseTff, Tdose, MTffrate.
- b) PC1 (+'s) de menor a mayor PC1: MiTo, Tmaxgap, Fm, Tr, θ mean, I, Qfp, Fp, MassGapmeanrate, Qmax, D, FF80, Vt, VTff, MiTf, %MTff, ViTf, %VTff, VTffrate, Tt, Tclast, Tqmax, P, Vrain, Qmean, Tf, Tf θ , TfDynEMC, Tff, Tff θ , TffDynEMC, DynEMCmean/EMC, Vloss, Mt, MTff, FF50, MassGapmean, GapmeanTff(M), %MassGapmean, FF30, Maxgap.

La figura también muestra dos grupos [PC2 (-'s) and PC2 (+'s)]:

- a) PC2 (-'s) de mayor a menor PC2: Tmaxgap, TdoseTff, Tdose, Tfp, Cp, D, To, Toθ, ToDynEMC, Tt, Tclast, Tcp, Tf, Tfθ, TfdynEMC, Cfp, Tff, Tffθ, TffDynEMC, Tqmax, DynEMCmean, EMC, EMCTff, Cm, Clast, θmean, Vloss, GapmeanTff(M), %MassGapmean, bMiMtTff, bMiMt, DynEMCmean/EMC, MassGapmean, FF80, ViTf, %VTff, MiTf, %MTff, R2MiMt, R2MiMtTff, P, Vrain.
- b) PC2 (+'s) de menor a mayor PC2: FF50, VTff, FF30, Vt, Maxgap, GapmeanTff(V), %VolGapmean, Tr, MTff, Mt, ViTo, Qmean, Tv, VTffrate, MiTo, VolGapmeanrate, VolGapmean, Qmax, MassGapmeanrate, Qfp, I, Fp, Fm, MTffrate.

Además, los siguientes grupos de variables tienen valores iguales de PC1, PC2 y PC3 entre sí (grupos ordenados de menor a mayor PC1):

- a) GapmeanTff(V), %VolGapmean.
- b) To, Toθ, ToDynEMC.
- c) MiTf, %MTff.
- d) ViTf, %VTff.
- e) P, Vrain.
- f) Tf, Tfθ, TfdynEMC.
- g) Tff, Tffθ, TffDynEMC.
- h) GapmeanTff(M), %MassGapmean.

Estos grupos y subgrupos también se pueden deducir al realizar un análisis de conglomerados. En el análisis de conglomerados, los objetos se agrupan según sus características. Los grupos de objetos deben mostrar una alta homogeneidad dentro del grupo y una alta heterogeneidad entre grupos. La similitud entre grupos se mide por la distancia euclidiana, a menudo ilustrada en un dendrograma; distancias más pequeñas indican mayor similitud y viceversa (Björklund, 2011).

Enlace completo, Coeficiente de correlación de distancia

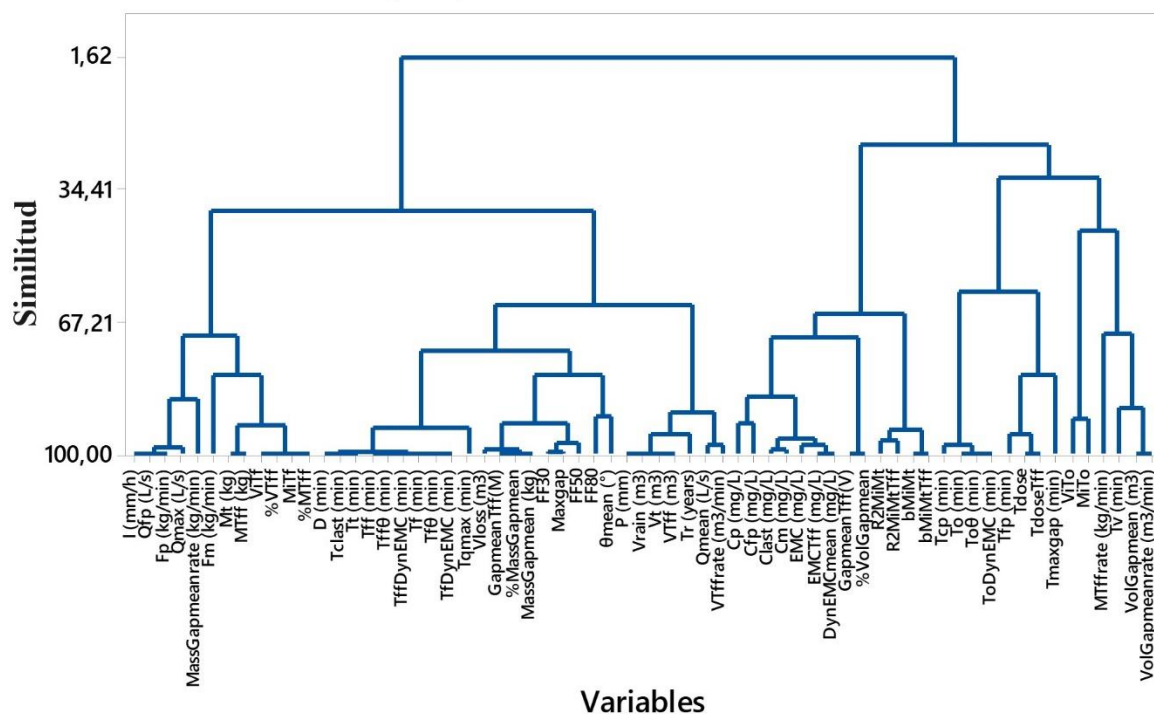


FIG.5.40 Análisis de conglomerados (CA) / Dendrograma de las variables de caracterización (polutogramas y primer lavado) para el contaminante TS

5.3.4.6.- Resultados de los dos ajustes potenciales de la curva M(V) para la matriz de lluvias elegida

En esta investigación no se aprecian diferencias sustanciales entre los dos ajustes potenciales de la curva M(V) (uno para el tiempo Tt y otro para el tiempo Tff), como se puede observar en el Anexo A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS donde; para la matriz de lluvias elegida, se pueden observar los siguientes valores:

Tabla 5.10 Comparación de valores estadísticos entre los dos ajustes potenciales de la curva M(V) para la matriz de lluvias elegida

Valores estadísticos	Ti (min)	Tff (min)	bMIMff	bMIMTff	R2MIMff	R2MIMTff	Mt (kg)	MTff (kg)	Vt (m³)	VTff (m³)	EMC (mg/L)	EMCTff (mg/L)	Tdose	TdoseTff
Media aritmética:	113,490	88,726	0,737	0,734	0,917	0,912	74,679	70,271	653,699	649,755	1.075,258	1.071,287	42,488	42,592
Máximo:	358,000	356,000	1,025	0,997	1,000	1,000	143,539	143,539	14,166,764	14,166,755	3,410,115	3,389,644	599,866	599,899
Mínimo:	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Desviación estándar:	92,484	103,650	0,263	0,260	0,177	0,188	55,101	58,210	1,682,973	1,684,398	887,923	890,701	82,269	82,281
Coefficiente de variación (%):	81,491	116,820	35,642	35,443	19,288	20,600	73,784	82,837	257,454	259,236	82,578	83,143	193,629	193,184
P90:	285,600	283,600	0,967	0,958	0,9999	1,0000	143,539	143,539	1,769,583	1,769,579	2,491,862	2,474,206	116,689	116,785

Los coeficientes de determinación R^2 también confirman lo mencionado anteriormente con respecto a los dos ajustes. Así, los valores de R^2 entre las variables son: T_t y $T_{ff} \rightarrow 0,975$; $bMiMt$ y $bMiMtT_{ff} \rightarrow 0,999$; $R2MiMt$ y $R2MiMtT_{ff} \rightarrow 0,865$; M_t y $MT_{ff} \rightarrow 0,988$; V_t y $VT_{ff} \rightarrow 1,000$; EMC y $EMCT_{ff} \rightarrow 0,929$; T_{dose} y $T_{doseT_{ff}} \rightarrow 1,000$.

Otra confirmación similar se obtiene al observar las mismas variables en los análisis PCA y CA descritos en la sección anterior.

5.3.4.7.- Resultados y dispersión de las variables que cuantifican el primer lavado para la matriz de lluvias elegida

Las variables que cuantifican el primer arrastre son: $bMiMt$, $\%VT_{ff}$, $\%MT_{ff}$, $Maxgap$, $FF30$, $FF50$, $FF80$, $GapmeanT_{ff}(M)$, θ_{mean} , $DynEMC_{mean}/EMC$, pero no $DynEMC_{mean}$.

Para la matriz de lluvias elegida, los valores y gráficos de contorno de estas variables pueden consultarse en los Anexos A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS y A5.3 GRÁFICOS DE CONTOURNO DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS.

Los gráficos de contorno de prácticamente todas las variables citadas muestran que, a medida que aumenta la intensidad de la lluvia (I) y su duración (D), se incrementa el efecto del primer lavado. No ocurre lo mismo con la variable $DynEMC_{mean}$. $DynEMC_{mean}$ no sirve como herramienta para comparar el primer lavado entre diferentes eventos IDF, ya que no es adimensional. Es decir, no permite comparar el efecto del primer lavado entre diferentes polutogramas de la matriz de lluvias elegida. Para resolver este problema, $DynEMC_{mean}$ se convirtió a adimensional dividiéndola por EMC . Un beneficio adicional de realizar esto es que se logra una menor dispersión; el coeficiente de variación de la variable $DynEMC_{mean}$ es 72,10%, mientras que el de la variable $DynEMC_{mean}/EMC$ es 54,94%.

Analizando todas las variables mencionadas con sus valores medios, desviaciones estándar y coeficientes de variación, se puede decir que la menor dispersión la presenta la variable $FF80$ y la mayor, $GapmeanT_{ff}(M)$. Concretamente, los coeficientes de variación son los siguientes: $FF80$ (14,42%); θ_{mean} (14,84%); $FF50$ (30,84%); $bMiMt$ (35,64%); $\%MT_{ff}$ (45,59%); $\%VT_{ff}$ (45,91%); $FF30$ (50,32%); $DynEMC_{mean}/EMC$ (54,94%); $Maxgap$ (125,02%); $GapmeanT_{ff}(M)$ (127,39%). Exceptuando $Maxgap$ y $GapmeanT_{ff}(M)$, el resto de las variables presenta coeficientes de variación inferiores al 80%, por lo que sus conjuntos de datos son homogéneos.

En cuanto a la variable $bMiMt$, prácticamente todas las precipitaciones en la matriz de lluvias elegida presentan valores $bMiMt < 1$ (205 de los 208 eventos/lluvias simulados/as). Para la matriz de lluvias elegida, los resultados de esta variable se resumen en la siguiente tabla, tomando en cuenta los criterios detallados por *Bertrand-Krajewski et al., 1998* y *Shamseldin, 2011*:

Tabla 5.11 Resumen de los resultados de bMiMt para la matriz de lluvias elegida

bMiMt	Zona	Descripción	Nº de eventos	% del total de eventos	R2MiMt promedio
$0 \leq b < 0,185$	1	Brecha positiva grande, primer lavado intenso	10	4,81	0,380
$0,185 \leq b < 0,862$	2	Brecha positiva media, primer lavado moderado	97	46,63	0,886
$0,862 \leq b < 1$	3	Brecha positiva insignificante, primer lavado débil	98	47,12	0,999
$1 \leq b < 1,159$	4	Brecha negativa insignificante, sin primer lavado	3	1,44	0,997
$1,159 \leq b < 5,395$	5	Brecha negativa media, sin primer lavado con retraso moderado de contaminante	0	0	0
$5,395 \leq b < +\infty$	6	Brecha negativa grande, sin primer lavado con fuerte retraso de contaminante	0	0	0

Nota: Brecha (“GAP” en inglés) se refiere al valor de la resta ($M_i/M_t - V_i/V_t$)

Solo el 4,81% de las lluvias simuladas presentan un primer lavado intenso, y los valores de bMiMt muestran un grado significativo de incertidumbre en su ajuste potencial (promedio de $R2MiMt = 0,38$). El mayor porcentaje de lluvias muestra lavados iniciales moderados y débiles. El 46,63% de los eventos presentan un primer lavado moderado y un promedio de $R2MiMt = 0,886$. El grado de incertidumbre de bMiMt es menor para las lluvias que presentan un primer lavado débil. Finalmente, solo el 1,44% de los eventos presentan valores de bMiMt superiores a 1. Es importante mencionar que bMiMt es el resultado de realizar un ajuste potencial de la curva $M(V)$ y, por lo tanto, tiene un grado de incertidumbre. Al observar los valores de la variable $R2MiMt$ (gráfico de contorno), se puede ver cómo la calidad del ajuste potencial de las curvas $M(V)$ disminuye a medida que aumentan la intensidad (I) y la duración (D) de las lluvias. Por tanto, se cuestionaría el uso de bMiMt como variable predictora del primer lavado en los casos en que su valor de $R2MiMt$ sea muy bajo.

Las variables $VTff$ y $MTff$, y en particular $\%VTff$ y $\%MTff$, son variables adimensionales interesantes para cuantificar el primer lavado. $\%MTff$ representa el porcentaje de masa lavada/arrastrada durante el tiempo Tff (entre T_o y T_f), mientras que $\%VTff$ correspondería al volumen de escorrentía que acompaña esa masa en el mismo intervalo de tiempo. Cuanto mayor sea el valor de $MTff$, mayor será el lavado/arrastre de contaminantes y, por lo tanto, mayor será el primer lavado. En cuanto a $VTff$, no está tan claro si su valor más alto se debe a un mayor lavado/arrastre o a una mayor dilución del contaminante. En cualquier caso, para la matriz de lluvias elegida, los valores de estas variables aumentan a medida que aumentan la intensidad (I) y la duración (D) de las lluvias. La tasa de lavado/arrastre de contaminantes y el caudal asociado durante Tff pueden observarse en los resultados y en los gráficos de contorno de $MTffrate$ y $VTffrate$, respectivamente. Los valores más altos de $MTffrate$ se presentan en lluvias de alta intensidad y corta duración.

FF30 es un valor citado en muchas investigaciones que analizan el primer lavado. En general, se puede afirmar que FF30 debe ser mayor a 0,3 para situarse por encima de la bisectriz de la curva $M(V)$ y, por lo tanto, que ocurra el primer lavado. Además, algunos investigadores (por ejemplo, *Bertrand-Krajewski et al.*, 1998; *Kim et al.*, 2007a; *Bach et al.*, 2010; *Qin et al.*, 2016; *Al Mamoon et al.*, 2019; *Todeschini et al.*, 2019) definen el primer lavado por el hecho de que al menos el 80% de la masa de contaminantes es transportada en el primer 30% del volumen de escorrentía, denominándolo primer lavado 80/30 (o 30/80 si se expresa volumen/masa). Esta condición se representa por la expresión: $FF30 \geq 0,8$ o $MFFR \geq 80/30 = 2,67$ y es equivalente a un ángulo $\theta_i = 69,44^\circ$. En este estudio, 174 de las 208 lluvias simuladas seleccionadas presentaron valores de $FF30 > 0,3$; es decir, el 83,65%; y 40 de las 208, $FF30 \geq 0,8$ (19,23%). El valor de $FF30 = 0,3$ corresponde aproximadamente al percentil 15,50% de todo el conjunto de valores de FF30 para la matriz de lluvias elegida, y el valor $FF30 = 0,8$ al percentil 81,25%.

Otros investigadores mencionan que la forma de cuantificar el primer lavado puede hacerse analizando el parámetro Maxgap. Por ejemplo, *Gupta y Saul*, 1996, citados por *Bertrand-Krajewski et al.*, 1998; *Sun et al.*, 2015; *Todeschini et al.*, 2019, proponen definir el primer lavado como aquella parte de la tormenta hasta la máxima divergencia entre el porcentaje acumulado adimensional de masa contaminante y el porcentaje acumulado de volumen [es decir, la máxima brecha entre la curva $M(V)$ y la bisectriz]. De manera alternativa, *Geiger*, 1984, citado por *Bertrand-Krajewski et al.*, 1998; *Lee et al.*, 2002; *Todeschini et al.*, 2019, menciona que un primer lavado significativo podría ocurrir si la brecha máxima entre la curva $M(V)$ y la bisectriz es mayor que 0,2. En este estudio, 70 de las 208 lluvias simuladas seleccionadas presentaron valores de $Maxgap > 0,2$; es decir, el 33,65%. El valor de $Maxgap = 0,2$ corresponde aproximadamente al percentil 66,50% de todo el conjunto de valores de Maxgap para la matriz de lluvias elegida.

Algunos investigadores también mencionan que la carga de contaminantes transportada por el primer 30% del volumen de escorrentía (FF30) ocurre al mismo tiempo que la brecha máxima entre la curva $M(V)$ y la bisectriz. Por lo tanto, FF30 se puede utilizar como un indicador para evaluar la magnitud del primer lavado para diferentes eventos de tormenta y contaminantes (*Li et al.*, 2007). En este estudio, se observa una relación bastante fuerte entre FF30 y Maxgap, como lo demuestra su valor de $R^2 = 0,972$, así como los valores propios de PC1, PC2 y PC3 del análisis de componentes principales (PCA) que se detalló previamente. Idealmente, la variable Maxgap coincidiría con la variable modificada (FF30 - 0,3). Para la matriz de lluvias elegida, al realizar una regresión lineal se obtiene un valor de $R^2 = 0,985$ entre los vectores (FF30 - 0,3) y Maxgap; y se obtiene un $R^2 = 0,998$ al eliminar aquellas lluvias donde Maxgap toma valores superiores a 0,7 (porque FF30 solo debería tomar valores de 0 a 1). Además, en este estudio se encontró que, en la matriz de lluvias elegida, la curva $FF30 = 0,8$ del gráfico de contorno de FF30 coincide prácticamente con la de $Maxgap = 0,5$. Todo lo discutido anteriormente puede verificarse observando los resultados y gráficos de contorno de FF30 y Maxgap en los Anexos A5.2 y A5.3.

Maxgap está menos correlacionado con las variables FF50 y FF80 ($R2MiMt = 0,88$ y $R2MiMt = 0,52$, respectivamente). Por otro lado, para que ocurra un primer lavado,

FF50 debe ser mayor que 0,5 y FF80 mayor que 0,8; es decir, deben estar por encima de la bisectriz. En este estudio, 155 de los 208 eventos/lluvias (es decir, el 74,52%) presentan valores de $FF50 > 0,5$ y 124 de los 208 eventos/lluvias (es decir, el 59,62%) valores de $FF80 > 0,8$.

Las variables $GapmeanTff(M)$, θ_{mean} , $DynEMC_{mean}/EMC$ se presentan como variables alternativas para cuantificar el primer lavado en lugar de $bMiMt$ debido al posible grado de incertidumbre que esta última puede presentar. Por su propia definición, sirven para cuantificar el primer lavado en curvas $M(V)$ que están por encima de la bisectriz. En otras palabras, para valores de $0 \leq bMiMt < 1$. Zonas 1, 2 y 3. Para el resto de las zonas, los valores de estas variables son iguales a 0. $GapmeanTff(M)$ presenta mucha dispersión, θ_{mean} está algo limitada ya que presenta valores entre $45,21^\circ$ y $63,09^\circ$, y valores nulos para lluvias de $I = 1 \text{ mm/h}$ y ($D = 2 \text{ min}$, $D = 4 \text{ min}$ y $D = 6 \text{ min}$). La variable $DynEMC_{mean}/EMC$, excepto para las lluvias mencionadas anteriormente, presenta valores entre 1,01 y 5,42. El primer lavado se puede cuantificar mejor con $DynEMC_{mean}/EMC$ que con $bMiMt$, ya que requiere menos cálculos y presenta menos incertidumbre. $bMiMt$ tiene $R2MiMt$, y este último es peor (más bajo) a medida que aumenta la “I” y la “D” de la lluvia en la matriz de lluvias. Para calcular $DynEMC_{mean}/EMC$, basta con promediar los valores de $DynEMCi > EMC$ durante Tff (es decir, entre T_o y T_f) y luego dividir por EMC .

Por otro lado, *Qin et al., 2016* mencionan diferentes tipos de lavado (“flush”) dependiendo del adelanto o retraso con que se presenta el polutograma con respecto al hidrograma durante la duración del evento de escorrentía. También afirmaron que el modelo potencial tiene un buen desempeño para simular el proceso del primer lavado, pero no logra simular el lavado intermedio o final en el evento de tormenta. Para analizar los diferentes tipos de lavado (primer lavado, lavado intermedio, lavado final) descritos por ellos, se puede analizar el retraso que existe entre T_{cp} y T_{qmax} , donde $(T_{qmax} - T_{cp})$ puede ser evaluado. A mayor diferencia positiva, es decir, $(T_{qmax} - T_{cp}) > 0$, mayor será el primer lavado, y cuanto menor sea la diferencia negativa, es decir, $(T_{qmax} - T_{cp}) < 0$, mayor será el lavado final. Si $(T_{qmax} - T_{cp}) \approx 0$, habrá un lavado intermedio. Sin embargo, si T_{cp} ocurre siempre en los primeros momentos del polutograma ($T_{cp} \approx 0$), la diferencia $(T_{qmax} - T_{cp})$ no contribuirá significativamente, ya que será prácticamente igual a T_{qmax} ; en este caso, para encontrar el retraso, se puede utilizar T_{fp} con la expresión $(T_{qmax} - T_{fp})$. En esta investigación, para la matriz de lluvias elegida, T_{qmax} presentó valores efectivos entre 3 y 300 minutos con un valor promedio de 57,08 minutos, mientras que T_{cp} estuvo entre 1 y 7 minutos con un valor promedio de 1,55 minutos. T_{fp} presentó valores efectivos entre 3 y 127 minutos con un valor promedio de 14,52 minutos. Ninguna de las lluvias presentó la condición $(T_{qmax} - T_{cp}) < 0$. El estudio de los retrasos entre T_{qmax} y T_{cp} o T_{fp} no proporcionó criterios claros para la calificación de los tipos de lavado.

El análisis de la curva inversa $V(M)$ en lugar de $M(V)$ también puede ayudar a interpretar el lavado final o último, mencionado en la literatura. $GapmeanTff(V)$ sirve, por lo tanto, para explicar el lavado final. Los valores altos de $GapmeanTff(V)$ corresponden a curvas del tipo de lavado final y coinciden con valores de $bMiMt$ mayores a 1 [específicamente mayores a 1,159 (zonas 5 y 6) según lo descrito por *Bertrand-Krajewski et al., 1998*]. En este estudio, los valores máximos de

GapmeanTff(V) fueron 0,0303 y 0,0282, presentándose para las lluvias $I = 20 \text{ mm/h}$, $D = 2 \text{ min}$ e $I = 40 \text{ mm/h}$, $D = 2 \text{ min}$, respectivamente. Para estas lluvias, bMiMt tuvo valores de 1,02 (zona 4) y 0,99 (zona 3), respectivamente, sin acercarse al valor de 1,159. Por lo tanto, ninguna de las lluvias simuladas presentó un lavado final.

Finalmente, algunos investigadores mencionan la aplicabilidad de la regla de la media pulgada (que asume que el 90% de la carga total de contaminante del evento es transportada en la primera media pulgada de escorrentía) como volumen relevante de escorrentía que debe recibir tratamiento (por ejemplo, *Bertrand-Krajewski et al.*, 1998; *Bach et al.*, 2010). En este estudio, para una cuenca de 1 ha, $\frac{1}{2}$ pulgada = 0,5 de pulgada equivale a 127 m^3 de escorrentía. La lluvia con un valor de escorrentía cercano a 127 m^3 es $I = 120 \text{ mm/h}$, $D = 10 \text{ min}$ con $V_t = 129,71 \text{ m}^3$ pero con un $M_t/DD_7 = 62\%$. Al observar el gráfico de contorno de V_t y al elaborar un gráfico de contorno de M_t/DD_7 , se puede verificar para la matriz de lluvias que, para un volumen de 127 m^3 (media pulgada) de V_t , el % de M_t/DD_7 será entre 60 y 70%. También se puede verificar que para alcanzar el 90% de M_t/DD_7 , el volumen de V_t estaría entre 250 y 300 m^3 (0,98 y 1,18 pulgadas).

5.3.4.8.- Gráficos de contorno (I-D, Percentiles) de las variables que cuantifican el primer lavado para la matriz de lluvias elegida

Los valores de las variables de caracterización (de los polutogramas y del primer lavado) para la matriz de lluvias elegida para cada I-D pueden ser representados por sus percentiles correspondientes. Para cada variable de caracterización de los polutogramas y del primer lavado, es posible calcular los percentiles del conjunto de valores que esta variable toma dentro de la matriz de lluvias elegida. Para cada posición I-D de la matriz de lluvias, se puede calcular el percentil que corresponde al valor tomado por la variable en dicha posición. De esta manera, se obtendría una matriz con los percentiles correspondientes de la variable de caracterización elegida (I-D, Percentiles).

Expresar los percentiles en la matriz de lluvias no es lo mismo que expresar cada variable de forma adimensional (ya sea en fracción o porcentaje) con respecto a su valor máximo (valor máximo de la variable dentro de la matriz de lluvias). Los gráficos de contorno (de los percentiles de cada variable) se utilizan para mejorar la comparación de los datos y observar la representación de su tendencia estadística. Así; mientras que el gráfico de contorno de la variable que se ha vuelto adimensional respecto a su valor máximo sería estrictamente una representación "2D", los gráficos de contorno de los percentiles de las variables representan mejor la "nube de puntos" que cada variable dibuja en "3D" para sus correspondientes lluvias I-D.

Los valores de los percentiles de todas las variables de caracterización (de los polutogramas y del primer lavado) se pueden observar en los Anexos A5.2 y A5.3. A continuación, se presentan dos ejemplos de gráficos de contorno (I-D, Percentiles):

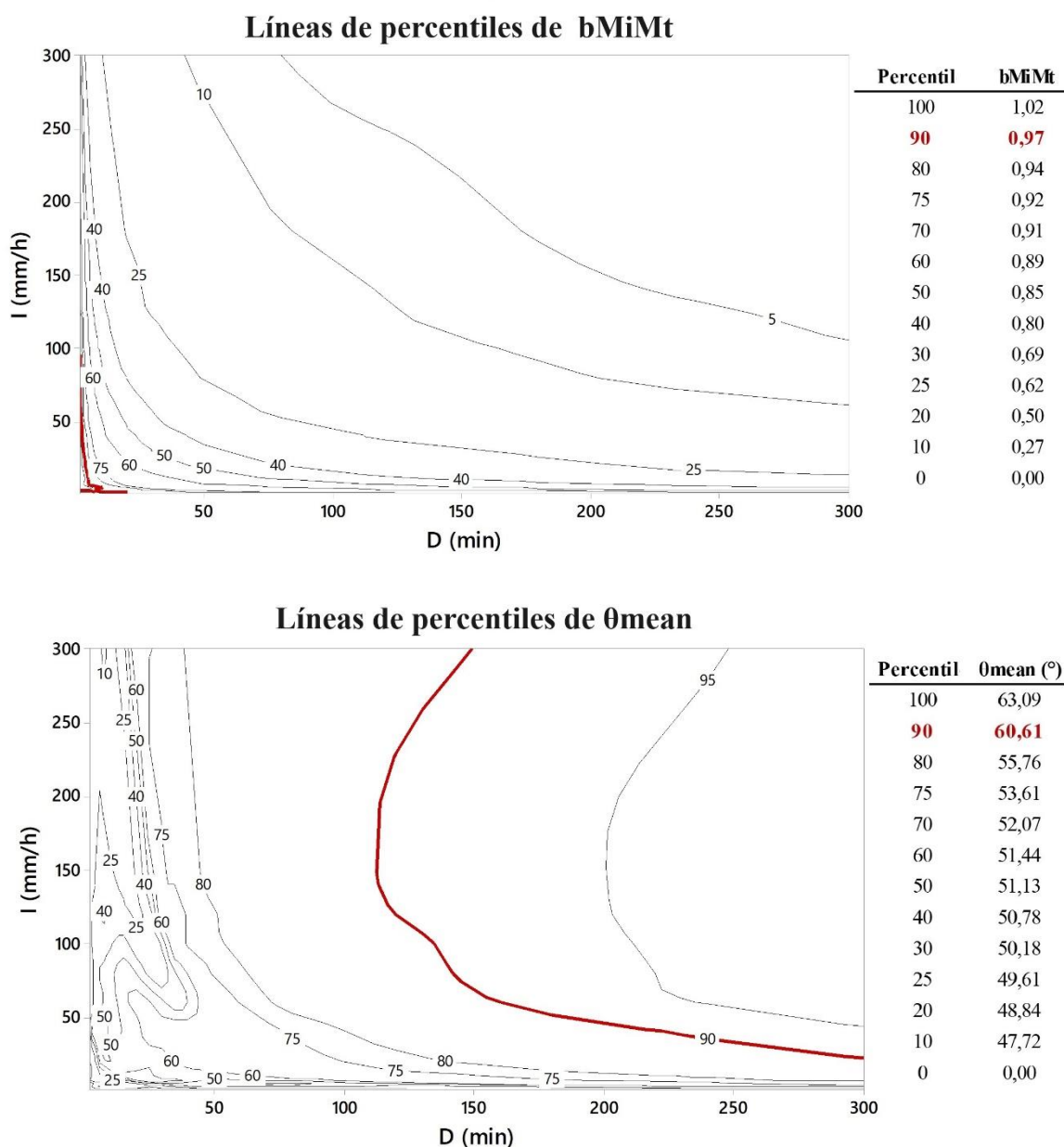


FIG.5.41 Líneas de percentiles de las variables bMiMt y θ_{mean} para la matriz de lluvias elegida

El resto de gráficos (I-D, Percentiles) de las variables que cuantifican el primer lavado se pueden observar en el Anexo A5.3.

Es interesante mencionar que, si se aplica la tangente a cada valor de la variable θ_{mean} , se podría definir una variable “MFFR_{mean}”, sin embargo, ésta presentaría exactamente el mismo gráfico de contorno (líneas de percentiles) que θ_{mean} .

Todos los gráficos (I-D, Percentiles) dependen de la matriz de lluvias elegida, de ahí la importancia de elegir correctamente dicha matriz teniendo en cuenta los criterios mencionados en el apartado 4.1.4.

Cada gráfico (I-D, Percentiles) puede superponerse con sus líneas de “probabilidad” de ocurrencia asociada (Tr), tal como se puede ver en la FIG.4.8. Por tanto, en las líneas P90 de los gráficos (I-D, Percentiles) se ve claramente que su valor es más probable a medida que la “I” de la lluvia es menor y la “D” de la lluvia aumenta.

5.3.4.9.- Líneas de diseño de las variables que cuantifican el primer lavado, para la matriz de lluvias elegida

Todos los criterios que permiten cuantificar el primer lavado se pueden representar en un mismo gráfico y; a su vez, superponer las líneas de “probabilidad” de ocurrencia (Tr):

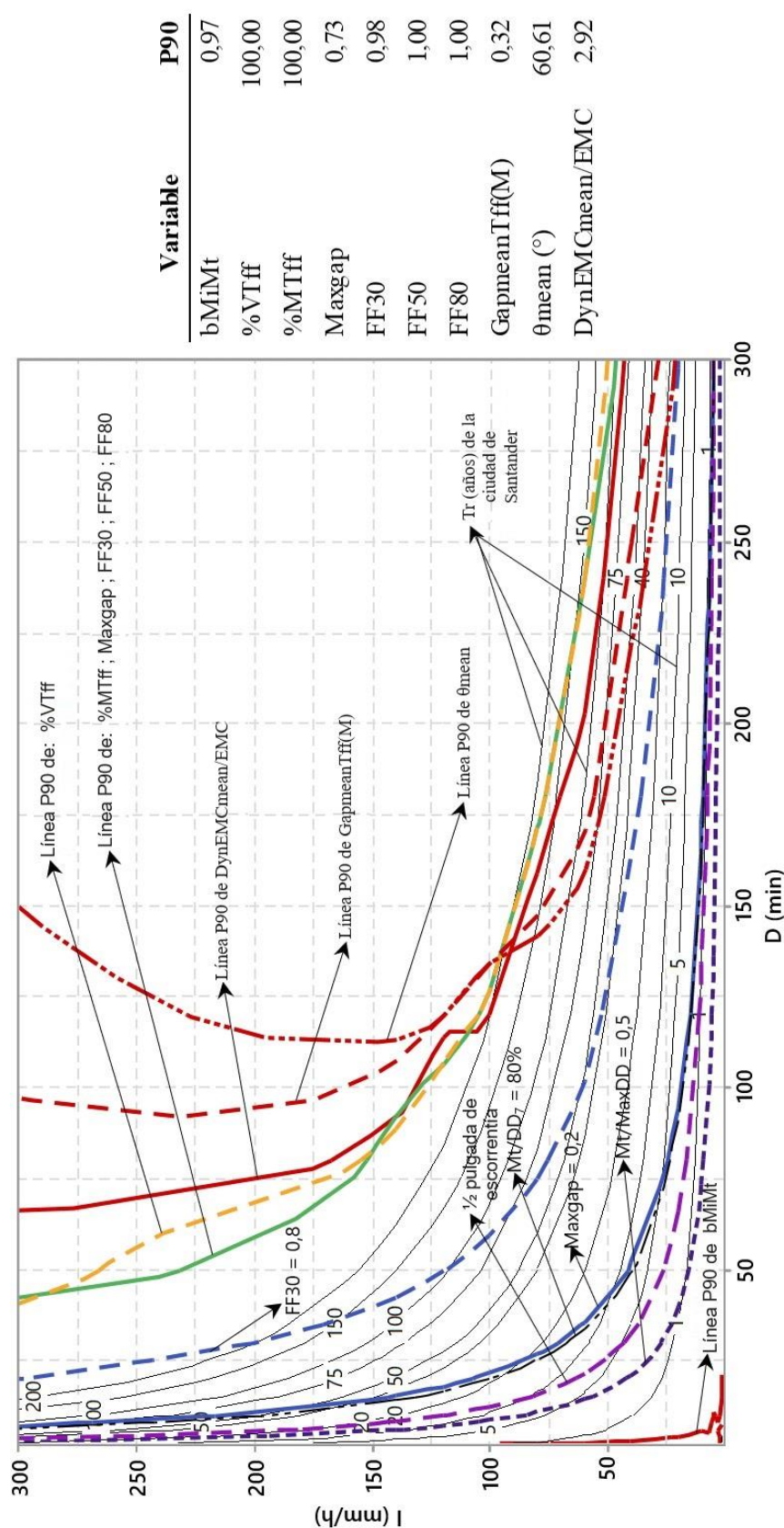


FIG.5.42 Líneas de diseño de las variables que cuantifican el primer lavado para la matriz de lluvias elegida

En la figura anterior, los valores de todas las variables aumentan de izquierda a derecha y de abajo a arriba (es decir, de menor a mayor intensidad “I” y de menor a mayor duración “D”); excepto bMiMt, que disminuye.

Las líneas de diseño de las variables que cuantifican el primer lavado (FIG.5.42), informan sobre la existencia o no del primer lavado, cuantificando estadísticamente su valor (por ejemplo, P90) dentro de la matriz de lluvias; y a su vez, asociando una probabilidad específica (Tr) de la lluvia I-D que provocaría dicho primer lavado.

En la figura se puede observar que hay un punto donde prácticamente todas las rectas P90 se cortan en un único punto, $I = 90 \text{ mm/h}$; $D = 140 \text{ min}$ ($Tr = 189,18 \approx 190$ años para la ciudad de Santander). De modo que; lluvias con duraciones inferiores a $D = 140 \text{ min}$ y mayores intensidades que $I = 90 \text{ mm/h}$; pueden descartarse por presentar $Tr > 190$ años.

Las líneas P90 de Maxgap, FF30, FF50 y FF80, prácticamente se superponen. Las líneas P90 para %VTff y %MTff, también son muy similares. Sin embargo todas, son prácticamente la misma línea a partir de $I = 90 \text{ mm/h}$ y $D = 140 \text{ min}$.

La línea (Maxgap = 0,2) coincide prácticamente con la de ($Mt/DD_7 = 80\%$), siendo esta última ligeramente inferior para lluvias de duración inferior a 80 min.

Es importante recalcar que la posición de las líneas de diseño P90 de la FIG.5.42 está condicionada a la selección de valores de Intensidades “I” y duraciones “D” que se elijan para constituir la matriz de lluvias simuladas. De modo que; en este estudio se observa que superponiendo las curvas IDF a las líneas de diseño P90 comentadas se obtienen intersecciones con períodos de retorno (Tr’s) muy altos (Tr’s por encima de 190 años para duraciones “D” menores a 140 min). A partir de “D” igual a 140 min en adelante, las intersecciones comienzan a tener Tr’s asociados con valores más bajos.

Por otro lado, si se desea definir una zona de solución (la más probable) en la FIG.5.42, ésta estaría definida por una área delimitada por la línea inferior $Mt/DD_7 = 80\%$ y superior, por la línea $FF30 = 0,8$ y dentro de esta zona (para la ciudad de Santander y sus curvas IDF) las lluvias más probables se agruparían en la zona de lluvias con intensidades bajas y duraciones largas. $FF30 = 0,8$ como línea superior, ya que algunos investigadores (por ejemplo, Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2002; Mrowiec *et al.*, 2009; Bach *et al.*, 2010; Egemose *et al.*, 2020) mencionan que la gran mayoría de eventos no presentan un primer lavado con *Mass First Flush Ratio* MFFR $\geq 2,67 = 80/30$ y que son eventos extremadamente raros.

5.3.4.10.- Análisis de rebose y dimensionamiento de tanques de tormenta

En cuanto a la calidad del agua se conoce ampliamente que la escorrentía de las cuencas está mucho más contaminada durante la parte inicial de un evento de lluvia. Esto se debe a los depósitos de polvo y suciedad acumulados en los períodos secos anteriores, tanto en la superficie de la cuenca como en los conductos de alcantarillado combinado, que son posteriormente lavados/arrastrados por la lluvia. Con el objetivo de reducir el impacto de este primer lavado en los cuerpos de agua receptores, y dado

que la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales está generalmente limitada a caudales no mayores de 3 a 5 veces el caudal medio de aguas residuales, una solución estructural tradicional es la construcción de tanques de tormenta posicionados inmediatamente aguas arriba de los principales reboses de la red de alcantarillado (*Mambretti y Sanfilippo, 2011*).

Siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.2.4.5.3 se analiza nuevamente la desfavorabilidad de los polutogramas desde el punto de vista del volumen necesario de almacenamiento de la escorrentía superficial que demanda cada polutograma al simular el rebose de un sistema de alcantarillado de aguas pluviales donde parte de la escorrentía ha sido enviada a una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Para ello se utiliza la misma hipótesis y las ecuaciones descritas en el apartado mencionado, pero se hace uso de la variable bMiMt en lugar del criterio $\uparrow Mt \downarrow Vt \uparrow Tt$ (escala de 10 puntos).

Así pues, en la Tabla 4.11 se busca el valor de Vstorage más próximo a P90 para cada intensidad, acotando aún más la serie de datos. Posteriormente, si a cada valor se le asigna su correspondiente bMiMt y su Tr (Santander), se podrían obtener los siguientes valores de diseño:

Tabla 5.12 Para cada Intensidad: valores de Vstorage (m³/ha imp) más cercanos a P90 con sus correspondientes bMiMt y Tr (años) para el contaminante TS.

[RVF = 80% y Tr_{ssd} (Santander) = 10 años]

I (mm/h)	D (min)															
	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	50	80	120	180	240	300
300																
140																
	Vstorage: 45,03 bMiMt: 0,90 Tr: 6,64															
120																
	55,97 0,88 7,60															
100																
	76,59 0,85 9,26															
80																
	90,42 0,83 9,00															
60																
	111,11 0,81 8,54															
40																
	99,66 0,82 4,93															
20																
	108,08 0,80 2,63															
10																
	109,79 0,77 1,38															
7																
	117,20 0,74 1,11															
5																
	69,27 0,78 0,499															
3																
	21,48 0,84 0,148															
1																

En esta Tabla, se buscan los valores que:

- Tengan el menor valor de bMiMt.
- Más se aproximen al P90 = 108,93 (Tabla 4.11); es decir, minimizando Dif.P90Vstorage.
- Tengan el menor Tr asociado.

En resumen; buscar los valores de Vstorage que cumplan con las siguientes condiciones: ↓bMiMt (menor valor de bMiMt), ↓Dif.P90Vstorage (menor diferencia respecto al percentil 90 de la serie de Vstorage) y ↓Tr (menor valor de Tr). El orden de aplicación de este "filtro" es crucial. Primero, se deben identificar los valores de la variable bMiMt que tengan un mayor impacto (mayor primer lavado), luego buscar los valores de volumen de almacenamiento más cercanos al P90 de su serie, y finalmente, buscar los valores más bajos de Tr.

Otro filtro que arroja los mismos resultados sería: ↓bMiMt, ↓Dif.P90Vstorage y ↑Tdose (mayor Dosis-Tiempo de exposición).

Para la condición RVF = 80% y Tr_{ssd} (Santander) = 10 años, la solución sería Vstorage = 117,20 m³/ha imp, Dif.P90Vstorage = 8,27 m³/ha imp, ↓bMiMt = 0,74 y un Tr = 1,11 años para el polutograma más desfavorable generado por una lluvia de I = 7 mm/h y D = 300 min dentro de la matriz de lluvias elegida.

Repitiendo la misma metodología para varios valores de Tr_{ssd} y RVF, y agregando los valores correspondientes de las variables DynEMCmean/EMC y MImean (ver apartado 5.2.3.2), se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 5.13 Valores de Vstorage con sus correspondientes lluvias desfavorables I-D-Tr (Santander) para el contaminante TS (Para diferentes RVF's y Tr_{ssd}'s)

Tr _{ssd} (años)	RVF (%)	I (mm/h)	D (min)	P90 (m ³ /ha imp)	↓bMiMt	↓Dif.P90Vstorage (m ³ /ha imp)	↓Tr (años)	Vstorage (m ³ /ha imp)	MI _{mean}	DynEMC _{mean} /EMC
5	30	10	180	35,90	0,77	5,27	1,38	41,17	0,48	1,48
5	50	10	180	59,84	0,77	8,78	1,38	68,62	0,48	1,48
5	80	10	180	95,74	0,77	14,05	1,38	109,79	0,48	1,48
5	100	10	180	119,68	0,77	17,56	1,38	137,24	0,48	1,48
10	30	7	300	40,85	0,74	3,10	1,11	43,95	0,60	1,60
10	50	7	300	68,08	0,74	5,17	1,11	73,25	0,60	1,60
10	80	7	300	108,93	0,74	8,27	1,11	117,20	0,60	1,60
10	100	7	300	136,17	0,74	10,33	1,11	146,50	0,60	1,60
15	30	10	240	53,07	0,72	3,02	1,97	56,09	0,63	1,63
15	50	10	240	88,45	0,72	5,03	1,97	93,48	0,63	1,63
15	80	10	240	141,52	0,72	8,05	1,97	149,57	0,63	1,63
15	100	10	240	176,90	0,72	10,07	1,97	186,97	0,63	1,63
20	30	10	240	54,91	0,72	1,18	1,97	56,09	0,63	1,63
20	50	10	240	91,51	0,72	1,97	1,97	93,48	0,63	1,63
20	80	10	240	146,42	0,72	3,15	1,97	149,57	0,63	1,63
20	100	10	240	183,02	0,72	3,94	1,97	186,97	0,63	1,63
25	30	10	240	61,05	0,72	4,96	1,97	56,09	0,63	1,63
25	50	10	240	101,74	0,72	8,26	1,97	93,48	0,63	1,63
25	80	10	240	162,79	0,72	13,21	1,97	149,57	0,63	1,63
25	100	10	240	203,49	0,72	16,52	1,97	186,97	0,63	1,63

Los volúmenes de almacenamiento Vstorage estimados (Tabla 5.13) se pueden resumir de la siguiente manera:

a) RVF = 30%

Con Tr_{ssd} = 5 años, se obtuvo 41,17 m³/ha imp.

Con Tr_{ssd} = 10 años, se obtuvo 43,95 m³/ha imp.

Con Tr_{ssd} ≥ 15 años, se obtuvo 56,09 m³/ha imp.

b) RVF = 50%

Con Tr_{ssd} = 5 años, se obtuvo 68,82 m³/ha imp.

Con Tr_{ssd} = 10 años, se obtuvo 73,25 m³/ha imp.

Con Tr_{ssd} ≥ 15 años, se obtuvo 93,48 m³/ha imp.

c) RVF = 80%

Con $Tr_{ssd} = 5$ años, se obtuvo 109,79 m³/ha imp.

Con $Tr_{ssd} = 10$ años, se obtuvo 117,20 m³/ha imp.

Con $Tr_{ssd} \geq 15$ años, se obtuvo 149,57 m³/ha imp.

d) RVF = 100%

Con $Tr_{ssd} = 5$ años, se obtuvo 137,24 m³/ha imp.

Con $Tr_{ssd} = 10$ años, se obtuvo 146,50 m³/ha imp.

Con $Tr_{ssd} \geq 15$ años, se obtuvo 186,97 m³/ha imp.

A partir de este resumen para $Tr_{ssd} = 10$ años, se puede concluir que los valores de diseño de los tanques de tormenta para el caso estudiado, con valores de RVF entre el 30% y el 100%, estarían entre 44 y 147 m³/ha imp.

Sin limitar los valores de RVF, se han obtenido resultados similares en otras investigaciones. Por ejemplo, *Andrés-Doménech, 2010* menciona en su investigación varios métodos sobre el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta. Por ejemplo, menciona un informe técnico de la Agencia de Medio Ambiente del Reino Unido sobre “*Constructed Wetlands and Links with Sustainable Drainage Systems*”, 2003 donde se recomienda retener de 100 a 150 m³/ha imp [10 a 15 mm de lluvia neta (escorrentía)]. También cita criterios italianos con valores de 100 a 150 m³/ha imp para reducir significativamente la frecuencia y los volúmenes de vertidos y masas contaminantes. En España, *Andrés-Doménech, 2010*, cita a *Temprano et al. (1998, 2002)* con volúmenes de tanques de tormenta del orden de 120 m³/ha imp. También cita investigaciones del Ayuntamiento de Valencia y del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la UPV que arrojan volúmenes de tanques de tormenta entre 65 y 80 m³/ha imp. También cita a la empresa estatal ACUAMED con proyectos con ratios de 100 m³/ha imp para el área metropolitana de la ciudad de Valencia.

Si en la metodología descrita en el apartado 4.2.4.5.3.c tomamos en cuenta las precipitaciones (I-D's) en la matriz de lluvias que cumplen la condición $Q_{mean} < Q_{WWTP}$ pero tienen pequeños reboses de agua de escorrentía porque $Q_{max} > Q_{WWTP}$, se obtendrían valores P90 (Tabla 4.11) ligeramente inferiores; sin embargo, los valores de la Tabla 5.12 serían los mismos (las lluvias con pequeños reboses están por debajo de las soluciones de esta tabla) y por lo tanto los volúmenes de almacenamiento y las posiciones I-D de las lluvias más desfavorables descritas en la Tabla 5.13 no cambiarían.

Los volúmenes estimados (Tabla 5.13) corresponden en todos los casos a lluvias de baja intensidad "I" y larga duración "D". Así pues, las lluvias críticas resultantes acompañadas con sus variables de caracterización son:

a) I (mm/h) = 7; D (min) = 300; P (mm) = 35; Tr (años) = 1,11 para Santander; Mt (kg) = 126,57; Mt/DD₇ (%) = 88,21; Vt (m³) = 200,41; bMiMt = 0,74 (brecha positiva media, primer lavado moderado); R2MiMt = 0,98; %VTff = 100; %MTff = 100; Maxgap = 0,25; Tdose = 183,31; FF30 = 0,54; MFFR₃₀ = 1,79; FF50 = 0,74; FF80 = 0,93; GapmeanTff(M) = 0,14; θ_{mean} (°) = 55,87; MI_{mean} = 0,60; DynEMC_{mean}/EMC = 1,60; (Tq_{max} – T_{cp}) = 73 min; (Tq_{max} – T_{fp}) = 47 min.

- b) I (mm/h) = 10; D (min) = 180; P (mm) = 30; Tr (años) = 1,38 para Santander; Mt (kg) = 118,43; Mt/DD_7 (%) = 82,54; Vt (m³) = 172,55; $bMiMt$ = 0,77 (brecha positiva media, primer lavado moderado); $R2MiMt$ = 0,99; %VTff = 100; %MTff = 100; Maxgap = 0,21; $Tdose$ = 136,80; FF30 = 0,49; MFFR₃₀ = 1,65; FF50 = 0,70; FF80 = 0,91; GapmeanTff(M) = 0,11; θ_{mean} (°) = 54,06; MI_{mean} = 0,48; DynEMCmean/EMC = 1,48; ($Tq_{max} - T_{cp}$) = 69 min; ($Tq_{max} - T_{fp}$) = 48 min.
- c) I (mm/h) = 10; D (min) = 240; P (mm) = 40; Tr (años) = 1,97 para Santander; Mt (kg) = 129,62; Mt/DD_7 (%) = 90,33; Vt (m³) = 231,66; $bMiMt$ = 0,72 (brecha positiva media, primer lavado moderado); $R2MiMt$ = 0,97; %VTff = 100; %MTff = 100; Maxgap = 0,27; $Tdose$ = 126,32; FF30 = 0,56; MFFR₃₀ = 1,86; FF50 = 0,76; FF80 = 0,93; GapmeanTff(M) = 0,15; θ_{mean} (°) = 56,06; MI_{mean} = 0,63; DynEMCmean/EMC = 1,63; ($Tq_{max} - T_{cp}$) = 69 min; ($Tq_{max} - T_{fp}$) = 48 min.

Se observa que las lluvias críticas resultantes mencionadas presentan todas porcentajes de eliminación Mt/DD_7 superiores al 80%, coincidiendo con lo comentado por *Sharifi et al., 2011* en su introducción, donde citan que un criterio frecuente de eliminación de contaminantes considera una eliminación del 80% en un evento de tormenta individual.

En la matriz de lluvias, puede haber polutogramas que en su forma final presenten "colas" muy largas con valores de concentración muy altos acompañados de caudales muy bajos, distorsionando así la representatividad de variables como C_m o incluso EMC. Las lluvias con una duración superior a 30 minutos no presentan este problema (es decir, $C_{last} > C_p$). Por lo tanto, las lluvias críticas resultantes [a), b), c)] mencionadas anteriormente no se ven afectadas por el problema de polutogramas con colas largas.

Aunque en la matriz de lluvias existe un gran porcentaje de lluvias en las que la variable $bMiMt$ (como variable predictora del primer lavado) sería cuestionable, curiosamente, la solución encontrada para el dimensionamiento de los tanques de tormenta muestra lluvias críticas (de baja intensidad "I" y larga duración "D") que presentan ajustes potenciales adecuados de sus curvas $M(V)$; y, por lo tanto, valores altos de $R2MiMt$. Esta particularidad podría cambiar sustancialmente al utilizar curvas IDF de otra ciudad.

Si se analizan distintos valores de ADD, valores mayores a 7 dan como réplica las mismas lluvias críticas resultantes de $V_{storage}$ ya que los valores de Mt son prácticamente iguales, lo mismo que su % de eliminación. Para valores menores de ADD cambian los valores de Mt y por tanto el % de eliminación.

Aunque investigadores como *Clar et al., 2004*, citados por *Andrés-Doménech, 2010*, cuestionan el estudio de eventos de diseño para dimensionar tanques de tormenta ya que obvian el tiempo de separación de los eventos ADD (es decir, los días de tiempo seco previos); en esta investigación se verifica que, desde el punto de vista de la contaminación de sucesos desfavorables, más importante que el propio valor asumido de ADD, es su posición respecto al valor máximo posible de acumulación (MaxDD) en la zona estudiada. Para aplicar la metodología descrita en este documento a

cualquier otra cuenca urbana, el ADD asumido debe estar muy cerca de la asíntota de la curva de acumulación DD elegida. Para hacer esta metodología más general y tener en cuenta diferentes valores de ADD, se debe hacer una corrección considerando posiciones en la matriz de lluvias (lluvias I-D, Vstorage) en las que, por ejemplo, $\frac{M_t}{MaxDD} < 0,5$. Los ADD's que provocasen eventos de escorrentía desfavorables con baja contaminación asociada no se tomarían en cuenta, a diferencia de aquellos ADD's que si produjesen valores de acumulación DD cercanos a la asíntota de la curva de acumulación asumida (ver $\frac{M_t}{MaxDD} = 0,5$ en la FIG.5.42).

En la metodología descrita anteriormente en lugar de $\downarrow bMiMt$ también pueden utilizarse las variables $\uparrow MI_{mean}$ ó $\uparrow DynEMC_{mean}/EMC$, y el diagrama de flujo de la metodología se resumiría de la siguiente manera:

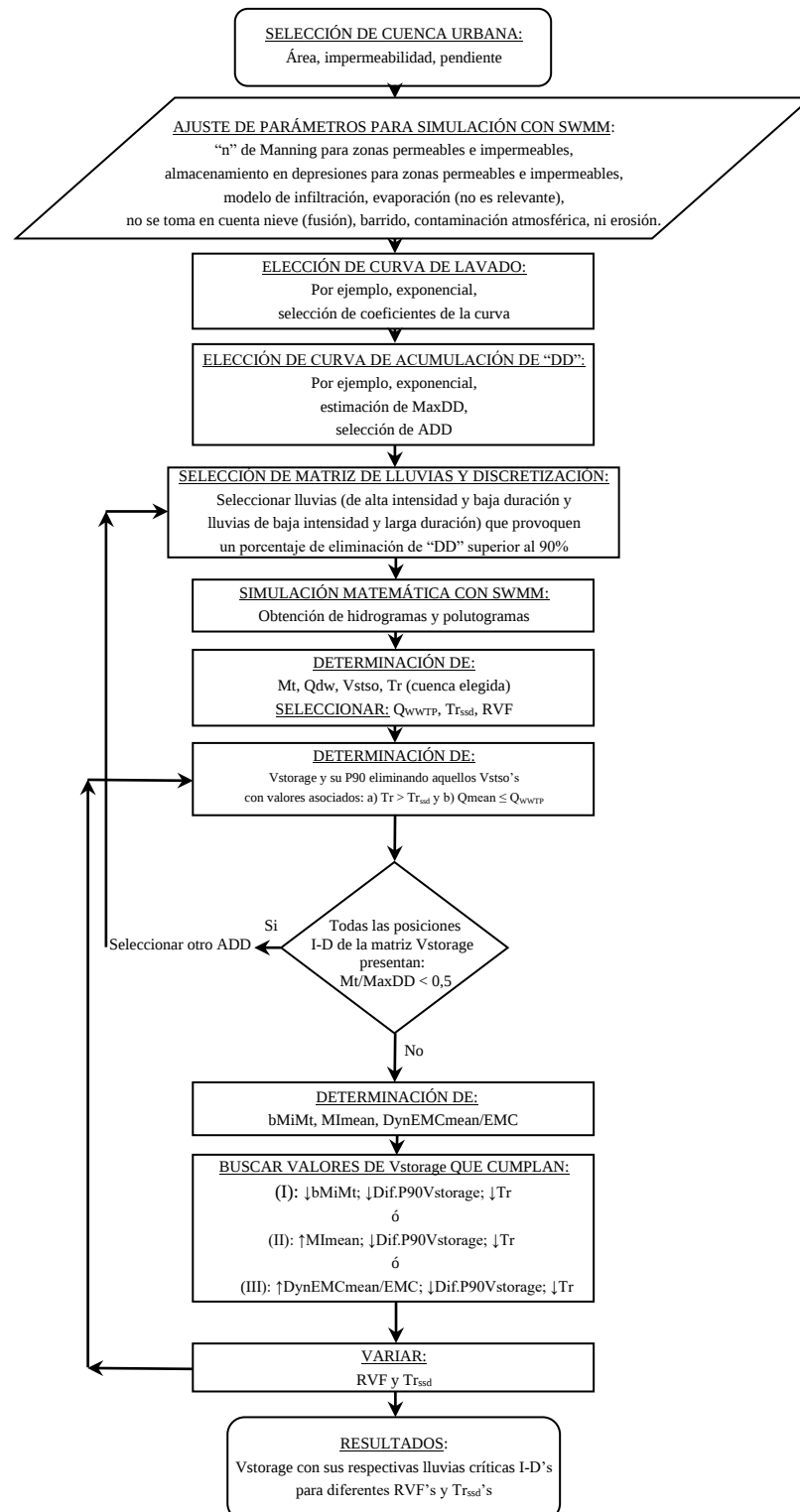


FIG.5.43 Diagrama de flujo de la metodología utilizada

Utilizando [(II): $\uparrow MI_{mean}$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$] ó [(III): $\uparrow DynEMC_{mean}/EMC$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$] en lugar de [(I): $\downarrow bMiMt$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$], se obtiene una solución ligeramente diferente para los siguientes valores de Tr_{ssd} y RVF (para el resto; la solución es la misma):

Tabla 5.14 Ligera variación en los resultados al buscar $V_{storage}$ utilizando la alternativa (II): $\uparrow MI_{mean}$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$; o la alternativa (III): $\uparrow DynEMC_{mean}/EMC$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$

Tr_{ssd} (años)	RVF (%)	(I) Usando: $\downarrow bMiMt$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$				(II) Usando: $\uparrow MI_{mean}$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$ 6 (III) Usando: $\uparrow DynEMC_{mean}/EMC$; $\downarrow Dif.P90V_{storage}$; $\downarrow Tr$			
		I (mm/h)	D (min)	Tr (años)	$V_{storage}$ (m ³ /ha imp)	I (mm/h)	D (min)	Tr (años)	$V_{storage}$ (m ³ /ha imp)
5	30	10	180	1,38	41,17	7	240	0,84	34,44
5	50	10	180	1,38	68,62	7	240	0,84	57,39
5	80	10	180	1,38	109,79	7	240	0,84	91,83
5	100	10	180	1,38	137,24	7	240	0,84	114,78

También; en el punto 4.2.4.5.3.c, si se utiliza VT_{ff}/T_{ff} en lugar de Q_{mean} , se obtendrían resultados similares ya que en la posición donde se sitúan las lluvias críticas resultantes sucede que $\%VT_{ff} = 100$; es decir $VT_{ff} = V_t$ y además T_{ff} está muy cerca de T_t siendo T_{ff} un poco menor.

5.3.5.- Conclusiones

Se ha llevado a cabo un análisis de correlación y un análisis de componentes principales (PCA) para identificar posibles correlaciones entre las distintas variables que describen las curvas $M(V)$, los polutogramas y las propias características de los eventos de precipitación.

En la presente investigación, ha sido posible corroborar que la máxima brecha (Max_{gap}) ocurre alrededor de $V_i/V_t = 0,3$; es decir, con FF30.

La regla de la media pulgada en este estudio presenta solo entre el 60% y el 70% de la carga total de contaminante de los eventos analizados.

La condición de ocurrencia del primer lavado ha sido analizada mediante tres nuevos métodos que, a su vez, permiten establecer nuevos criterios para la evaluación y comparación de los diferentes polutogramas generados por las lluvias estudiadas.

La metodología matemática propuesta (que es ciertamente independiente de las formas de los polutogramas) no solo permite evaluar la desfavorabilidad de los polutogramas (con un único valor punta o pico) de la escorrentía urbana, sino que también puede usarse para analizar polutogramas con más de un valor punta. *Menacher y Augustin, 1992*, citados por *Métadier y Bertrand-Krajewski, 2012*, notaron que las curvas $M(V)$ para eventos multipico (polutogramas con varios valores punta) tienden a estar más

cerca de la bisectriz que los eventos de pico único, lo que corresponde en este estudio a lavados iniciales moderados y débiles, con valores altos de R2MiMt.

En cuanto al tiempo de concentración de la cuenca, debe señalarse que el método propuesto aquí asume que el tamaño de la cuenca es lo suficientemente pequeño como para que su tiempo de concentración sea relativamente corto en comparación con la escala de fluctuación en el tiempo de la intensidad de la lluvia. Esta suposición debe utilizarse con precaución para cuencas de mayor tamaño (*Sharifi et al., 2011*). Si Tfp se asemeja al tiempo de concentración de la cuenca, desde el punto de vista hidrológico podría afirmarse que, en la escorrentía (una vez transcurrido el tiempo de concentración de la cuenca urbana analizada), los eventos desfavorables asociados con la misma en condiciones punta, son independientes de la duración "D" de las precipitaciones.

Independientemente de la cuantificación del primer lavado por los diferentes criterios tradicionales que utilizan las variables bMiMt, Maxgap, FF30, FF50, FF80, etc., esta investigación ofrece una nueva metodología para evaluar polutogramas, compararlos y establecer los más críticos desde un punto de vista desfavorable en cuanto al impacto contaminante que producen y debido a la probabilidad de ocurrencia de la lluvia que generó el evento de contaminación. La metodología también propone una novedosa alternativa para obtener volúmenes de retención de tanques de tormenta de manera estadísticamente fiable, es decir, una metodología innovadora para determinar volúmenes de retención de agua de escorrentía que permite el diseño de tanques de almacenamiento para reboses de alcantarillado pluvial. Es aplicable a cualquier cuenca urbana; sin embargo, debe utilizarse el período de retorno Tr del área de estudio, especificando así la asignación de la probabilidad de ocurrencia de los eventos de contaminación más desfavorables causados por la escorrentía urbana en la cuenca analizada.

La mayor parte de las líneas de diseño P90 intersecan con curvas IDF con Tr's muy elevados. Por lo tanto, para el sitio de estudio, también es importante elegir adecuadamente valores de I-D en la matriz de simulación de lluvias que puedan presentar curvas IDF más probables. Es decir, por ejemplo, combinar el porcentaje de eliminación elegido $Mt/DD_7 \geq 90\%$ ó $\geq 80\%$ con Tr 's ≤ 25 años ó ≤ 30 años.

En cualquier caso, en este estudio, los eventos más desfavorables (los polutogramas más contaminantes) correspondieron a aquellos producidos por lluvias críticas resultantes de baja intensidad "I" y larga duración "D".

Tomando un período de retorno de diseño $Tr_{ssd} = 10$ años (curvas IDF de Santander), los resultados obtenidos con la novedosa metodología propuesta para dimensionar tanques de tormenta fueron de 146,50 m³/ha imp para una retención del 100% del volumen total de escorrentía y de 117,20 m³/ha imp para una retención del 80%. Estos resultados coinciden plenamente con los obtenidos en el apartado 4.2 de esta investigación dando validez a las variables analizadas en ambas metodologías.

Teniendo en cuenta las líneas de diseño de las variables que cuantifican el primer lavado, el análisis de rebose y dimensionamiento de tanques de tormenta, así como las lluvias críticas resultantes, se pueden proponer los siguientes criterios de diseño:

- a) $FF_{30} = 0,55$ (aproximadamente percentil P70,75 en la matriz de lluvias elegida en este estudio).
- b) $GapmeanTff(M) = 0,15$ (aproximadamente percentil P78,5 en la matriz de lluvias elegida en este estudio).
- c) $\theta_{mean} = 55^\circ$ (aproximadamente percentil P79 en la matriz de lluvias elegida en este estudio).
- d) $DynEMC_{mean}/EMC = 1,55$ (aproximadamente percentil P76,3 en la matriz de lluvias elegida en este estudio).

Esta metodología propuesta (igual que la del apartado 4.2) también se enmarca dentro de las estrategias de nivel N3 como criterios para el diseño de tanques de tormenta detallados en el "Manual Nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta" (AQUALOGY y GEAMA de la Universidade Da Coruña, 2014).

La aplicación en profundidad de esta investigación y los resultados presentados en este documento deberían permitir en el futuro, el desarrollo de modelos más sofisticados y efectivos para cuantificar eventos de contaminación por escorrentía urbana.

Una propuesta para futuras investigaciones se centraría en averiguar la posibilidad de extrapolar los resultados aquí descritos para cuencas urbanas con diferentes áreas, impermeabilidades y pendientes.



CAPÍTULO 6

Conclusiones

6.- CONCLUSIONES

6.1.- CONCLUSIONES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN

6.1.1.- Impacto de la urbanización en la escorrentía

La urbanización tiene un impacto significativo en la escorrentía debido a la impermeabilización de superficies, lo que reduce las áreas de infiltración y aumenta el volumen de agua que fluye sobre la superficie. Este aumento de la escorrentía implica un mayor transporte de contaminantes hacia los cuerpos de agua receptores y que puede verse agravado por los efectos del cambio climático en algunas zonas del planeta. Los contaminantes como los sólidos totales (ST), la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅) y el nitrógeno total (NT) se acumulan en las superficies impermeables y son arrastrados por la escorrentía durante los eventos de lluvia, generando el fenómeno de primer lavado “*First Flush*”.

Este fenómeno se ve agravado por la reducción de superficies permeables, lo que acelera el caudal de agua durante las lluvias críticas, afectando negativamente los cuerpos de agua receptores. Las zonas urbanas deben considerar este impacto al diseñar infraestructuras de retención de agua y sistemas de tratamiento, ya que la escorrentía urbana tiende a ser más contaminante y difícil de gestionar que la rural.

6.1.2.- Eficiencia del modelo SWMM para la simulación de escenarios

El modelo SWMM “*Storm Water Management Model*” demostró ser una herramienta eficaz para simular eventos de lluvias críticas y evaluar la respuesta hidrológica de cuencas urbanas. Se utilizó para simular la acumulación de contaminantes y la dinámica de la escorrentía en diferentes escenarios de lluvia. El modelo permitió caracterizar tanto el volumen de escorrentía como la calidad del agua, y fue fundamental para entender la interacción entre la lluvia, la infraestructura urbana y los cuerpos de agua receptores.

La simulación incluyó variables clave como la intensidad de la lluvia (I), la duración (D), el volumen total de escorrentía (Vt) y la concentración media ponderada (EMC). Estas variables permitieron prever el comportamiento del agua durante eventos de lluvias críticas, ofreciendo información valiosa para el diseño de estrategias de mitigación y control de contaminantes.

6.1.3.- Importancia de los parámetros hidrológicos

Los parámetros hidrológicos son determinantes en la generación y transporte de la escorrentía urbana. Las variables más influyentes incluyen:

Intensidad de la lluvia (I): Influye directamente en el caudal de flujo punta (Q_{fp}) y el caudal máximo (Q_{max}), generando mayores volúmenes de escorrentía en eventos de alta intensidad.

Duración de la lluvia (D): Afecta el volumen acumulado de escorrentía y el tiempo que la escorrentía sigue activa después de un evento de lluvia.

Precipitación (P): Está directamente relacionada con el volumen total de escorrentía (V_t), afectando la cantidad de agua que llega a los sistemas de retención.

Volumen de lluvia (V_{rain}): Este parámetro ayuda a cuantificar la cantidad total de agua generada durante un evento crítico.

6.1.4.- Necesidad de almacenamiento y depuración

La investigación concluye que es fundamental implementar sistemas de almacenamiento como tanques de tormenta, especialmente en zonas urbanas donde la cantidad de escorrentía y la concentración de contaminantes son más altas. Estos sistemas deben ser capaces de retener el volumen de escorrentía generado durante lluvias críticas, evitando el desbordamiento y reduciendo la contaminación de los cuerpos de agua receptores. Además, se recomienda el uso de sistemas de depuración en Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR), para tratar el agua antes de su liberación en el medio ambiente.

6.2.- CONCLUSIONES SOBRE LA CORRELACIÓN DE VARIABLES (APARTADOS 4.2.4.3 y 5.3.4.4)

6.2.1.- Coeficientes de correlación y determinación

La intensidad de la lluvia (I) muestra una correlación fuerte con las variables de caudal de flujo punta (Q_{fp}), flujo punta (F_p) y caudal máximo (Q_{max}), con coeficientes de correlación (R) superiores a 0,972. Esto indica que a medida que aumenta la intensidad de la lluvia, también se incrementa significativamente el caudal y el flujo de escorrentía. Esta relación es crucial para el diseño de sistemas de drenaje y para anticipar el comportamiento de la escorrentía durante eventos de lluvia intensa.

En los análisis de correlación realizados, se encontraron relaciones significativas entre la intensidad de la lluvia (I) y el caudal de flujo punta (Q_{fp}), con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,994$, lo que confirma que la intensidad de la lluvia es un factor determinante en la generación de caudales de flujo punta (Q_{fp}), y máximos (Q_{max}).

Otra relación importante fue entre la precipitación acumulada (P) y el volumen total de escorrentía (V_t), lo que refuerza la idea de que la cantidad de precipitación tiene un impacto directo en el volumen de escorrentía generado. Estas correlaciones permiten predecir con mayor precisión el comportamiento de la escorrentía y su capacidad de arrastre de contaminantes.

La identificación de estas correlaciones es crucial para la formulación de modelos predictivos que puedan anticipar la calidad de la escorrentía en función de eventos de precipitación específicos. Al considerar la duración de la lluvia, se determinó que su incremento también se asocia con una mayor desfavorabilidad en los polutogramas, lo que implica que las lluvias prolongadas pueden ser más dañinas que las intensas.

6.2.2.- Mejores coeficientes de determinación

Los mejores coeficientes de determinación se encontraron entre las variables hidrológicas y los contaminantes arrastrados. Por ejemplo, la concentración de contaminantes como EMC y Cfp presentó una alta correlación con $R = 0,932$, lo que sugiere que las condiciones de lluvia y los caudales máximos influyen significativamente en la cantidad de contaminantes arrastrados. Sin embargo, EMC también se correlaciona negativamente con la carga total de contaminantes (M_t) ($R = -0,897$). Esto puede indicar que a mayores concentraciones de contaminantes, se producen puntas de caudal más bajos, sugiriendo que los contaminantes pueden estar siendo diluidos o que hay un cambio en el comportamiento del arrastre durante eventos de lluvia prolongados.

6.2.3.- Relación entre variables del primer lavado

Uno de los aspectos más innovadores de la investigación fue el análisis del primer lavado "*First Flush*", para el cual se desarrollaron nuevas metodologías que permitieron una caracterización más precisa del fenómeno. En lugar de los tradicionales métodos basados en regresiones lineales, se emplearon variables novedosas derivadas de las curvas $M(V)$, como θ_{mean} , $DynEMC_{mean}$, Gap_{mean} y MI_{mean} , lo que permitió evaluar de manera más detallada la concentración de contaminantes en las primeras fases de los eventos de lluvia. Estas variables mostraron relaciones importantes con el volumen de escorrentía generado, lo que las convierte en herramientas clave para predecir el impacto del primer lavado y ajustar las estrategias de control.

6.3.- CONCLUSIONES SOBRE ANÁLISIS MULTIVARIANTE (APARTADOS 4.2.4.4 y 5.3.4.5)

6.3.1.- Análisis de Componentes Principales (ACP)

El análisis de Componentes Principales (ACP) ha sido fundamental para identificar patrones subyacentes en las variables que afectan la escorrentía. Este método permite reducir la dimensionalidad de los datos, facilitando la visualización y la interpretación de las interrelaciones entre múltiples variables. En particular, se identificó que la máxima brecha (Max_{gap}) se presenta alrededor de $V_i/V_t = 0,3$, lo que sugiere que este punto es crítico para evaluar la respuesta de la escorrentía a diferentes intensidades de lluvia.

La identificación de componentes principales proporciona información valiosa sobre las variables que contribuyen de manera significativa a la variabilidad de los datos. Esto permite priorizar las variables más influyentes en la escorrentía y su calidad, facilitando la toma de decisiones en la gestión del agua. Además, la capacidad del ACP para revelar estructuras en los datos ayuda a entender mejor cómo las características físicas y meteorológicas de un área afectan la dinámica de escorrentía.

El análisis de componentes principales (ACP) mostró que un alto porcentaje de la varianza de los datos puede explicarse mediante unos pocos componentes principales. Las variables que más influyen en los primeros componentes incluyen el caudal

máximo (Q_{max}), el tiempo al caudal máximo (T_{qmax}) y la concentración media ponderada (EMC). Esto demuestra que estas variables son determinantes en la generación y comportamiento de la escorrentía.

El primer componente principal explicó un 53,20% de la varianza total, lo que indica que las variables seleccionadas en este componente influyen significativamente en la dinámica de la escorrentía y la contaminación.

6.3.2.- Análisis de Conglomerados (AC)

El análisis de conglomerados (AC) confirmó la agrupación homogénea de variables relacionadas con los tiempos de concentración y los caudales máximos. Este análisis ayudó a identificar grupos de variables que tienen un comportamiento similar, lo que permite simplificar los modelos y focalizar los esfuerzos en las variables más influyentes para la gestión de la escorrentía.

Los resultados del análisis sugieren que ciertas combinaciones de variables, como la intensidad de la lluvia y el tiempo de duración, están asociadas con niveles críticos de contaminación. Estos hallazgos son esenciales para la formulación de estrategias de gestión del agua que se dirijan a las condiciones de mayor riesgo. La identificación de grupos de variables que influyen conjuntamente en la escorrentía permite a los gestores priorizar acciones específicas en función de las características de cada evento de lluvia.

6.4.- CONCLUSIONES SOBRE LAS LLUVIAS CRÍTICAS

6.4.1.- Escenarios de mayor desfavorabilidad en polutogramas

Las lluvias críticas más desfavorables fueron aquellas de baja intensidad y larga duración, ya que generan grandes volúmenes de escorrentía y permiten la movilización sostenida de contaminantes acumulados. Este hallazgo es relevante, ya que contradice la creencia generalizada de que las lluvias de alta intensidad y corta duración son las más críticas en términos de contaminación.

La identificación de patrones en la generación de escorrentía a partir de lluvias críticas es esencial en un contexto de cambio climático puesto que proporciona una base para el desarrollo de modelos predictivos que permitan anticipar escenarios de contaminación. Esto es fundamental para la formulación de políticas ambientales que promuevan la protección de cuerpos de agua y la salud pública en entornos urbanos.

La identificación de estos escenarios críticos permite a los gestores del agua anticipar y preparar medidas de mitigación que sean específicas para cada tipo de lluvia. Por ejemplo, el diseño de infraestructuras de drenaje y almacenamiento puede ser optimizado para atender las características de las lluvias de baja intensidad y larga duración, garantizando así una mejor calidad del agua en los cuerpos receptores.

Además, la modelización de vertidos a cuerpos receptores durante estos eventos críticos revela que el impacto ambiental es mayor en lluvias que cumplen con estas condiciones. Esto sugiere la necesidad de establecer protocolos de monitoreo y

tratamiento para las aguas pluviales en estas situaciones, asegurando así que la calidad del agua cumpla con los estándares regulatorios.

6.4.2.- Simulación de vertidos a medios receptores

Se realizó una simulación del vertido de escorrentía a un río con caudal constante y concentración inicial conocida, lo que permitió evaluar la interacción entre la contaminación y el cuerpo receptor. Esta simulación fue clave para dimensionar tanques de tormenta, que se calcularon para retener el 100% y el 80% del volumen total de escorrentía, con capacidades de 146,50 m³/ha imp y 117,20 m³/ha imp, respectivamente. Estos tanques permitieron controlar los valores punta de contaminación y reducir significativamente el impacto de los reboses de escorrentía en el medio receptor.

La metodología propuesta para dimensionar tanques de tormenta ofrece un enfoque innovador que permite calcular volúmenes de retención necesarios para manejar adecuadamente la escorrentía, minimizando su impacto en los cuerpos receptores. La implementación de sistemas de retención y tratamiento de aguas pluviales es esencial para mitigar el impacto de los vertidos contaminantes en ríos y cuerpos de agua durante eventos de lluvias críticas.

La implementación de tanques de tormenta no solo es crucial para el control de escorrentías, sino que también puede ayudar en la recarga de acuíferos y en la mitigación de inundaciones.

6.5.- CONCLUSIONES SOBRE LA MODELIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO

6.5.1.- Variables clave para cuantificar el primer lavado

El primer lavado se cuantifica principalmente mediante variables como θ_{mean} , DynEMCmean, Gapmean y MImean. Estas permiten predecir la concentración de contaminantes en los momentos iniciales de un evento de lluvia y estimar el impacto total de los contaminantes arrastrados.

6.5.2.- Relación entre variables dinámicas (DynEMCmean, Gapmean, MImean)

Estas variables muestran cómo se comporta la escorrentía en función de la concentración dinámica de contaminantes. La relación entre estas variables es clave para ajustar los sistemas de retención y tratamiento de agua en tiempo real, permitiendo una gestión más eficaz del primer lavado. Su estudio sienta las bases para nuevas metodologías de análisis de la contaminación por escorrentía, destacando la necesidad de integrar variables innovadoras y enfoques multivariantes para mejorar la precisión en la predicción de la calidad del agua.

6.6.- RECOMENDACIONES TÉCNICAS

6.6.1.- Implementación de sistemas de control dinámico

Se recomienda implementar sistemas de control dinámico que ajusten la capacidad de retención de agua en función de la concentración de contaminantes y el volumen de escorrentía. Estos sistemas permitirán optimizar el uso de infraestructuras de retención y mitigar el impacto del primer lavado.

6.6.2.- Optimización del diseño de infraestructuras

El diseño de infraestructuras debe tener en cuenta tanto eventos de lluvia de alta intensidad como lluvias prolongadas de baja intensidad. Los tanques de tormenta deben estar dimensionados para manejar grandes volúmenes de escorrentía y evitar desbordamientos.

6.6.3.- Monitoreo y tratamiento de vertidos a ríos

Es crucial implementar sistemas de monitoreo continuo y tratamiento previo al vertido de la escorrentía en cuerpos de agua receptores. Se recomienda el uso de filtros y sistemas de pretratamiento que reduzcan la carga contaminante antes del vertido.

6.6.4.- Integración de infraestructuras verdes

Se sugiere la integración de infraestructuras verdes como pavimentos permeables y jardines de lluvia, que pueden reducir el volumen de escorrentía y mejorar la calidad del agua vertida al medio ambiente.

6.7.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.7.1.- Líneas de investigación como prolongación de la presente investigación

6.7.1.1.- Estudio generalizado del sistema

Ampliar la investigación a cuencas urbanas con diferentes características de pendiente, impermeabilidad y uso del suelo, permitirá validar los resultados obtenidos en esta investigación.

6.7.1.2.- Simulación dinámica de vertidos a medios receptores

Se recomienda realizar simulaciones más detalladas de vertidos de escorrentía en medios receptores, teniendo en cuenta diferentes escenarios meteorológicos y variaciones en las infraestructuras de retención.

6.7.2.- Líneas de investigación innovadoras

6.7.2.1.- Modelos predictivos basados en Inteligencia Artificial

El desarrollo de modelos predictivos basados en inteligencia artificial (IA) podría mejorar las predicciones sobre la escorrentía y optimizar las estrategias de retención y tratamiento en tiempo real.

6.7.2.2.- Evaluación del impacto del cambio climático

Es necesario investigar cómo el cambio climático está afectando la frecuencia e intensidad de las lluvias críticas, y adaptar las infraestructuras urbanas a estos nuevos escenarios para mitigar sus impactos.

6.7.2.3.- Investigación sobre contaminantes emergentes

Se recomienda continuar investigando sobre contaminantes emergentes como los microplásticos y productos farmacéuticos, que tienen efectos perjudiciales en los cuerpos de agua y requieren nuevos métodos de tratamiento.

6.7.2.4.- Aplicación de tecnologías de sensorización avanzada

El uso de tecnologías de sensorización avanzada permitirá un monitoreo en tiempo real de los niveles de contaminantes en la escorrentía, facilitando una respuesta más rápida y eficaz ante eventos críticos de lluvia.



CAPÍTULO 7

Referencias

7.- REFERENCIAS

A

- Adedeji, O. H.; Olayinka, O. O.;** (2013); *"Heavy Metal Concentrations in Urban Stormwater Runoff and Receiving Stream"*; Journal of Environment and Earth Science; ISSN:2224-3216; 3(7); pp. 141-150.
<https://iiste.org/Journals/index.php/JEES/article/view/6384>
- Ahmed, W.; Hamilton, K.; Toze, S.; Cook, S.; Page, D.;** (2019); *"A review on microbial contaminants in stormwater runoff and outfalls: Potential health risks and mitigation strategies"*; Science of The Total Environment; ISSN:0048-9697; 692; pp. 1304-1321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.055>
- Alias, N. B.;** (2013); *"First flush behaviour in urban residential catchments"*; Doctor of Philosophy degree in Science and Engineering Faculty Queensland University of Technology; pp. 306.
https://eprints.qut.edu.au/63811/1/Noraliani_Alias_Thesis.pdf
- Alias, Noraliani; Egodawatta, Prasanna; Goonetilleke, Ashantha;** (2013); *"First Flush Analysis in Urban Catchments"*; The 16th International Conference on Diffuse Pollution and Eutrophication, Beijing, China, 18 – 23 August, 2013; pp. 1-9.
https://eprints.qut.edu.au/63406/18/First_flush_analysis_in_urban_catchments.pdf
- Al Mamoon, A.; Jahan, S.; He, X.; Joergensen, N.E., Rahman, A.;** (2019); *"First flush analysis using a rainfall simulator on a micro catchment in an arid climate"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 693; pp. 12.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.358>
- Andrés-Doménech, Ignacio;** (2010); *"Evaluación probabilística de indicadores de eficiencia para el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta para el control de la contaminación de escorrentías urbanas"*; Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia; pp. 261.
<https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/8387/tesisUPV3232.pdf?sequence=1>
- Andrés-Doménech, I.; Hernández Crespo, C.; Martín, M.; Andrés Valeri, V.C.;** (2018); *"Characterization of wash-off from urban impervious surfaces and SuDS design criteria for source control under semi-arid conditions"*; Science of The Total Environment; ISSN:0048-9697; 612; pp. 1320–1328.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.011>

- Anta, J.; Beneyto, M.; Cagiao, J.; Piñeiro, J.; Temprano, J.; Suárez, J.; Puertas, J.;** (2007); *"Analysis of combined sewer overflow spill frequency/volume in north of Spain"*; *"Harmonizing the Demands of Art and Nature Hydraulics"*, 32th Congress of IAHR, International Association of Hydraulic Engineering & Research. Venecia, Italia; pp. 10. <http://www.geama.org/sanitaria/index.php?o=downloads&i=67>
- Anta, J.; Naves, A.; Naves, J.;** (2019); *"Introducción al cálculo de redes de saneamiento con SWMM"*; Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións; ISBN:9788497497336; pp. 55. <http://hdl.handle.net/2183/23619>
- Anta, J.; Puertas, J.; Suárez, J.; Del Río, H.; Hernáez, D.;** (2012); *"Gestión de las aguas pluviales en ámbito urbano. Las técnicas de drenaje urbano sostenible"*; Diputación de A Coruña. Cuenca fluvial y desarrollo sostenible. Río Mandeo; ISBN:9788498121742; pp. 381-398. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4013578>
- AQUALOGY y GEAMA de la Universidade Da Coruña;** (2014); *"Manual Nacional de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta"*; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Dirección General del Agua. Subdirección General de Infraestructuras y Tecnología; pp. 196. [https://www.asoaeas.com/sites/default/files/Documentos/Manual Tanques Tormenta MAGRAMA.pdf](https://www.asoaeas.com/sites/default/files/Documentos/Manual_Tanques_Tormenta_MAGRAMA.pdf)
- Artina, S.; Bolognesi, A.; Liserra, T.; Maglionico, M.;** (2007); *"Simulation of a storm sewer network in industrial area: Comparison between models calibrated through experimental data"*; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 22(8); pp. 1221-1228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.11.002>
- Aryal, R. K.; Furumai, H.; Nakajima, F.; Boller, M.;** (2005); *"Dynamic behavior of fractional suspended solids and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in highway runoff"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 39; pp. 5126–5134. <https://doi-org.unican.idm.oclc.org/10.1016/j.watres.2005.09.045>
- Ayuntamiento de Santander;** (1997); *"PGOU Santander. VI Infraestructuras de servicios"*; Ayuntamiento de Santander; pp. 22. http://santander.es/sites/default/files/6_infraestructuras_servicios.pdf

B

- Bach, Peter M.; McCarthy, David T.; Deletic, Ana;** (2010); *"Redefining the stormwater first flush phenomenon"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 44(8); pp. 2487-2498. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.01.022>
- Bannerman, R.T.; Owens, D.W.; Dodds, R.B.; Hornewer, N.J.;** (1993); *"Sources of Pollutants in Wisconsin Stormwater"*; Water Science and Technology; ISSN:0273-1223; 28(3-5); pp. 24 1-259. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0426>
- Becerril, A.; Lastra, A.;** (2005); *"La contaminación en tiempo de lluvia y los sistemas de depuración en núcleos de montaña"*; Ingeniería y territorio; ISSN:1695-9647; 71; pp. 38-43. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1340085>
- Behrouz, M.S.; Zhua, Z.; Matott, L.S.; Rabideau, A.J.;** (2020); *"A new tool for automatic calibration of the Storm Water Management Model (SWMM)"*; Journal of Hydrology; ISSN:0022-1694; 581; pp. 9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124436>
- Beneyto, María C.;** (2004); *"Evaluación de los rendimientos de depósitos de detención-aliviadero en redes de saneamiento unitarias en cuencas de la España húmeda"*; Tesis Doctoral. Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación. Universidade Da Coruña; pp. 746. <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/1019/BeneytoGonzalez-Baylin MariaCarmen TD 2004.pdf>
- Bertrand-Krajewski J.L.; Chebbo, G.; Saget, A.;** (1998); *"Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 32(8); pp. 2341-2356. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00420-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00420-X)
- Björklund, Karin;** (2011); *"Sources and Fluxes of Organic Contaminants in Urban Runoff"*; Doctor of Philosophy degree. Department of Civil and Environmental Engineering. Water Environment Technology. Chalmers University Of Technology. Gothenburg, Sweden; ISBN: 9789173854801; pp. 71. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/134241.pdf>
- Booth, D.B.; Hartley, D.; Jackson, R.;** (2002); *"Forest cover, impervious-surface area, and the mitigation of stormwater impacts"*; Journal of the American Water Resources Association; ISSN:1093-474X; 38(3); pp. 835-845. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb01000.x>
- Burghardt, T. E.; Pashkevich, A.;** (2023); *"Road markings and microplastics – A critical literature review"*; Transportation Research, Part D: Transport and Environment; ISSN:1361-9209; 119(103740); pp. 20. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103740>

Burghardt, T. E.; Pashkevich, A.; Babić, D.; Mosböck, H.; Babić, D.; Żakowska, L.; (2022); *"Microplastics and road markings: the role of glass beads and loss estimation"*; Transportation Research, Part D: Transport and Environment; ISSN:1361-9209; 102(103123); pp. 21.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103123>

C

Cagiao Villar, Juan; (2002); *"Estudio del funcionamiento hidráulico y de la movilización de la contaminación durante sucesos de lluvia en una cuenca unitaria y una separativa en el noroeste de España"*; Tesis Doctoral. Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación. Universidade Da Coruña; pp. 424. <http://hdl.handle.net/2183/1083>

Castro Fresno, Daniel; Rodríguez Bayón, Joseba; Rodríguez Hernández, Jorge; Ballester Muñoz, Francisco; (2005); *"Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible (SUDS)"*; INTERCIENCIA. Revista de Ciencia y Tecnología de América; ISSN:0378-1844; 30(5); pp. 255-260.
https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000500004

Chang, M.; McBroom, M. W.; Beasley, R. S.; (2004); *"Roofing as a source of nonpoint water pollution"*; Journal of Environmental Management; ISSN:0301-4797; 73(4); pp. 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.06.014>

Chen, C.; Guo, W.; Ngo, H. H.; (2019); *"Pesticides in stormwater runoff—A mini review"*; Frontiers of Environmental Science & Engineering; ISSN:2095-2201; 1; pp. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1150-3>

Cho, J.H.; Lee, J.H.; (2017); *"Stormwater Runoff Characteristics and Effective Management of Nonpoint Source Pollutants from a Highland Agricultural Region in the Lake Soyang Watershed"*; Water; ISSN:2073-4441; 9(10); pp. 26.
<https://doi.org/10.3390/w9100784>

Christian, L.; Epps, T.; Diab, G.; Hathaway, J.; (2020); *"Pollutant Concentration Patterns of In-Stream Urban Stormwater Runoff"*; Water; ISSN:2073-4441; 12(2534); pp. 21. <https://doi.org/10.3390/w12092534>

Clar M. L.; Barfield B. J.; O'Connor T.; (2004); *"Stormwater best management practice design guide: Volume 1 General Considerations"*; U.S. Environmental Protection Agency (EPA). EPA/600/R-04/121; pp. 179.
https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=99739

Cole, M.; Lindeque, P.; Halsband, C.; Galloway, T. S.; (2011); *"Microplastics as contaminants in the marine environment: A review"*; Marine Pollution Bulletin;

ISSN:0025-326X; 62(12); pp. 2588-2597.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>

Corsi, S. R.; Graczyk, D. J.; Geis, S. W.; Booth, N. L.; Richards, K. D.; (2010); "*A Fresh Look at Road Salt: Aquatic Toxicity and Water-Quality Impacts on Local, Regional, and National Scales*"; Environmental Science & Technology; ISSN:0013-936X; 44(19); pp. 7376–7382. <https://doi.org/10.1021/es101333u>

Councell, T. B.; Duckenfield, K. U.; Landa, E. R.; Callender, E.; (2004); "*Tire-Wear Particles as a Source of Zinc to the Environment*"; Environmental Science & Technology; ISSN:0013-936X; 38(15); pp. 4206-4214. <https://corpora.tika.apache.org/base/docs/govdocs1/711/711671.pdf>

D

Davis, A. P.; Shokouhian, M.; Ni, S.; (2001); "*Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources*"; Chemosphere; ISSN:0045-6535; 44(5); pp. 997-1009. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00561-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00561-0)

De Martino, Giuseppe; De Paola, Francesco; Fontana, Nicola; Marini, Gustavo; Ranucci, Antonio; (2011); "*Pollution Reduction in Receivers: Storm-Water Tanks*"; Journal of Urban Planning and Development; ISSN:0733-9488; 137(1); pp. 29-38. https://www.researchgate.net/publication/257652171_Pollution_Reduction_in_Receivers_Storm-Water_Tanks

De Paola, Francesco; Ranucci, Antonio; (2010); "*Design Criteria for Stormwater Tanks in Urban Drainage Systems in Some Italian Regions*"; Proceedings from First IAHR European Congress: May 2010; pp. 8. https://www.researchgate.net/publication/228475642_DESIGN_CRITERIA_FOR_STORMWATER_TANKS_IN_URBAN_DRAINAGE_SYSTEMS_IN_SOME_ITALIAN_REGIONS

de Zwart, D.; Adams, W.; Galay Burgos, M.; Hollender, J.; Junghans, M.; Merrington, G.; Muir, D.; Parkerton, T.; De Schamphelaere, K.A.C.; Whale, G.; Williams, R.; (2018); "*Aquatic Exposures of Chemical Mixtures in Urban Environments: Approaches to Impact Assessment*"; Environmental Toxicology and Chemistry; ISSN:0730-7268; 37(3); pp. 703–714. <https://doi.org/10.1002/etc.3975>

Del Río Cambeses, Héctor; (2011); "*Estudio de los flujos de contaminación movilizados en tiempo de lluvia y estrategias de gestión en un sistema de saneamiento y drenaje unitario de una cuenca urbana densa de la España*

Húmeda"; Grado de Doctor en Ciencia y Tecnología Ambiental de la Universidade da Coruña. <https://core.ac.uk/download/pdf/61904827.pdf>

Deletic, Ana; (2005); "*Sediment transport in urban runoff over grassed areas*"; Journal of Hydrology; ISSN:0022-1694; 301(1-4); pp. 108-122. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.023>

Dević, G.; Sakan, S.; Đorđević, D.; (2016); "*Assessment of the environmental significance of nutrients and heavy metal pollution in the river network of Serbia*"; Environmental Science and Pollution Research; ISSN:1614-7499; 23; pp. 282-297. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5808-5>

Díaz-Fierros T., F.; Puerta, J.; Suarez, J.; Díaz-Fierros V., F.; (2002); "*Contaminant loads of CSOs at the wastewater treatment plant of a city in NW Spain*"; Urban Water; ISSN:1462-0758; 4(3); pp. 291-299. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00020-1)

Di Modugno, M.; Gioia, A.; Gorgoglione, A.; Iacobellis, V.; La Forgia, G.; Piccinni, A.F.; Ranieri, E.; (2015); "*Build-Up/Wash-Off Monitoring and Assessment for Sustainable Management of First Flush in an Urban Area*"; Sustainability; ISSN:2071-1050; 7(5); pp. 5050-5070. <https://doi.org/10.3390/su7055050>

Dirección General del Agua/Subdirección General de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico; TRAGSATEC; (2019); "*Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas urbanos de drenaje sostenible*"; Ministerio para la Transición Ecológica. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones; ISBN:638180302; Octubre; pp. 96. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia-adaptacion-riesgo-inundacion-sistemas-urbano-drenaje-sostenible_tcm30-503726.pdf

Dotto, C.B.S.; Kleidorfer, M.; Deletic, A.; Rauch, W.; McCarthy, D.T.; Fletcher, T.D.; (2011); "*Performance and sensitivity analysis of stormwater models using a Bayesian approach and longterm high resolution data*"; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 26(10); pp. 1225-1239. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.03.013>

E

Egemose, S.; Petersen, A.B.; Sønderup, M.J.; Flindt, M.R.; (2020); "*First Flush Characteristics in Separate Sewer Stormwater and Implications for Treatment*"; Sustainability; ISSN:2071-1050; 12(5063); pp. 9. <https://doi.org/10.3390/su12125063>

Elsayed, A.E.S.; Grünwald, A.; Synáčková, M.; Slavíček, M.; (2001); "*Modelling of Highway Runoff Quantity and Quality*"; Acta Polytechnica; ISSN:1805-2363; 41(3); pp. 53-59. <https://doi.org/10.14311/236>

Espín Leal, Pablo; (2016); "*Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia*"; Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas. Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos; pp. 252. <http://hdl.handle.net/10317/5722>

F

Fletcher, T. D.; Shuster, W.; Hunt, W. F.; Ashley, R.; Butler, D.; Arthur, S.; ...; Viklander, M.; (2015); "*SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage*"; Urban Water Journal; ISSN:1573-062X; 12(7); pp. 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

Freni, Gabriele; Mannina, Giorgio; Viviani, Gaspare; (2009a); "*Identifiability analysis for receiving water body quality modelling*"; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 24(1); pp. 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.04.013>

Freni, Gabriele; Mannina, Giorgio; Viviani, Gaspare; (2009b); "*Urban runoff modelling uncertainty: Comparison among Bayesian and pseudo-Bayesian methods*"; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 24(9); pp. 1100-1111. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.003>

Freni, Gabriele; Mannina, Giorgio; Viviani, Gaspare; (2010); "*Emission standards versus immission standards for assessing the impact of urban drainage on ephemeral receiving water bodies*"; Water Science and Technology; ISSN:0273-1223; 61(6); pp. 1617-1629. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.887>

Funck, M.; Al-Azzawi, M. S.; Yildirim, A.; Knoop, O.; Schmidt, T. C.; Drewes, J. E.; Tuerk, J.; (2021); "*Release of microplastic particles to the aquatic environment via wastewater treatment plants: The impact of sand filters as tertiary treatment*"; Chemical Engineering Journal; ISSN:1385-8947; 426(130933); pp. 6. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130933>

G

- Gao, Z.; Zhang, Q.; Li, J.; Wang, Y.; Dzakpasu, M.; Wang, X. C.;** (2023); *"First flush stormwater pollution in urban catchments: A review of its characterization and quantification towards optimization of control measures"*; Journal of Environmental Management; ISSN:0301-4797; 340(117976); pp. 12.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117976>
- Garaga, R.; Chakraborty, S.; Zhang, H.; Gokhale, S.; Xue, Q.; Kota, S.H.;** (2020); *"Influence of anthropogenic emissions on wet deposition of pollutants and rainwater acidity in Guwahati, a UNESCO heritage city in Northeast India"*; Atmospheric Research; ISSN:0169-8095; 232; pp. 9.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104683>
- García González, Eduardo; Ibáñez Gallego, María Paz; Mosqueira Martínez, Gonzalo;** (2012); *"Análisis crítico de la problemática y las soluciones adoptadas a nivel Europeo en la gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos. Posibles aplicaciones en España"*; III Edición Máster en Gestión Fluvial Sostenible y Gestión Integrada de Aguas. Universidad de Zaragoza, Curso Académico 2010-2012; pp. 201.
<https://zaguan.unizar.es/record/9431/files/TAZ-TFM-2012-1050.pdf>
- García Haba, Eduardo;** (2011); *"Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos"*; Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València; pp. 218. <http://hdl.handle.net/10251/15383>
- Garmendia, M.; Madrazo-Uribeetxebarria, E.; Martín-Garín, A.; Millán, J. A.;** (2022); *"Progress towards sustainable stormwater management: Field monitoring of permeable pavements"*; EESAP13 International Conference 2022, 5-6 October Donostia-San Sebastián; ISBN:9788413194998; pp. 106-111.
<https://ekoizpen-zientifikoa.ehu.eus/documentos/648b52b2b367423619da0b29>
- Göbel, P.; Dierkes, C.; Coldewey, W.G.;** (2007); *"Storm water runoff concentration matrix for urban areas"*; Journal of Contaminant Hydrology; ISSN:0169-7722; 91(1-2); pp. 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.08.008>
- Goh, S. G.; Saeidi, N.; Gu, X., Vergara, G. G. R.; Liang, L.; Fang, H.; ... ; Gin, K. Y. H.;** (2019); *"Occurrence of microbial indicators, pathogenic bacteria and viruses in tropical surface waters subject to contrasting land use"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 150; pp. 200-215.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.058>
- Gómez-Ullate Fuente, Elena;** (2010); *"Estudio de un aparcamiento de firmas filtrantes para la mejora de la gestión sostenible de las aguas urbanas mediante el almacenamiento el almacenamiento y valorización del agua de lluvia"*; Tesis

Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria; pp. 343.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=181621>

Gorgoglione, A.; Bombardelli, F. A.; Pitton, B. J.; Oki, L. R.; Haver, D. L.; Young, T. M.; (2019); "*Uncertainty in the parameterization of sediment build-up and wash-off processes in the simulation of sediment transport in urban areas*"; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 111; pp. 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.022>

Gorgoglione, Angela; Gioia, Andrea; Iacobellis, Vito; Piccinni, Alberto Ferruccio; Ranieri, Ezio; (2016); "*A Rationale for Pollutograph Evaluation in Ungauged Areas, Using Daily Rainfall Patterns: Case Studies of the Apulian Region in Southern Italy*"; Applied and Environmental Soil Science; ISSN:1687-7667; 2016; pp. 16.
<http://downloads.hindawi.com/journals/aess/2016/9327614.pdf>

Gromaire-Mertz, M.C.; Garnaud, S.; Gonzalez, A.; Chebbo, G.; (1999); "*Characterisation of urban runoff pollution in Paris*"; Water Science and Technology; ISSN:0273-1223; 39(2); pp. 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00002-5)

Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente (GEAMA); (2007); "*Contaminación en redes de alcantarillado: tiempo seco y tiempo de lluvia*"; Universidade Da Coruña. VII Curso sobre diseño e instalación de tuberías para transporte de agua; pp. 78. <https://1library.co/document/zg9xw6nq-contaminacion-en-redes-de-alcantarillado-tiempo-seco-y-tiempo-de-lluvia.html>

H

Hamilton, R.S.; Harrison, R.S.; (1991); "*Highway Pollution*"; Elsevier Science Publishers B.V.; ISBN:0444881883; pp. 523.
https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xFRKsBe7kw4C&oi=fnd&pg=P1&dq=highway+pollution&ots=V5Rpts-q8i&sig=rxaw8A7U_Ob_g1yhqHH8v619gcA#v=onepage&q=highway%20pollution&f=false

Hatt, B. E.; Fletcher, T. D.; Walsh, C. J.; Taylor, S. L.; (2004); "*The Influence of Urban Density and Drainage Infrastructure on the Concentrations and Loads of Pollutants in Small Streams*"; Environmental Management; ISSN:0364-152X; 34(1); pp. 112-124. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0221-8>

Helsel, D.R.; Kim, J.I.; Grizzard, T.J.; Randall, C.W.; Hoehn, R.C.; (1979); "*Land Use Influences on Metals in Storm Drainage*"; Journal (Water Pollution Control

- Federation); ISSN:0043-1303; 51(4); pp. 709-717.
<https://www.jstor.org/stable/25039892>
- Hermoso, M.; García-Ruiz, M.J.; Osorio, F.;** (2018); "*Efficiency of Flood Control Measures in a Sewer System Located in the Mediterranean Basin*"; Water; ISSN:2073-4441; 10(10); pp. 14. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/10/1437/pdf>
- Hernández, A.;** (1990); "*Saneamiento y alcantarillado*"; Paraninfo, S.A.; Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid; ISBN: 84-380-0041-X; Madrid. <https://www.amazon.com/-/he/Aurelio-Hern%C3%A1ndez-Mu%C3%B1oz/dp/843800041X>
- Hong, Y.; Bonhomme, C.; Van den Bout, B.; Jetten, V.; Chebbo, G.;** (2017); "*Integrating atmospheric deposition, soil erosion and sewer transport models to assess the transfer of traffic-related pollutants in urban areas*"; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 96; pp. 158-171.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.047>
- Hossain, S.; Hewa, G.A.; Wella-Hewage, S.;** (2019); "*A Comparison of Continuous and Event-Based Rainfall–Runoff (RR) Modelling Using EPA-SWMM*"; Water; ISSN:2073-4441; 11(611); pp. 34. <https://doi.org/10.3390/w11030611>
- House, M. A.; Ellis, J. B.; Herricks, E. E.; Hvitved-Jacobsen, T.; Seager, J.; Lijklema, L.; Aalderink, H.; Cliffordell, I. T.;** (1993); "*Urban Drainage - Impacts on Receiving Water Quality*"; Water Science & Technology; ISSN:0273-1223; 27(12); pp. 117-158. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0293>
- Huber, W.; Dickinson, R.;** (1992); "*Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual*"; U.S. Environmental Protection Agency (EPA). EPA/600/3-88/001a, NTIS PB88-236641/AS; pp. 720.
<http://www.dynsystem.com/netstorm/docs/swmm4manuals.pdf>
- Huber, Wayne; Roesner, Larry;** (2012); "*The History and Evolution of the EPA SWMM*"; "Fifty Years Of Watershed Modeling - Past, Present And Future", Eds, ECI Symposium Series, Volume P20 (2013).; pp. 35.
<https://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=watershed>
- Hur, S.; Nam, K.; Kim, J.; Kwak, C.;** (2018); "*Development of urban runoff model FFC-QUAL for first-flush water-quality analysis in urban drainage basins*"; Journal of Environmental Management; ISSN:0301-4797; (205); pp. 73-84.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.060>

I

Instituto Nacional de Estadística (INE); (2023);
<https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=61396>

J

Järllskog, I.; Fager, H.; Gustafsson, M.; (2024); *"Reply to road markings and microplastics- a critical literature review"*; Transportation Research, Part D: Transport and Environment; ISSN:1361-9209; 132(104265); pp. 5.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104265>

Jensen, D.M.R.; Sandoval, S.; Aubin, J.B.; Bertrand-Krajewski, J.L.; Xuyong, L.; Mikkelsen, P.S.; Vezzaro, L.; (2022); *"Classifying pollutant flush signals in stormwater using functional data analysis on TSS MV curves"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 217(118394); pp. 12.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118394>

Ji, J.; Gao, J.; Xing, L.; Liu, X.; (2023); *"High-resolution mapping of the rainfall runoff pollution: case study of Shiwuli River watershed, China"*; Environmental Science and Pollution Research; ISSN:1614-7499; 30(11); pp. 28935-28946.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-24171-6>

Jiménez, R.; Ríos, A.; Temprano, J.; Suárez J.; Tejero, I.; (1996); *"Urban runoff pollution: determination of design pollutographs"*; 7th International Conference on Urban Storm Drainage. Hannover, Alemania; pp. 151-156.
<https://www.geama.org/sanitaria/index.php?o=downloads&i=108>

Jiménez Gallardo, B. Roberto; (1999); *"Contaminación por escorrentía urbana"*; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Señor N°22; ISBN:9788438001578; pp. 465. https://libreria.ciccp.es/libro/contaminacion-por-escorrentia-urbana_1835

Jiménez, R.; López, A.; Lobo, A.; Tejero, I.; (2022); *"Theoretical analysis of urban runoff pollutographs: identification of characterization variables and impact"*; Environmental Technology; ISSN:0959-3330; pp. 22.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2059406>

Jiménez, V.; Del Río, H.; Ures, P.; Torres, D.; Vieito, S.; Payo, P.; Temprano, C.; De La Vega, F.; Suárez, J.; (2012); *"Contaminación en las escorrentías de autopistas y vías con alta intensidad de tráfico. Estudio de una cuenca piloto en FENE (Galicia) y diseño de una técnica de drenaje sostenible de escorrentía de autopistas (TDSEA)"*; VI Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. Valencia,

K

- Kelly, V. R.; Lovett, G. M.; Weathers, K. C.; Findlay, S. E.; Strayer, D. L.; Burns, D. J.; Likens, G. E.;** (2008); *"Long-Term Sodium Chloride Retention in a Rural Watershed: Legacy Effects of Road Salt on Streamwater Concentration"*; Environmental Science & Technology; ISSN:0013-936X; 42(2); pp. 410-415.
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es071391l>
- Kessler, Sabine;** (2014); *"Impact of Stormwater Management Measures on Pollutant Removal in Urban Environments"*; Doktor der Naturwissenschaften. Fachbereich VI Raum und Umweltwissenschaften. Universität Trier; pp. 122.
<https://doi.org/10.25353/ubtr-xxxx-624b-268d>
- Kim, R.H.; Lee, S.; Kim, Y.M.; Lee, J.H.; Kim, S.K.; Kim, S.G.;** (2005); *"Pollutants in rainwater runoff in Korea: their impacts on rainwater utilization"*; Environmental Technology; ISSN:0959-3330; 26(4); pp. 411-420.
<https://doi.org/10.1080/09593332608618546>
- Kim, L.H.; Jeong, S.M.; Ko, S.O.;** (2007a); *"Determination of first flush criteria using dynamic EMCs (event mean concentrations) on highway stormwater runoff"*; Water Science & Technology; ISSN:0273-1223; 55(3); pp. 71-77.
<https://doi.org/10.2166/wst.2007.074>
- Kim, L.H.; Ko, S.O.; Jeong, S.; Yoon, J.;** (2007b); *"Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm"*; Science of The Total Environment; ISSN:0048-9697; 36(1-3); pp. 178-184.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.053>
- Kourtis, I.M.; Nalbantis, I.; Tsakiris, G.; Psiloglou, B.E.; Tsihrintzis, V.A.;** (2022); *"Updating IDF Curves Under Climate Change: Impact on Rainfall-Induced Runoff in Urban Basins"*; Water Resources Management; ISSN:1573-1650; pp. 26. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03252-8>
- Koustas, R.;** (2000); *"Update on EPA'S Urban Watershed Management Branch Modeling Activities"*; Journal Of Water Management Modeling; ISSN:2292-6062; pp. 379-391. <https://www.chijournal.org/Content/Files/R206-21.pdf>
- Koutnik, V. S.; Leonard, J.; Glasman, J. B.; Brar, J.; Koydemir, H. C.; Novoselov, A.; ...; Mohanty, S. K.;** (2022); *"Microplastics retained in stormwater control measures: Where do they come from and where do they go?"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 210(118008); pp. 9.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.118008>

Kuller, M.; Bach, P. M.; Ramirez-Lovering, D.; Deletic, A.; (2017); *"Framing water sensitive urban design as part of the urban form: A critical review of tools for best planning practice"*; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 96; pp. 265-282. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.003>

L

Lapointe, M.; Rochman, C.M.; Tufenkji, N.; (2022); *"Sustainable strategies to treat urban runoff needed"*; Nature Sustainability; ISSN:2398-9629; 5; pp. 366-369. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00853-4>

Laskar, N.; Kumar, U.; (2019); *"Plastics and microplastics: A threat to environment"*; Environmental Technology & Innovation; ISSN:2352-1864; 14(100352); pp. 8. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100352>

Lastra, A.; Suarez, J.; Puertas, J.; Anta, J.; Ortega, M.; Botello, J.; (2020); *"Parameterizing the diffuse pollution in a continental Mediterranean city"*; Desalination and Water Treatment; ISSN:1944-3994; 200; pp. 441–449. https://www.deswater.com/DWT_articles/vol_200_papers/200_2020_441.pdf

Lazaro, T.R.; (1990); *"Urban Hidrology. A Multidisciplinary Perspective"*; Technomic Publishing Company, Inc.; ISBN: 877625476; pp. 239. https://books.google.es/books?id=pEVX3A6AJ0IC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Lee, J.H.; Bang, K.W.; Ketchum, L.H.; Choe, J.S.; Yu, M.J.; (2002); *"First flush analysis of urban storm runoff"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 293(1-3); pp. 163-175. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00006-2)

Lee, B.C.; Matsui, S.; Shimizu, Y.; Matsuda, T.; (2005); *"Characterizations of the First Flush in Storm Water Runoff from an Urban Roadway"*; Environmental Technology; ISSN:0959-3330; 26(7); pp. 773-782. <https://doi.org/10.1080/09593332608618508>

Legret, M.; G. Raimbault; Boisson, J.C.; (2006); *"Contaminación e impacto de las aguas de escorrentía de las calzadas"*; Ingeniería Civil; ISSN:0213-8468; (143); pp. 2. https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/143/contaminacion_aguas_escorrentia.pdf

Lenka, S. P.; Jasemizad, T.; Balaneji, I. R.; Huang, B.; Campbell, B.; Whittaker, C.; Padhye, L. P.; (2021); *"The fate of microplastics in natural and engineered aquatic systems: a case study of unplanned indirect potable reuse"*; Current Opinion in Environmental Science & Health; ISSN:2468-5844; 24(100302); pp. 9. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100302>

- Li, D.; Wan, J.; Ma, Y.; Wang, Y.; Huang, M.; Chen, Y.;** (2015); *"Stormwater Runoff Pollutant Loading Distributions and Their Correlation with Rainfall and Catchment Characteristics in a Rapidly Industrialized City"*; PLOS ONE; ISSN:1932-6203; 10(3); pp. 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118776>
- Li, L.Q.; Yin, C.Q.; He, Q.C.; Kong, L.L.;** (2007); *"First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China"*; Journal of Environmental Sciences; ISSN:1001-0742; 19(3); pp. 295-299. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60048-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60048-5)
- Li, M.H.; Barrett, M.E.;** (2008); *"Relationship Between Antecedent Dry Period and Highway Pollutant: Conceptual Models of Buildup and Removal Processes"*; Water Environment Research; ISSN:1061-4303; 80(8); pp. 740-747. <https://doi.org/10.2175/106143008X296451>
- Lijklema, L.; Tyson, J. M.; Lesouef, A.;** (1993); *"Interactions Between Sewers, Treatment Plants and Receiving Waters in Urban Areas: A Summary of the Interurba '92 Workshop Conclusions"*; Water Science & Technology; ISSN:0273-1223; 27(12); pp. 1-29. <https://search.proquest.com/openview/97a3aca56fdbdfe7161d1d4cbe2f554e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2044520>
- Liu, A.; Ma, Y.; Gunawardena, J.M.A.; Egodawatta, P.; Ayoko, G.A.; Goonetilleke, A.;** (2018); *"Heavy metals transport pathways: The importance of atmospheric pollution contributing to stormwater pollution"*; Ecotoxicology and Environmental Safety; ISSN:0147-6513; 164; pp. 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.072>
- Luo, J.; Zheng, Z.; Li, T.; He, S.; Wang, Y.; Zhang, X.; ... ; Liu, T.;** (2019); *"Characterization of runoff and sediment associated with rill erosion in sloping farmland during the maize-growing season based on rescaled range and wavelet analyses"*; Soil and Tillage Research; ISSN:0167-1987; 195(104359); pp. 11. <https://doi-org.unican.idm.oclc.org/10.1016/j.still.2019.104359>
- Luo, J.; Zheng, Z.; He, S.; Ding, W.;** (2023); *"Multi-temporal spatial modelling to assess runoff and sediment dynamics under different microtopographic patterns"*; Geoderma; ISSN:0016-7061; 436(116539); pp. 11. <https://doi-org.unican.idm.oclc.org/10.1016/j.geoderma.2023.116539>
- Luo, J., Zhou, X.; Rubinato, M.; Li, G.; Tian, Y.; Zhou, J.;** (2020); *"Impact of multiple vegetation covers on surface runoff and sediment yield in the small basin of Nverzhai, Hunan Province, China"*; Forests; ISSN:1999-4907; 11(329); pp. 18. <https://doi.org/10.3390/f11030329>

M

- Ma, Y.;** (2016); *"Human health risk of toxic chemical pollutants generated from traffic and land use activities"*; Queensland University of Technology. School of Civil Engineering and Built Environment. Science and Engineering Faculty; pp. 341. <https://eprints.qut.edu.au/92724/>
- Madrazo-Uribeetxebarria, E.; Antin, M. G.; Berrondo, J. A.; Andrés-Doménech, I.;** (2021); *"Sensitivity analysis of permeable pavement hydrological modelling in the Storm Water Management Model"*; Journal of Hydrology; ISSN:0022-1694; 600(126525); pp. 10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126525>
- Madrazo-Uribeetxebarria, E.; Antín, M. G.; Eguilegor, G. A.; Andrés-Doménech, I.;** (2023); *"Analysis of the hydraulic performance of permeable pavements on a layer-by-layer basis"*; Construction and Building Materials; ISSN:0950-0618; 387(131587); pp. 14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131587>
- Malgrat, Pere; Sunyer, David; Russo, Beniamino;** (2015); *"Las nuevas exigencias sobre las explotaciones de saneamiento derivadas de la aplicación del Real Decreto 1290/2012"*; Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua. JIA 2015. La precipitación y los procesos erosivos. Córdoba, 20 a 23 de octubre de 2015; ISBN:9788460830436; pp. 8. <https://www.aguasresiduales.info/descargar/revista/articulos/1xFoWEsyZH0IViaJazwEWDzOv.pdf>
- Mambretti, S.; Sanfilippo, U.;** (2011); *"Influence of rainfall patterns on the efficiency of first flush storage tanks"*; WIT Transactions on the Built Environment; ISSN:1743-3509; 122; pp. 263-272. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/UW12/UW12023FU1.pdf>
- Mamun, A.A.; Shams, S.; Nuruzzaman, M.;** (2020); *"Review on uncertainty of the first-flush phenomenon in diffuse pollution control"*; Applied Water Science; ISSN:2190-5495; 10(53); pp. 10. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1127-1>
- Maniquiz-Redillas, M.; Robles, M.E.; Cruz, G.; Reyes, N.J.; Kim, L.H.;** (2022); *"First Flush Stormwater Runoff in Urban Catchments: A Bibliometric and Comprehensive Review"*; Hydrology; ISSN:2306-5338; 9(63); pp. 22. <https://doi.org/10.3390/hydrology9040063>
- Métadier, M.; Bertrand-Krajewski, J.L.;** (2012); *"The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 46(20); pp. 6836-6856. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.030>

- Momparler, Sara Perales; Andrés-Doménech, Ignacio;** (2007); *"Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia"*; Equipamiento y Servicios Municipales; ISSN:1131-6381; 133; pp. 15-67. http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-05-24_09-22-03123715.pdf
- Monte, V.; Marco, J.;** (1992); *"Formación de la escorrentía urbana. Procesos físicos y métodos de cálculo"*; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Inundaciones y redes de drenaje urbano; ISBN:9788438000588; pp. 41-57. <https://www.casadellibro.com/libro-inundaciones-y-redes-de-drenaje-urbano/9788438000588/451011>
- Morgan, D.; Johnston, P.; Osei, K.; Gill, L.;** (2017); *"The influence of particle size on the first flush strength of urban stormwater runoff"*; Water Science and Technology; ISSN:0273-1223; 76(8); pp. 2140–2149. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.386>
- Mrowiec, M.; Kamizela, T.; Kowalczyk, M.;** (2009); *"Occurrence of first flush phenomenon in drainage system of Częstochowa"*; Environmental Protection Engineering; ISSN:0324-8828; 35(2); pp. 73–80. http://epe.pwr.wroc.pl/2009/Mrowiec_2-2009a.pdf
- Müller, A.; Österlund, H.; Marsalek, J.; Viklander, M.;** (2020); *"The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 709; pp. 18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>
- Muschalla, Dirk; Vallet, Bertrand; Anctil, François; Lessard, Paul; Pelletier, Geneviève; Vanrolleghem, Peter A.;** (2014); *"Ecohydraulic-driven real-time control of stormwater basins"*; Journal of Hydrology; ISSN:0022-1694; 511; pp. 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.002>

N

- Nabizadeh, R.; Mahvi, A.; Mardani, G.; Yunesian, M.;** (2005); *"Study of heavy metals in urban runoff"*; International Journal of Environmental Science and Technology; ISSN:1735-1472; 1(4); pp. 325-333. <https://doi.org/10.1007/BF03325849>
- Nekhavambe, T. J.; Van Ree, T.; Fatoki, O. S.;** (2014); *"Determination and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers, surface runoff, and sediments in and around Thohoyandou, Limpopo Province, South Africa"*; Water SA; ISSN:0378-4738; 40(3); pp. 415-424. <https://doi.org/10.4314/wsa.v40i3.4>

O

- Obermaier, N.; Pistocchi, A.;** (2022); *"A Preliminary European-Scale Assessment of Microplastics in Urban Wastewater"*; Frontiers in Environmental Science; ISSN:2296-665X; 10(912323); pp. 12.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.912323>
- Österlund, H.; Blecken, G.; Lange, K.; Marsalek, J.; Gopinath, K.; Viklander, M.;** (2023); *"Microplastics in urban catchments: Review of sources, pathways, and entry into stormwater"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 858(159781); pp. 17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159781>

P

- Park, D.; Kang, H.; Jung, S. H.; Roesner, L. A.;** (2015); *"Reliability analysis for evaluation of factors affecting pollutant load reduction in urban stormwater BMP systems"*; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 74; pp. 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.010>
- Paul, M. J.; Meyer, J. L.;** (2001); *"Streams in the Urban Landscape"*; Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics; ISSN:1543-592X; 32(1); pp. 333-365.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040>
- Perera, T.; McGree, J.; Egodawatta, P.; Jinadasa, K.B.S.N.; Goonetilleke, A.;** (2019); *"Taxonomy of influential factors for predicting pollutant first flush in urban stormwater runoff"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 166; pp. 10.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115075>
- Perera, T.; McGree, J.; Egodawatta, P.; Jinadasa, K.B.S.N.; Goonetilleke, A.;** (2021); *"Catchment based estimation of pollutant event mean concentration (EMC) and implications for first flush assessment"*; Journal of Environmental Management; ISSN:0301-4797; 279(111737); pp. 9.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111737>
- Perales Momparler, Sara;** (2008); *"Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)"*; EXPO ZARAGOZA 2008. Semana temática: Agua y Servicios de Abastecimiento y Saneamiento. Eje temático: 4. Capacidad Tecnológica, Condicionantes y Soluciones; pp. 11.
<https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/33S8-P3-Sara%20PeralesACC.pdf>
- Perales Momparler, S.; Andrés-Doménech, I.; Hernández-Crespo, C.; Vallés-Morán, F.; Martín, M.; Escuder-Bueno, I.; Andreu, J.;** (2017); *"The role of*

monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: a case study in the Valencian region, Spain"; Journal of Cleaner Production; ISSN:0959-6526; 163; pp. S113-S124.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.153>

Perumal, K.; Muthuramalingam, S.; (2022); *"Global sources, abundance, size, and distribution of microplastics in marine sediments - A critical review"*; Estuarine, Coastal and Shelf Science; ISSN:1096-0015; 264(107702); pp. 18.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107702>

Pusch, Patricia Barcelos; (2007); *"Inventário de cargas de metais a partir de fontes difusas de poluição"*; Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração de Saneamento e Ambiente. Universidade Estadual De Campinas. Faculdade De Engenharia Civil, Arquitetura E Urbanismo. Departamento De Saneamento E Ambiente; pp. 118.
<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257778>

Q

Qin, Huapeng; He, Kang-mao; Fu, Guangtao; (2016); *"Modeling middle and final flush effects of urban runoff pollution in an urbanizing catchment"*; Journal of Hydrology; ISSN:0022-1694; 534; pp. 638-647.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.038>

R

Ramezani, M.R.; Helfer, F.; Yu, B.; (2023); *"Individual and combined impacts of urbanization and climate change on catchment runoff in Southeast Queensland, Australia"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 861(160528); pp. 15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160528>

Rathnayake, U.S.; Tanyimboh, T.T.; (2012); *"Optimal control of combined sewer systems using SWMM 5.0"*; WIT Transactions on the Built Environment; ISSN:1743-3509; 122; pp. 87-96.
<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/UW12/UW12008FU1.pdf>

Reoyo-Prats, B.; Aubert, D.; Menniti, C; Ludwig, W.; Sola, J.; Pujo-Pay, M.; Conan, P.; Verneau, O.; Palacios, C.; (2017); *"Multicontamination phenomena occur more often than expected in Mediterranean coastal watercourses: Study case of the Têt River (France)"*; Science of the Total

Environment; ISSN:0048-9697; 579; pp. 10-21.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.019>

Ringler, Simon; (2007); *"First Flush Characterization of Storm Water Runoff"*; Master of Science. Department of Civil and Environmental Engineering. Faculty of the University of New Orleans; pp. 127. <https://scholarworks.uno.edu/td/537>

Robin, T.; Johnny, G.; Mohamed, S.; Romaina, T.; Jérôme, B.; Alain, R.; Bruno, T.; (2021); *"Abundance, composition and fluxes of plastic debris and other macrolitter in urban runoff in a suburban catchment of Greater Paris"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 192(116847); pp. 8.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116847>

Rodríguez Bayón, Joseba; (2008); *"Análisis de los aspectos de depuración y degradación de los hidrocarburos presentes en las aguas procedentes de la escorrentía urbana, en los firmes permeables"*; Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria; pp. 541. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=181669>

Rodríguez Bayón, Joseba; (2013); *"Sistemas urbanos de drenaje sostenible. La infraestructura verde"*; "PAISAJES PRODUCTIVOS" VIII CURSO DE URBANISMO 2013 – Bilbao. 31 de enero, y 1 y 7 de febrero de 2013. (A.V.N.A.U.) Agrupación Vasco Navarra de Arquitectos Urbanistas; ISBN:9788469597002; pp. 58-67.
<http://www.coavn.org/coavn/Avnau/Cursos/2013PaisajesProductivos.pdf#page=64>

Rodríguez Hernández, J.; Fernández Barrera, A. H.; Castro Fresno, D.; Vega Zamanillo, A.; (2010); *"Long-Term Simulation of a System for Catchment, Pretreatment, and Treatment of Polluted Runoff Water"*; Journal of Environmental Engineering; ISSN:0733-9372; 136(12); pp. 1442-1446.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000279](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000279)

Rodríguez Hernández, J.; Andrés Valeri, V. C.; Ascorbe Salcedo, A.; Castro Fresno, D.; (2016); *"Laboratory Study on the Stormwater Retention and Runoff Attenuation Capacity of Four Permeable Pavements"*; Journal of Environmental Engineering; ISSN:0733-9372; 142(2); pp. 04015068-1/04015068-8.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001033](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001033)

Rodríguez Hernández, Jorge; Fernández Barrera, Andrés; Andrés Valeri, Valerio; Vega Zamanillo, Angel; Castro Fresno, Daniel; (2013); *"Relationship between Urban Runoff Pollutant and Catchment Characteristics"*; Journal of Irrigation and Drainage Engineering; ISSN:0733-9437; 139(10); pp. 833-840. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000617](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000617)

Roesner, L.A.; Bledsoe, B.P.; (2003); *"Physical effects of wet weather flows on aquatic habitats: Present knowledge and research needs"*; IWA Publishing; International Water Association Publications; ISBN:9781780403243; 2; pp. 197. <https://doi.org/10.2166/9781780403243>

- Rossman, L.A.; Dickinson, R.E.; Schade, T.; Chan, C. C.; Burgess, E.; Sullivan, D.; Lai, F.; (2004); "SWMM 5 - the Next Generation of EPA's Storm Water Management Model"; Journal of Water Management Modeling; ISSN:2292-6062; pp. 339-358. <https://www.chijournal.org/Content/Files/R220-16.pdf>
- Roy, A. H.; Wenger, S. J.; Fletcher, T. D.; Walsh, C. J.; Ladson, A. R.; Shuster, W. D.; ... ; Brown, R. R.; (2008); "Impediments and Solutions to Sustainable, Watershed-Scale Urban Stormwater Management: Lessons from Australia and the United States"; Environmental Management; ISSN:0364-152X; 42; pp. 344-359. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9119-1>
- Rueda Palenzuela, Salvador; (2012); "Libro verde de sostenibilidad urbana y local en la era de la información"; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones; ISBN:9788449112331; pp. 697. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/pdf/9982755F-02CF-47D9-9571-0723387D66F7/130252/Libro_Verde_Final_15012013_tcm7247905.pdf
- Russo, Beniamino; Malgrat Bregolat, Pere; Suñer Roqueta, David; (2007); "Depósitos para retención de primera escorrentía. Criterios de diseño y operación"; V Congreso de la Ingeniería Civil. Desarrollo y sostenibilidad en el Marco de la Ingeniería. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Sevilla 26, 27 y 28 de noviembre de 2007; ISBN:9788438004036; pp. 19. https://nanopdf.com/download/depositos-para-retencion-de-primera-escorrentia-criterios-de_pdf
- Russo, C.; Castro, A.; Gioia, A.; Iacobellis, V.; Gorgoglione, A.; (2023); "A Stormwater Management Framework for Predicting First Flush Intensity and Quantifying its Influential Factors"; Water Resources Management; ISSN:1573-1650; 37(3); pp. 1437–1459. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03438-8>
- Russo, C.; Castro, A.; Gioia, A.; Iacobellis, V.; Gorgoglione, A.; (2023); "Improving the sediment and nutrient first-flush prediction and ranking its influencing factors: An integrated machine-learning framework"; Journal of Hydrology; ISSN:0022-1694; 616(128842); pp. 11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128842>

S

- Saget, A.; Chebbo, G.; Bertrand-Krajewski, J.L.; (1996); "The first flush in sewer systems"; Water Science and Technology; ISSN:0273-1223; 33(9); pp. 101-108. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00375-7](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00375-7)
- Sanches Filho, P. J.; Böhm, E. M.; Böhm, G. M.; Montenegro, G. O.; Silveira, L. A.; Betemps, G. R.; (2017); "Determination of hydrocarbons transported by

urban runoff in sediments of São Gonalo Channel (Pelotas – RS, Brazil)"; Marine Pollution Bulletin; ISSN:0025-326X; 114(2); pp. 1088-1095.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.024>

Sañudo Fontaneda, Luis ngel; Rodríguez Hernández, Jorge; Castro Fresno, Daniel; (2012); *"Diseño y Construcci3n de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)";* Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; pp. 137.
https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Rodriguez-Hernandez/publication/257231993_Diseo_y_Construccion_de_Sistemas_Urbanos_de_Drenaje_Sostenible_SUDS/links/55c8998208aebc967df8ec47/Diseo-y-Construccion-de-Sistemas-Urbanos-de-Drenaje-Sostenible-SUDS.pdf

Schweinsberg, F.; Abke, W.; Rieth, K.; Rohmann, U.; Zullei-Seibert, N.; (1999); *"Herbicide use on railway tracks for safety reasons in Germany?"*; Toxicology Letters; ISSN:0378-4274; 107(1-3); pp. 201–205.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(99\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(99)00048-X)

Shamseldin, A.Y.; (2011); *"Stormwater first flush analysis in the Auckland Region";* Auckland Council. Technical Report 2011/007, Auckland, New Zealand; ISBN:9781927169131; pp. 64.
<https://knowledgeauckland.org.nz/media/1736/tr2011-007-stormwater-first-flush-analysis-in-the-auckland-region.pdf>

Sharifi, Soroosh; Massoudieh, Arash; Kayhanian, Masoud; (2011); *"A Stochastic Stormwater Quality Volume-Sizing Method with First Flush Emphasis";* Water Environment Research; ISSN:1061-4303; 83(11); pp. 2025-2035.
<https://doi.org/10.2175/106143011X12989211>

Sharma, A.; Gardner, T.; Begbie, D.; (2019); *"Approaches to Water Sensitive Urban Design. Potential, Design, Ecological Health, Urban Greening, Economics, Policies, and Community Perceptions";* Elsevier Inc.; ISBN:9780128128435; pp. 604. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03594-5>

Smith, Mia; (2015); *"Evaluation of Stormwater BMP Alternatives in the Malden River Watershed";* Massachusetts Institute of Technology. Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering; pp. 70.
<http://hdl.handle.net/1721.1/99628>

Soriano Martínez, Lucía; (2015); *"Indicadores de sostenibilidad de la gesti3n integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos: aplicaci3n a la ciudad de Zaragoza";* Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politcnica de Madrid; pp. 453.
http://oa.upm.es/38474/1/Lucia_Soriano_Martinez.pdf

Suárez L3pez, Joaquín; (1994); *"Modelos de calidad del agua del río Nal3n (Tramo Superior). Aplicaci3n al estudio del estiaje húmedo";* Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=210445>

- Suárez López, Joaquín;** (2016); *"El reto de la gestión de la contaminación asociada a las aguas de escorrentía en entornos urbanos"*; Diputació Barcelona. Jornada Técnica. SUDS - Sistemes Urbans de Drenatge Sostenible. Barcelona, 25 de noviembre de 2016; pp. 94.
https://xarxaenxarxa.diba.cat/sites/xarxaenxarxa.diba.cat/files/02_jornada_tduc_barcelona_-_jsl_final.pdf
- Suárez López, Joaquín; Cagiao Villar, Juan;** (2005); *"Vertidos de sistemas de saneamiento unitario en tiempo de lluvia: control de impactos sobre los ríos"*; Ingeniería y territorio; ISSN:1695-9647; 71; pp. 44-55.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1340088>
- Suárez López, Joaquín; Martínez Abella, Fernando; Puertas Agudo, Jerónimo;** (2005); *"Manual de Conducciones URALITA. Sistemas de conducción en infraestructuras, riego y edificación"*; Ediciones Paraninfo S.A., Madrid; ISBN:9788428328821; pp. 888. <https://www.agapea.com/libros/MANUAL-DE-CONDUCCIONES-URALITA-9788428328821-i.htm>
- 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; ISSN:0925-8574; 24(3); pp. 199-217. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.005>
- Suárez, J.; Puertas, J.; Jácome, A.; Anta, J.; Del Río, H.; Hernáez, D.; Blanco, J.; Arias, R.; Mouriño, N.; Romero, J.L.;** (2008); *"Contaminación en tiempo de lluvia en los sistemas de saneamiento separativo: problemática y soluciones en medio costero"*; I Congreso Internacional Enxeñaría Civil e Territorio Galicia-Norte de Portugal. Vigo, España; pp. 14.
<http://www.geama.org/sanitaria/index.php?o=downloads&i=69>
- Suárez, J.; Puertas, J.; Anta, J.; Jácome, A.; Del Río, H.; Novoa, R.;** (2010); *"Nuevas estrategias de gestión sostenible del agua en medio urbano"*; Spanish Journal of Rural Development; ISBN: 2171-1216; 1(1); pp. 24.
https://www.researchgate.net/profile/Jose-Anta-2/publication/277125692_Nuevas_estrategias_de_gestion_sostenible_del_agua_en_medio_urbano/links/556c43b708aec2268303a517/Nuevas-estrategias-de-gestion-sostenible-del-agua-en-medio-urbano.pdf
- Suárez López, Joaquín;** (2014); *"La contaminación de las escorrentías de autopistas como presión significativa sobre las masas de agua"*; CONAMA 2014. Congreso Nacional de Medio Ambiente; pp. 31.
<http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711524.pdf>
- Suárez López, Joaquín; Jácome Burgos, Alfredo; Anta Álvarez, José; Blanco Menéndez, Jean Pierre; Hernáez Oubiña, David; Del Río Cambeses, Héctor;** (2012); *"Implicaciones sobre la estación depuradora de la gestión de aguas pluviales en los sistemas de saneamiento unitario: estrategias de integración y afecciones sobre los procesos"*; Ingeniería Civil; ISSN:0213-8468;

168; pp. 33-50.
https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/P-033-049.pdf

Sun, J.; Peng, Z.; Zhu, Z.R.; Fu, W.; Dai, X.; Ni, B.J.; (2022); *"The atmospheric microplastics deposition contributes to microplastic pollution in urban waters"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 225(119116); pp. 11.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119116>

Sun, Siao; Bertrand-Krajewski, Jean-Luc; (2012); *"On calibration data selection: The case of stormwater quality regression models"*; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 35; pp. 61-73.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.02.007>

Sun, Siao; Barraud, Sylvie; Castebrunet, Hélène; Aubin, Jean-Baptiste; Marmonier, Pierre; (2015); *"Long-term stormwater quantity and quality analysis using continuous measurements in a French urban catchment"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 85; pp. 432-442.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.054>

T

Taebi, A.; Droste, R.L.; (2004); *"Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 327(1-3); pp. 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.015>

Temprano, J.; Cervigni, M.G.; Suárez, J.; Tejero, I.; (1996); *"Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control en origen"*; Revista de Obras Públicas; ISSN:0034-8619; 3352; pp. 45-57.
<http://hdl.handle.net/10902/2114>

Temprano, J.; Ríos, A.; Jiménez, R.; Suárez, J.; Tejero, I.; (1996); *"Overflow control and treatment systems. Optimization of the storage - sedimentation tank"*; 7th International Conference on Urban Storm Drainage. Hannover, Alemania; pp. 905-910.
<https://www.geama.org/sanitaria/index.php?o=downloads&i=110>

Temprano González, J.; Suárez López, J.; Tejero Monzón, I.; (1998); *"Dimensioning criteria for storm water tanks for Santander. The case of ocean combined sewer overflow discharge"*; European Water Management; ISSN:1461-6971; 1(4); pp. 55-60.
<http://www.dwa.de/dwa/sitemapping.nsf/literaturvorschau?openform&bestandsnr=17892>

- Temprano, J.; Tejero, I.**; (2002); *"Detention Storage Volume for Combined Sewer Overflow into a River"*; Environmental Technology; ISSN: 0959-3330; 23(6); pp. 663-675. <https://doi.org/10.1080/09593332308618381>
- Temprano, J.; Arango, O.; Cagiao, J.; Suárez, J.; Tejero, I.**; (2006); *"Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain"*; Water SA; ISSN:0378-4738; 32(1); pp. 55-63. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v32i1.5240>
- Tirkey, A.; Upadhyay, L. S. B.**; (2021); *"Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics"*; Marine Pollution Bulletin; ISSN:0025-326X; 170(112604); pp. 12. <https://doi.org/unican.idm.oclc.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112604>
- Todeschini, S.; Manenti, S.; Creaco, E.**; (2019); *"Testing an innovative first flush identification methodology against field data from an Italian catchment"*; Journal of Environmental Management; ISSN:0301-4797; 246; pp. 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.007>
- Tran, N. H.; Reinhard, M.; Khan, E.; Chen, H.; Nguyen, V. T.; Li, Y.; ... ; Gin, K. Y. H.**; (2019); *"Emerging contaminants in wastewater, stormwater runoff, and surface water: Application as chemical markers for diffuse sources"*; Science of The Total Environment; ISSN:0048-9697; 676; pp. 252-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.160>
- Trauth, Kathleen M.; Shin, Yee-Sook**; (2005); *"Implementation of the EPA's Water Quality Trading Policy for Storm Water Management and Smart Growth"*; Journal of Urban Planning and Development; ISSN:0733-9488; 131(4); pp. 258-269. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2005\)131:4\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2005)131:4(258))

U

- Unice, K. M.; Weeber, M. P.; Abramson, M. M.; Reid, R. C. D.; Van Gils, J. A. G.; Markus, A. A.; ... ; Panko, J. M.**; (2019); *"Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 646; pp. 1639-1649. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.368>

V

- Vaiškūnaitė, R.; Jasiūnienė, V.;** (2020); *"The analysis of heavy metal pollutants emitted by railway transport"*; Transport; ISSN:1648-4142; 35(2); pp. 213–223. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12751>
- Van Metre, P.C.; Mahler, B.J.;** (2003); *"The contribution of particles washed from rooftops to contaminant loading to urban streams"*; Chemosphere; ISSN:0045-6535; 52(10); pp. 1727–1741. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00454-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00454-5)
- Vanrolleghem, Peter A.; Mannina, Giorgio; Cosenza, Alida; Neumann, Marc B.;** (2015); *"Global sensitivity analysis for urban water quality modelling: Terminology, convergence and comparison of different methods"*; Journal of Hydrology; ISSN:0022-1694; 522; pp. 339-352. https://iris.unipa.it/retrieve/handle/10447/150574/233181/VAnrolleghemetal_J_Hydrology2015pdf.pdf
- Vo, P.T.; Ngo, H.H.; Guo, W.; Zhou, J.L.; Listowski, A.; Du, B.; Wei, Q.; Bui, X.T.;** (2015); *"Stormwater quality management in rail transportation — Past, present and future"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 512-513; pp. 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.072>

W

- Wagner, S.; Hüffer, T.; Klöckner, P.; Wehrhahn, M.; Hofmann, T.; Reemtsma, T.;** (2018); *"Tire wear particles in the aquatic environment - A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 139; pp. 83-100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051>
- Walsh, C. J.; Roy, A. H.; Feminella, J. W.; Cottingham, P. D.; Groffman, P. M.; Morgan, R. P.;** (2005); *"The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure"*; Journal of the North American Benthological Society; ISSN:0887-3593; 24(3); pp. 706–723. <https://doi.org/10.1899/04-028.1>
- Wang, C.; O'Connor, D.; Wang, L.; Wu, W. M.; Luo, J.; Hou, D.;** (2022); *"Microplastics in urban runoff: Global occurrence and fate"*; Water Research; ISSN:0043-1354; 225(119129); pp. 15. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119129>
- Wang, M.; Sun, Y.; Sweetapple, C.;** (2017); *"Optimization of storage tank locations in an urban stormwater drainage system using a two-stage approach"*; Journal of Environmental Management; ISSN:0301-4797; 204; pp. 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.024>

Wang, S.; Feng, L.; Min, F.; (2023); *"Optimizing first flush diverter for urban stormwater pollution load reduction by most efficiently utilizing first flush phenomena"*; Journal of Environmental Management; ISSN:0301-4797; 335(117563); pp. 11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117563>

Wong, Brandon P.; Kerkez, Branko; (2016); *"Adaptive measurements of urban runoff quality"*; Water Resources Research; ISSN:0043-1397; 52(11); pp. 8986–9000. <https://doi.org/10.1002/2015WR018013>

Wu, W. M.; Yang, J.; Criddle, C. S.; (2017); *"Microplastics pollution and reduction strategies"*; Frontiers of Environmental Science & Engineering; ISSN:2095-2201; 11(6); pp. 1-4. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0897-7>

X

Xia, J.; Wang, L.; Yu, J.; Zhan, C.; Zhang, Y.; Qiao, Y.; Wang, Y.; (2018); *"Impact of environmental factors on water quality at multiple spatial scales and its spatial variation in Huai River Basin, China"*; Science China Earth Sciences; ISSN:1674-7313; 61(1); pp. 82-92. <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SCES/61/1/10.1007/s11430-017-9126-3?slug=fulltext>

Y

Yang, Y.; Chui, T.F.M.; (2018); *"Rapid Assessment of Hydrologic Performance of Low Impact Development Practices under Design Storms"*; Journal of the American Water Resources Association; ISSN:1093-474X; 54(3); pp. 613-630. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12637>

Z

Zafra, C.A.; Temprano, J.; Tejero, I.; (2008); *"Particle size distribution of accumulated sediments on an urban road in rainy weather"*; Environmental Technology; ISSN:0959-3330; 29(5); pp. 571-582. <https://doi.org/10.1080/09593330801983532>

Zafra, Carlos; Temprano, Javier; Suárez, Joaquín; (2017); *"A simplified method for determining potential heavy metal loads washed-off by stormwater runoff"*

from road-deposited sediments"; Science of The Total Environment; ISSN:0048-9697; 601-602; pp. 260-270.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.178>

Zafra Mejía, Carlos Alfonso; Temprano González, Javier; Tejero Monzón, Juan Ignacio; (2007); *"Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía"*; Ingeniería e Investigación; ISSN:0120-5609; 27(1); pp. 4-10.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0120-56092007000100001&script=sci_arttext

Zafra Mejía, Carlos Alfonso; Temprano González, Javier; Tejero Monzón, Juan Ignacio; (2009); *"Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía"*; Ingeniería e Investigación; ISSN:0120-5609; 29(1); pp. 101-108.
<http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v29n1/v29n1a13.pdf>

Zawilski, M.; Dzedziela, B.; (2018); *"Stormwater quality modeling in urbanized areas"*; E3S Web of Conferences; ISSN:2267-1242; 45; pp. 8.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500104>

Zeng, J.; Huang, G.; Luo, H.; Mai, Y.; Wu, H.; (2019); *"First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community"*; Scientific Reports; ISSN:2045-2322; 9(1); pp. 9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50467-8>

Zhang, J.; Ding, W.; Zou, G.; Wang, X., Zhao; M., Guo, S.; Chen, Y.; (2023); *"Urban pipeline rainwater runoff is an important pathway for land-based microplastics transport to inland surface water: A case study in Beijing"*; Science of the Total Environment; ISSN:0048-9697; 861(160619); pp. 11.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160619>

Zhao, Q.; Wang, L.; Liu, H.; Zhang, Q.; (2019); *"Runoff and sediment variation and attribution over 60 years in typical Loess Plateau basins"*; Journal of Soils and Sediments; ISSN:1439-0108; 19; pp. 3631-3647.
<https://doi.org/10.1007/s11368-019-02345-z>

Zhu, H.; Xu, Y.; Yan, B.; Guan, J.; (2012); *"Snowmelt Runoff: A New Focus of Urban Nonpoint Source Pollution"*; International Journal of Environmental Research and Public Health; ISSN:1660-4601; 9(12); pp. 4333-4345.
<https://doi.org/10.3390/ijerph9124333>

Zoppou, C.; (2001); *"Review of urban storm water models"*; Environmental Modelling & Software; ISSN:1364-8152; 16(3); pp. 195-231.
[https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)



ANEXOS



ANEXO

A4.1 EJEMPLO DE FICHERO DE DATOS

- 1) FICHERO DE DATOS DETALLANDO LA LLUVIA A SIMULAR DESDE EL PROPIO FICHERO.

FICHERO DE DATOS

Nota: El fichero ASCII que contiene los datos se lo ha denominado "Case1622.inp"

Case1622.inp

```
[TITLE]
;;Project Title/Notes
(DOCTORAL THESIS)
RUNOFF ANALYSIS FOR AN URBAN BASIN OF MIXED USE (RESIDENTIAL-COMMERCIAL)
Case N°1622, 1 ha, 60% Imper., 0.5% Slope
FILE FOR ANALYSIS OF RUNOFF POLLUTION (POLLUTOGRAPHS AND CRITICAL LOADS)
DETERMINATION OF CRITICAL CONTAMINATION CONDITIONS
AUGUST 2018
```

```
[OPTIONS]
;;Option      Value
FLOW_UNITS    CFS
INFILTRATION  HORTON
FLOW_ROUTING  KINWAVE
LINK_OFFSETS  DEPTH
MIN_SLOPE     0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO
```

```
START_DATE    08/15/2018
START_TIME    00:00:00
REPORT_START_DATE 08/15/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE      08/15/2018
END_TIME      06:00:00
SWEEP_START   01/01
SWEEP_END     12/31
DRY_DAYS      7
REPORT_STEP   00:01:00
WET_STEP      00:01:00
DRY_STEP      01:00:00
ROUTING_STEP  0:01:00
RULE_STEP     00:00:00
```

```
INERTIAL_DAMPING PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION H-W
VARIABLE_STEP    0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     12.557
MAX_TRIALS        8
HEAD_TOLERANCE    0.005
SYS_FLOW_TOL      5
LAT_FLOW_TOL      5
MINIMUM_STEP      0.5
THREADS           1
```

```
[FILES]
;;Interfacing Files
```

SAVE OUTFLOWS "Outflows.txt"

[EVAPORATION]

;;Data Source Parameters

;;-----

MONTHLY 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.148 0.0 0.0 0.0 0.0

DRY_ONLY NO

[RAINGAGES]

;;Name Format Interval SCF Source

;;-----

Rain INTENSITY 0:01 1.0 TIMESERIES I140D4

[SUBCATCHMENTS]

;;Name Rain Gage Outlet Area %Imperv Width %Slope CurbLen SnowPack

;;-----

Basin Rain Basin 2.471 60 328 0.5 23.83467

[SUBAREAS]

;;Subcatchment N-Imperv N-Perv S-Imperv S-Perv PctZero RouteTo PctRouted

;;-----

Basin 0.00479 0.4 0.042554 0.25 25 OUTLET

[INFILTRATION]

;;Subcatchment MaxRate MinRate Decay DryTime MaxInfil

;;-----

Basin 1.4173 0.1512 0.00116 7 0

[POLLUTANTS]

;;Name Units Crain Cgw Crdii Kdecay SnowOnly Co-Pollutant Co-Frac Cdwf Cinit

;;-----

BOD5 MG/L 0.0 0.0 0.0 0 NO TS 0.00503 0.0 0.0

TS MG/L 0.0 0.0 0.0 0 NO * 0.0 0.0 0

TN MG/L 0.0 0.0 0.0 0 NO TS 0.00048 0.0 0.0

[LANDUSES]

;; Sweeping Fraction Last

;;Name Interval Available Swept

;;-----

Urban 0 0 0

[COVERAGES]

;;Subcatchment Land Use Percent

;;-----

Basin Urban 100

[LOADINGS]

;;Subcatchment Pollutant Buildup

;;-----

[BUILDUP]

;;Land Use Pollutant Function Coeff1 Coeff2 Coeff3 Per Unit

;;-----

Urban BOD5 NONE 0 0 0 CURB

Urban TS EXP 13.257 1 0 CURB

Urban TN NONE 0 0 0 CURB

[WASHOFF]

;;Land Use Pollutant Function Coeff1 Coeff2 SweepRmvl BmpRmvl

;;-----

Urban BOD5 EXP 2 0.84 0 0

Urban TS EXP 2 0.84 0 0

Urban TN EXP 2 0.84 0 0

[TIMESERIES]

;;Name Date Time Value

;;-----

;Rain I = 10 mm/h, D = 80 min

I10D80 08/15/2018 0:00 0.393701

I10D80 08/15/2018 0:01 0.393701

I10D80 08/15/2018 0:02 0.393701

I10D80 08/15/2018 0:03 0.393701

I10D80 08/15/2018 0:04 0.393701

I10D80 08/15/2018 0:05 0.393701

I10D80	08/15/2018 0:06	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:07	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:08	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:09	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:10	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:11	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:12	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:13	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:14	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:15	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:16	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:17	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:18	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:19	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:20	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:21	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:22	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:23	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:24	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:25	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:26	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:27	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:28	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:29	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:30	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:31	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:32	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:33	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:34	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:35	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:36	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:37	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:38	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:39	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:40	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:41	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:42	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:43	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:44	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:45	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:46	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:47	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:48	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:49	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:50	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:51	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:52	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:53	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:54	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:55	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:56	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:57	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:58	0.393701
I10D80	08/15/2018 0:59	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:00	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:01	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:02	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:03	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:04	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:05	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:06	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:07	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:08	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:09	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:10	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:11	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:12	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:13	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:14	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:15	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:16	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:17	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:18	0.393701
I10D80	08/15/2018 1:19	0.393701

I10D80 08/15/2018 1:20 0.393701

;

;Rain I = 3 mm/h, D = 300 min

I3D300 08/15/2018 0:00 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:01 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:02 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:03 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:04 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:05 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:06 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:07 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:08 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:09 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:10 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:11 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:12 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:13 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:14 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:15 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:16 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:17 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:18 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:19 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:20 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:21 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:22 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:23 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:24 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:25 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:26 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:27 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:28 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:29 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:30 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:31 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:32 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:33 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:34 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:35 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:36 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:37 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:38 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:39 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:40 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:41 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:42 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:43 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:44 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:45 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:46 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:47 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:48 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:49 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:50 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:51 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:52 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:53 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:54 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:55 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:56 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:57 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:58 0.11811

I3D300 08/15/2018 0:59 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:00 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:01 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:02 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:03 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:04 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:05 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:06 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:07 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:08 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:09 0.11811

I3D300 08/15/2018 1:10 0.11811

I3D300	08/15/2018 1:11	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:12	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:13	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:14	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:15	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:16	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:17	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:18	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:19	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:20	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:21	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:22	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:23	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:24	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:25	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:26	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:27	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:28	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:29	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:30	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:31	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:32	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:33	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:34	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:35	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:36	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:37	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:38	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:39	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:40	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:41	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:42	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:43	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:44	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:45	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:46	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:47	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:48	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:49	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:50	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:51	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:52	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:53	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:54	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:55	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:56	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:57	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:58	0.11811
I3D300	08/15/2018 1:59	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:00	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:01	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:02	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:03	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:04	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:05	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:06	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:07	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:08	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:09	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:10	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:11	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:12	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:13	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:14	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:15	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:16	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:17	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:18	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:19	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:20	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:21	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:22	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:23	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:24	0.11811

I3D300	08/15/2018 2:25	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:26	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:27	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:28	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:29	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:30	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:31	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:32	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:33	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:34	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:35	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:36	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:37	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:38	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:39	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:40	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:41	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:42	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:43	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:44	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:45	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:46	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:47	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:48	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:49	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:50	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:51	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:52	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:53	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:54	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:55	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:56	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:57	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:58	0.11811
I3D300	08/15/2018 2:59	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:00	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:01	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:02	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:03	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:04	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:05	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:06	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:07	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:08	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:09	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:10	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:11	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:12	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:13	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:14	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:15	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:16	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:17	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:18	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:19	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:20	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:21	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:22	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:23	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:24	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:25	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:26	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:27	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:28	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:29	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:30	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:31	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:32	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:33	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:34	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:35	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:36	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:37	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:38	0.11811

I3D300	08/15/2018 3:39	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:40	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:41	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:42	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:43	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:44	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:45	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:46	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:47	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:48	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:49	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:50	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:51	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:52	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:53	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:54	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:55	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:56	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:57	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:58	0.11811
I3D300	08/15/2018 3:59	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:00	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:01	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:02	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:03	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:04	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:05	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:06	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:07	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:08	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:09	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:10	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:11	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:12	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:13	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:14	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:15	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:16	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:17	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:18	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:19	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:20	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:21	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:22	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:23	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:24	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:25	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:26	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:27	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:28	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:29	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:30	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:31	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:32	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:33	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:34	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:35	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:36	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:37	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:38	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:39	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:40	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:41	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:42	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:43	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:44	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:45	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:46	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:47	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:48	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:49	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:50	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:51	0.11811
I3D300	08/15/2018 4:52	0.11811

```
I3D300      08/15/2018 4:53    0.11811
I3D300      08/15/2018 4:54    0.11811
I3D300      08/15/2018 4:55    0.11811
I3D300      08/15/2018 4:56    0.11811
I3D300      08/15/2018 4:57    0.11811
I3D300      08/15/2018 4:58    0.11811
I3D300      08/15/2018 4:59    0.11811
I3D300      08/15/2018 5:00    0.11811
```

```
;
```

```
;Rain I = 140 mm/h, D = 4 min
```

```
I140D4      08/15/2018 0:00    5.51181
I140D4      08/15/2018 0:01    5.51181
I140D4      08/15/2018 0:02    5.51181
I140D4      08/15/2018 0:03    5.51181
I140D4      08/15/2018 0:04    5.51181
```

```
[REPORT]
```

```
::Reporting Options
```

```
INPUT      YES
```

```
CONTROLS   YES
```

```
AVERAGES   YES
```

```
SUBCATCHMENTS Basin
```

```
NODES NONE
```

```
LINKS NONE
```

```
[TAGS]
```

```
[MAP]
```

```
DIMENSIONS -3132.653 4758.813 1704.082 9452.690
```

```
Units      None
```

```
[COORDINATES]
```

```
::Node      X-Coord      Y-Coord
```

```
::-----
```

```
[VERTICES]
```

```
::Link      X-Coord      Y-Coord
```

```
::-----
```

```
[Polygons]
```

```
::Subcatchment X-Coord      Y-Coord
```

```
::-----
```

```
Basin      -2698.357      5731.602
```

```
Basin      1550.251      5750.155
```

```
Basin      1476.040      8792.827
```

```
Basin      -2846.780      8774.274
```

```
[SYMBOLS]
```

```
::Gage      X-Coord      Y-Coord
```

```
::-----
```

```
Rain      -748.361      9231.200
```

En este fichero la lluvia a simular se detalla en el apartado [RAINGAGES] y sus datos se encuentran en el apartado [TIMESERIES] del fichero. En concreto se simula una lluvia con un hietograma rectangular de una Intensidad $I = 140$ mm/h y una duración $D = 4$ min (I140D4).



- 2) FICHERO DE DATOS DETALLANDO LA LLUVIA A SIMULAR CON LA AYUDA DE UN FICHERO ADICIONAL. LA LECTURA DE LOS DATOS DE LA LLUVIA SE HACE DESDE EL FICHERO DE DATOS DE ENTRADA MEDIANTE UNA "LLAMADA" AL FICHERO ADICIONAL.

FICHERO DE DATOS

Nota: El fichero ASCII que contiene los datos de entrada se ha denominado "Case1622.inp" y el fichero de datos de la/s lluvia/s (hietograma/s rectangular/es) se ha denominado "Rains.dat".

Case1622.inp

```
[TITLE]
;;Project Title/Notes
(DOCTORAL THESIS)
RUNOFF ANALYSIS FOR AN URBAN BASIN OF MIXED USE (RESIDENTIAL-COMMERCIAL)
Case Nº1622, 1 ha, 60% Imper., 0,5% Slope
FILE FOR ANALYSIS OF RUNOFF POLLUTION (POLLUTOGRAPHS AND CRITICAL LOADS)
DETERMINATION OF CRITICAL CONTAMINATION CONDITIONS
AUGUST 2018

[OPTIONS]
;;Option      Value
FLOW_UNITS    CFS
INFILTRATION  HORTON
FLOW_ROUTING  KINWAVE
LINK_OFFSETS  DEPTH
MIN_SLOPE     0
ALLOW_PONDING NO
SKIP_STEADY_STATE NO

START_DATE    08/15/2018
START_TIME    00:00:00
REPORT_START_DATE 08/15/2018
REPORT_START_TIME 00:00:00
END_DATE      08/15/2018
END_TIME      06:00:00
SWEEP_START   01/01
SWEEP_END     12/31
DRY_DAYS      7
REPORT_STEP   00:01:00
WET_STEP      00:01:00
DRY_STEP      01:00:00
ROUTING_STEP  0:01:00
RULE_STEP     00:00:00

INERTIAL_DAMPING  PARTIAL
NORMAL_FLOW_LIMITED BOTH
FORCE_MAIN_EQUATION H-W
VARIABLE_STEP    0.75
LENGTHENING_STEP 0
MIN_SURFAREA     12.557
MAX_TRIALS       8
HEAD_TOLERANCE   0.005
SYS_FLOW_TOL     5
LAT_FLOW_TOL     5
MINIMUM_STEP     0.5
THREADS          1

[FILES]
;;Interfacing Files
SAVE OUTFLOWS "Outflows.txt"

[EVAPORATION]
;;Data Source  Parameters
;;-----
MONTHLY        0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.148  0.0  0.0  0.0  0.0
```

DRY_ONLY NO

[RAINGAGES]

```
;;Name      Format  Interval SCF  Source
-----
Rain        INTENSITY 0:01  1.0  FILE  "Rains.dat"  I140D4  IN
```

[SUBCATCHMENTS]

```
;;Name      Rain Gage      Outlet      Area  %Imperv  Width  %Slope  CurbLen  SnowPack
-----
Basin       Rain          Basin      2.471  60  328  0.5  23.83467
```

[SUBAREAS]

```
;;Subcatchment N-Imperv N-Perv S-Imperv S-Perv PctZero RouteTo PctRouted
-----
Basin          0.00479  0.4  0.042554  0.25  25  OUTLET
```

[INFILTRATION]

```
;;Subcatchment MaxRate  MinRate  Decay  DryTime  MaxInfil
-----
Basin          1.4173  0.1512  0.00116  7  0
```

[POLLUTANTS]

```
;;Name      Units  Crain  Cgw  Crdii  Kdecay  SnowOnly  Co-Pollutant  Co-Frac  Cdwf  Cinit
-----
BOD5        MG/L  0.0  0.0  0.0  0  NO  TS  0.00503  0.0  0.0
TS           MG/L  0.0  0.0  0.0  0  NO  *  0.0  0.0  0
TN           MG/L  0.0  0.0  0.0  0  NO  TS  0.00048  0.0  0.0
```

[LANDUSES]

```
;;          Sweeping Fraction Last
;;Name      Interval Available Swept
-----
Urban       0  0  0
```

[COVERAGES]

```
;;Subcatchment Land Use      Percent
-----
Basin          Urban        100
```

[LOADINGS]

```
;;Subcatchment Pollutant      Buildup
-----
```

[BUILDUP]

```
;;Land Use  Pollutant      Function  Coeff1  Coeff2  Coeff3  Per Unit
-----
Urban       BOD5          NONE  0  0  0  CURB
Urban       TS            EXP  13.257  1  0  CURB
Urban       TN            NONE  0  0  0  CURB
```

[WASHOFF]

```
;;Land Use  Pollutant      Function  Coeff1  Coeff2  SweepRmvl BmpRmvl
-----
Urban       BOD5          EXP  2  0.84  0  0
Urban       TS            EXP  2  0.84  0  0
Urban       TN            EXP  2  0.84  0  0
```

[REPORT]

```
;;Reporting Options
INPUT  YES
CONTROLS  YES
AVERAGES  YES
SUBCATCHMENTS Basin
NODES NONE
LINKS NONE
```

[TAGS]

[MAP]

```
DIMENSIONS -3132.653 4758.813 1704.082 9452.690
Units  None
```

[COORDINATES]

```

;;Node      X-Coord      Y-Coord
;;-----
[VERTICES]
;;Link      X-Coord      Y-Coord
;;-----

[Polygons]
;;Subcatchment X-Coord      Y-Coord
;;-----
Basin        -2698.357      5731.602
Basin        1550.251      5750.155
Basin        1476.040      8792.827
Basin        -2846.780      8774.274

[SYMBOLS]
;;Gage      X-Coord      Y-Coord
;;-----
Rain        -748.361      9231.200

```

En este fichero en el apartado [RAINGAGES] se detalla el nombre del fichero adicional “Rains.dat” de donde se leerán los datos de la lluvia I140D4 a simular. En la página siguiente se detalla el contenido del fichero adicional.

No obstante, se detallan solos datos para la lluvia de Intensidad $I = 1$ mm/h y todas las duraciones D (min): 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 50, 80, 120, 180, 240, 300. No se detallan los datos de todas las intensidades puesto que la serie es muy larga y ocuparía muchas páginas.

El fichero Rains.dat deberá tener todos los datos de las intensidades de la matriz de lluvias, es decir: I (mm/h): 1, 3, 5, 7, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 300

Rains.dat

I1D2	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D2	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D2	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D4	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D4	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D4	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D4	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D4	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D6	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D6	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D6	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D6	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D6	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D6	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D6	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D8	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	09	0.039370
I1D10	2018	8	15	0	10	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	09	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	10	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	11	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	12	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	13	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	14	0.039370
I1D15	2018	8	15	0	15	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	09	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	10	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	11	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	12	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	13	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	14	0.039370
I1D20	2018	8	15	0	15	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	09	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	10	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	11	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	12	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	13	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	14	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	15	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	16	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	17	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	18	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	19	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	20	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	21	0.039370

I1D25	2018	8	15	0	22	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	23	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	24	0.039370
I1D25	2018	8	15	0	25	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	09	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	10	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	11	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	12	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	13	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	14	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	15	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	16	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	17	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	18	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	19	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	20	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	21	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	22	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	23	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	24	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	25	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	26	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	27	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	28	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	29	0.039370
I1D30	2018	8	15	0	30	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	09	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	10	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	11	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	12	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	13	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	14	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	15	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	16	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	17	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	18	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	19	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	20	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	21	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	22	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	23	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	24	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	25	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	26	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	27	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	28	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	29	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	30	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	31	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	32	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	33	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	34	0.039370
I1D35	2018	8	15	0	35	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	00	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	01	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	02	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	03	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	04	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	05	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	06	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	07	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	08	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	09	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	10	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	11	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	12	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	13	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	14	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	15	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	16	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	17	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	18	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	19	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	20	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	21	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	22	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	23	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	24	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	25	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	26	0.039370
I1D50	2018	8	15	0	27	0.039370

IID50	2018	8	15	0	28	0.039370
IID50	2018	8	15	0	29	0.039370
IID50	2018	8	15	0	30	0.039370
IID50	2018	8	15	0	31	0.039370
IID50	2018	8	15	0	32	0.039370
IID50	2018	8	15	0	33	0.039370
IID50	2018	8	15	0	34	0.039370
IID50	2018	8	15	0	35	0.039370
IID50	2018	8	15	0	36	0.039370
IID50	2018	8	15	0	37	0.039370
IID50	2018	8	15	0	38	0.039370
IID50	2018	8	15	0	39	0.039370
IID50	2018	8	15	0	40	0.039370
IID50	2018	8	15	0	41	0.039370
IID50	2018	8	15	0	42	0.039370
IID50	2018	8	15	0	43	0.039370
IID50	2018	8	15	0	44	0.039370
IID50	2018	8	15	0	45	0.039370
IID50	2018	8	15	0	46	0.039370
IID50	2018	8	15	0	47	0.039370
IID50	2018	8	15	0	48	0.039370
IID50	2018	8	15	0	49	0.039370
IID50	2018	8	15	0	50	0.039370
IID80	2018	8	15	0	00	0.039370
IID80	2018	8	15	0	01	0.039370
IID80	2018	8	15	0	02	0.039370
IID80	2018	8	15	0	03	0.039370
IID80	2018	8	15	0	04	0.039370
IID80	2018	8	15	0	05	0.039370
IID80	2018	8	15	0	06	0.039370
IID80	2018	8	15	0	07	0.039370
IID80	2018	8	15	0	08	0.039370
IID80	2018	8	15	0	09	0.039370
IID80	2018	8	15	0	10	0.039370
IID80	2018	8	15	0	11	0.039370
IID80	2018	8	15	0	12	0.039370
IID80	2018	8	15	0	13	0.039370
IID80	2018	8	15	0	14	0.039370
IID80	2018	8	15	0	15	0.039370
IID80	2018	8	15	0	16	0.039370
IID80	2018	8	15	0	17	0.039370
IID80	2018	8	15	0	18	0.039370
IID80	2018	8	15	0	19	0.039370
IID80	2018	8	15	0	20	0.039370
IID80	2018	8	15	0	21	0.039370
IID80	2018	8	15	0	22	0.039370
IID80	2018	8	15	0	23	0.039370
IID80	2018	8	15	0	24	0.039370
IID80	2018	8	15	0	25	0.039370
IID80	2018	8	15	0	26	0.039370
IID80	2018	8	15	0	27	0.039370
IID80	2018	8	15	0	28	0.039370
IID80	2018	8	15	0	29	0.039370
IID80	2018	8	15	0	30	0.039370
IID80	2018	8	15	0	31	0.039370
IID80	2018	8	15	0	32	0.039370
IID80	2018	8	15	0	33	0.039370
IID80	2018	8	15	0	34	0.039370
IID80	2018	8	15	0	35	0.039370
IID80	2018	8	15	0	36	0.039370
IID80	2018	8	15	0	37	0.039370
IID80	2018	8	15	0	38	0.039370
IID80	2018	8	15	0	39	0.039370
IID80	2018	8	15	0	40	0.039370
IID80	2018	8	15	0	41	0.039370
IID80	2018	8	15	0	42	0.039370
IID80	2018	8	15	0	43	0.039370
IID80	2018	8	15	0	44	0.039370
IID80	2018	8	15	0	45	0.039370
IID80	2018	8	15	0	46	0.039370
IID80	2018	8	15	0	47	0.039370
IID80	2018	8	15	0	48	0.039370
IID80	2018	8	15	0	49	0.039370
IID80	2018	8	15	0	50	0.039370
IID80	2018	8	15	0	51	0.039370
IID80	2018	8	15	0	52	0.039370
IID80	2018	8	15	0	53	0.039370
IID80	2018	8	15	0	54	0.039370
IID80	2018	8	15	0	55	0.039370
IID80	2018	8	15	0	56	0.039370
IID80	2018	8	15	0	57	0.039370
IID80	2018	8	15	0	58	0.039370
IID80	2018	8	15	0	59	0.039370
IID80	2018	8	15	1	00	0.039370
IID80	2018	8	15	1	01	0.039370
IID80	2018	8	15	1	02	0.039370
IID80	2018	8	15	1	03	0.039370
IID80	2018	8	15	1	04	0.039370
IID80	2018	8	15	1	05	0.039370
IID80	2018	8	15	1	06	0.039370
IID80	2018	8	15	1	07	0.039370
IID80	2018	8	15	1	08	0.039370
IID80	2018	8	15	1	09	0.039370
IID80	2018	8	15	1	10	0.039370
IID80	2018	8	15	1	11	0.039370
IID80	2018	8	15	1	12	0.039370
IID80	2018	8	15	1	13	0.039370
IID80	2018	8	15	1	14	0.039370
IID80	2018	8	15	1	15	0.039370

IID80	2018	8	15	1	16	0.039370
IID80	2018	8	15	1	17	0.039370
IID80	2018	8	15	1	18	0.039370
IID80	2018	8	15	1	19	0.039370
IID80	2018	8	15	1	20	0.039370
IID120	2018	8	15	0	00	0.039370
IID120	2018	8	15	0	01	0.039370
IID120	2018	8	15	0	02	0.039370
IID120	2018	8	15	0	03	0.039370
IID120	2018	8	15	0	04	0.039370
IID120	2018	8	15	0	05	0.039370
IID120	2018	8	15	0	06	0.039370
IID120	2018	8	15	0	07	0.039370
IID120	2018	8	15	0	08	0.039370
IID120	2018	8	15	0	09	0.039370
IID120	2018	8	15	0	10	0.039370
IID120	2018	8	15	0	11	0.039370
IID120	2018	8	15	0	12	0.039370
IID120	2018	8	15	0	13	0.039370
IID120	2018	8	15	0	14	0.039370
IID120	2018	8	15	0	15	0.039370
IID120	2018	8	15	0	16	0.039370
IID120	2018	8	15	0	17	0.039370
IID120	2018	8	15	0	18	0.039370
IID120	2018	8	15	0	19	0.039370
IID120	2018	8	15	0	20	0.039370
IID120	2018	8	15	0	21	0.039370
IID120	2018	8	15	0	22	0.039370
IID120	2018	8	15	0	23	0.039370
IID120	2018	8	15	0	24	0.039370
IID120	2018	8	15	0	25	0.039370
IID120	2018	8	15	0	26	0.039370
IID120	2018	8	15	0	27	0.039370
IID120	2018	8	15	0	28	0.039370
IID120	2018	8	15	0	29	0.039370
IID120	2018	8	15	0	30	0.039370
IID120	2018	8	15	0	31	0.039370
IID120	2018	8	15	0	32	0.039370
IID120	2018	8	15	0	33	0.039370
IID120	2018	8	15	0	34	0.039370
IID120	2018	8	15	0	35	0.039370
IID120	2018	8	15	0	36	0.039370
IID120	2018	8	15	0	37	0.039370
IID120	2018	8	15	0	38	0.039370
IID120	2018	8	15	0	39	0.039370
IID120	2018	8	15	0	40	0.039370
IID120	2018	8	15	0	41	0.039370
IID120	2018	8	15	0	42	0.039370
IID120	2018	8	15	0	43	0.039370
IID120	2018	8	15	0	44	0.039370
IID120	2018	8	15	0	45	0.039370
IID120	2018	8	15	0	46	0.039370
IID120	2018	8	15	0	47	0.039370
IID120	2018	8	15	0	48	0.039370
IID120	2018	8	15	0	49	0.039370
IID120	2018	8	15	0	50	0.039370
IID120	2018	8	15	0	51	0.039370
IID120	2018	8	15	0	52	0.039370
IID120	2018	8	15	0	53	0.039370
IID120	2018	8	15	0	54	0.039370
IID120	2018	8	15	0	55	0.039370
IID120	2018	8	15	0	56	0.039370
IID120	2018	8	15	0	57	0.039370
IID120	2018	8	15	0	58	0.039370
IID120	2018	8	15	0	59	0.039370
IID120	2018	8	15	1	00	0.039370
IID120	2018	8	15	1	01	0.039370
IID120	2018	8	15	1	02	0.039370
IID120	2018	8	15	1	03	0.039370
IID120	2018	8	15	1	04	0.039370
IID120	2018	8	15	1	05	0.039370
IID120	2018	8	15	1	06	0.039370
IID120	2018	8	15	1	07	0.039370
IID120	2018	8	15	1	08	0.039370
IID120	2018	8	15	1	09	0.039370
IID120	2018	8	15	1	10	0.039370
IID120	2018	8	15	1	11	0.039370
IID120	2018	8	15	1	12	0.039370
IID120	2018	8	15	1	13	0.039370
IID120	2018	8	15	1	14	0.039370
IID120	2018	8	15	1	15	0.039370
IID120	2018	8	15	1	16	0.039370
IID120	2018	8	15	1	17	0.039370
IID120	2018	8	15	1	18	0.039370
IID120	2018	8	15	1	19	0.039370
IID120	2018	8	15	1	20	0.039370
IID120	2018	8	15	1	21	0.039370
IID120	2018	8	15	1	22	0.039370
IID120	2018	8	15	1	23	0.039370
IID120	2018	8	15	1	24	0.039370
IID120	2018	8	15	1	25	0.039370
IID120	2018	8	15	1	26	0.039370
IID120	2018	8	15	1	27	0.039370
IID120	2018	8	15	1	28	0.039370
IID120	2018	8	15	1	29	0.039370
IID120	2018	8	15	1	30	0.039370
IID120	2018	8	15	1	31	0.039370
IID120	2018	8	15	1	32	0.039370
IID120	2018	8	15	1	33	0.039370

IID120	2018	8	15	1	34	0.039370
IID120	2018	8	15	1	35	0.039370
IID120	2018	8	15	1	36	0.039370
IID120	2018	8	15	1	37	0.039370
IID120	2018	8	15	1	38	0.039370
IID120	2018	8	15	1	39	0.039370
IID120	2018	8	15	1	40	0.039370
IID120	2018	8	15	1	41	0.039370
IID120	2018	8	15	1	42	0.039370
IID120	2018	8	15	1	43	0.039370
IID120	2018	8	15	1	44	0.039370
IID120	2018	8	15	1	45	0.039370
IID120	2018	8	15	1	46	0.039370
IID120	2018	8	15	1	47	0.039370
IID120	2018	8	15	1	48	0.039370
IID120	2018	8	15	1	49	0.039370
IID120	2018	8	15	1	50	0.039370
IID120	2018	8	15	1	51	0.039370
IID120	2018	8	15	1	52	0.039370
IID120	2018	8	15	1	53	0.039370
IID120	2018	8	15	1	54	0.039370
IID120	2018	8	15	1	55	0.039370
IID120	2018	8	15	1	56	0.039370
IID120	2018	8	15	1	57	0.039370
IID120	2018	8	15	1	58	0.039370
IID120	2018	8	15	1	59	0.039370
IID120	2018	8	15	2	00	0.039370
IID180	2018	8	15	0	00	0.039370
IID180	2018	8	15	0	01	0.039370
IID180	2018	8	15	0	02	0.039370
IID180	2018	8	15	0	03	0.039370
IID180	2018	8	15	0	04	0.039370
IID180	2018	8	15	0	05	0.039370
IID180	2018	8	15	0	06	0.039370
IID180	2018	8	15	0	07	0.039370
IID180	2018	8	15	0	08	0.039370
IID180	2018	8	15	0	09	0.039370
IID180	2018	8	15	0	10	0.039370
IID180	2018	8	15	0	11	0.039370
IID180	2018	8	15	0	12	0.039370
IID180	2018	8	15	0	13	0.039370
IID180	2018	8	15	0	14	0.039370
IID180	2018	8	15	0	15	0.039370
IID180	2018	8	15	0	16	0.039370
IID180	2018	8	15	0	17	0.039370
IID180	2018	8	15	0	18	0.039370
IID180	2018	8	15	0	19	0.039370
IID180	2018	8	15	0	20	0.039370
IID180	2018	8	15	0	21	0.039370
IID180	2018	8	15	0	22	0.039370
IID180	2018	8	15	0	23	0.039370
IID180	2018	8	15	0	24	0.039370
IID180	2018	8	15	0	25	0.039370
IID180	2018	8	15	0	26	0.039370
IID180	2018	8	15	0	27	0.039370
IID180	2018	8	15	0	28	0.039370
IID180	2018	8	15	0	29	0.039370
IID180	2018	8	15	0	30	0.039370
IID180	2018	8	15	0	31	0.039370
IID180	2018	8	15	0	32	0.039370
IID180	2018	8	15	0	33	0.039370
IID180	2018	8	15	0	34	0.039370
IID180	2018	8	15	0	35	0.039370
IID180	2018	8	15	0	36	0.039370
IID180	2018	8	15	0	37	0.039370
IID180	2018	8	15	0	38	0.039370
IID180	2018	8	15	0	39	0.039370
IID180	2018	8	15	0	40	0.039370
IID180	2018	8	15	0	41	0.039370
IID180	2018	8	15	0	42	0.039370
IID180	2018	8	15	0	43	0.039370
IID180	2018	8	15	0	44	0.039370
IID180	2018	8	15	0	45	0.039370
IID180	2018	8	15	0	46	0.039370
IID180	2018	8	15	0	47	0.039370
IID180	2018	8	15	0	48	0.039370
IID180	2018	8	15	0	49	0.039370
IID180	2018	8	15	0	50	0.039370
IID180	2018	8	15	0	51	0.039370
IID180	2018	8	15	0	52	0.039370
IID180	2018	8	15	0	53	0.039370
IID180	2018	8	15	0	54	0.039370
IID180	2018	8	15	0	55	0.039370
IID180	2018	8	15	0	56	0.039370
IID180	2018	8	15	0	57	0.039370
IID180	2018	8	15	0	58	0.039370
IID180	2018	8	15	0	59	0.039370
IID180	2018	8	15	1	00	0.039370
IID180	2018	8	15	1	01	0.039370
IID180	2018	8	15	1	02	0.039370
IID180	2018	8	15	1	03	0.039370
IID180	2018	8	15	1	04	0.039370
IID180	2018	8	15	1	05	0.039370
IID180	2018	8	15	1	06	0.039370
IID180	2018	8	15	1	07	0.039370
IID180	2018	8	15	1	08	0.039370
IID180	2018	8	15	1	09	0.039370
IID180	2018	8	15	1	10	0.039370
IID180	2018	8	15	1	11	0.039370

IID180	2018	8	15	1	12	0.039370
IID180	2018	8	15	1	13	0.039370
IID180	2018	8	15	1	14	0.039370
IID180	2018	8	15	1	15	0.039370
IID180	2018	8	15	1	16	0.039370
IID180	2018	8	15	1	17	0.039370
IID180	2018	8	15	1	18	0.039370
IID180	2018	8	15	1	19	0.039370
IID180	2018	8	15	1	20	0.039370
IID180	2018	8	15	1	21	0.039370
IID180	2018	8	15	1	22	0.039370
IID180	2018	8	15	1	23	0.039370
IID180	2018	8	15	1	24	0.039370
IID180	2018	8	15	1	25	0.039370
IID180	2018	8	15	1	26	0.039370
IID180	2018	8	15	1	27	0.039370
IID180	2018	8	15	1	28	0.039370
IID180	2018	8	15	1	29	0.039370
IID180	2018	8	15	1	30	0.039370
IID180	2018	8	15	1	31	0.039370
IID180	2018	8	15	1	32	0.039370
IID180	2018	8	15	1	33	0.039370
IID180	2018	8	15	1	34	0.039370
IID180	2018	8	15	1	35	0.039370
IID180	2018	8	15	1	36	0.039370
IID180	2018	8	15	1	37	0.039370
IID180	2018	8	15	1	38	0.039370
IID180	2018	8	15	1	39	0.039370
IID180	2018	8	15	1	40	0.039370
IID180	2018	8	15	1	41	0.039370
IID180	2018	8	15	1	42	0.039370
IID180	2018	8	15	1	43	0.039370
IID180	2018	8	15	1	44	0.039370
IID180	2018	8	15	1	45	0.039370
IID180	2018	8	15	1	46	0.039370
IID180	2018	8	15	1	47	0.039370
IID180	2018	8	15	1	48	0.039370
IID180	2018	8	15	1	49	0.039370
IID180	2018	8	15	1	50	0.039370
IID180	2018	8	15	1	51	0.039370
IID180	2018	8	15	1	52	0.039370
IID180	2018	8	15	1	53	0.039370
IID180	2018	8	15	1	54	0.039370
IID180	2018	8	15	1	55	0.039370
IID180	2018	8	15	1	56	0.039370
IID180	2018	8	15	1	57	0.039370
IID180	2018	8	15	1	58	0.039370
IID180	2018	8	15	1	59	0.039370
IID180	2018	8	15	2	00	0.039370
IID180	2018	8	15	2	01	0.039370
IID180	2018	8	15	2	02	0.039370
IID180	2018	8	15	2	03	0.039370
IID180	2018	8	15	2	04	0.039370
IID180	2018	8	15	2	05	0.039370
IID180	2018	8	15	2	06	0.039370
IID180	2018	8	15	2	07	0.039370
IID180	2018	8	15	2	08	0.039370
IID180	2018	8	15	2	09	0.039370
IID180	2018	8	15	2	10	0.039370
IID180	2018	8	15	2	11	0.039370
IID180	2018	8	15	2	12	0.039370
IID180	2018	8	15	2	13	0.039370
IID180	2018	8	15	2	14	0.039370
IID180	2018	8	15	2	15	0.039370
IID180	2018	8	15	2	16	0.039370
IID180	2018	8	15	2	17	0.039370
IID180	2018	8	15	2	18	0.039370
IID180	2018	8	15	2	19	0.039370
IID180	2018	8	15	2	20	0.039370
IID180	2018	8	15	2	21	0.039370
IID180	2018	8	15	2	22	0.039370
IID180	2018	8	15	2	23	0.039370
IID180	2018	8	15	2	24	0.039370
IID180	2018	8	15	2	25	0.039370
IID180	2018	8	15	2	26	0.039370
IID180	2018	8	15	2	27	0.039370
IID180	2018	8	15	2	28	0.039370
IID180	2018	8	15	2	29	0.039370
IID180	2018	8	15	2	30	0.039370
IID180	2018	8	15	2	31	0.039370
IID180	2018	8	15	2	32	0.039370
IID180	2018	8	15	2	33	0.039370
IID180	2018	8	15	2	34	0.039370
IID180	2018	8	15	2	35	0.039370
IID180	2018	8	15	2	36	0.039370
IID180	2018	8	15	2	37	0.039370
IID180	2018	8	15	2	38	0.039370
IID180	2018	8	15	2	39	0.039370
IID180	2018	8	15	2	40	0.039370
IID180	2018	8	15	2	41	0.039370
IID180	2018	8	15	2	42	0.039370
IID180	2018	8	15	2	43	0.039370
IID180	2018	8	15	2	44	0.039370
IID180	2018	8	15	2	45	0.039370
IID180	2018	8	15	2	46	0.039370
IID180	2018	8	15	2	47	0.039370
IID180	2018	8	15	2	48	0.039370
IID180	2018	8	15	2	49	0.039370
IID180	2018	8	15	2	50	0.039370

IID180	2018	8	15	2	51	0.039370
IID180	2018	8	15	2	52	0.039370
IID180	2018	8	15	2	53	0.039370
IID180	2018	8	15	2	54	0.039370
IID180	2018	8	15	2	55	0.039370
IID180	2018	8	15	2	56	0.039370
IID180	2018	8	15	2	57	0.039370
IID180	2018	8	15	2	58	0.039370
IID180	2018	8	15	2	59	0.039370
IID180	2018	8	15	3	00	0.039370
IID240	2018	8	15	0	00	0.039370
IID240	2018	8	15	0	01	0.039370
IID240	2018	8	15	0	02	0.039370
IID240	2018	8	15	0	03	0.039370
IID240	2018	8	15	0	04	0.039370
IID240	2018	8	15	0	05	0.039370
IID240	2018	8	15	0	06	0.039370
IID240	2018	8	15	0	07	0.039370
IID240	2018	8	15	0	08	0.039370
IID240	2018	8	15	0	09	0.039370
IID240	2018	8	15	0	10	0.039370
IID240	2018	8	15	0	11	0.039370
IID240	2018	8	15	0	12	0.039370
IID240	2018	8	15	0	13	0.039370
IID240	2018	8	15	0	14	0.039370
IID240	2018	8	15	0	15	0.039370
IID240	2018	8	15	0	16	0.039370
IID240	2018	8	15	0	17	0.039370
IID240	2018	8	15	0	18	0.039370
IID240	2018	8	15	0	19	0.039370
IID240	2018	8	15	0	20	0.039370
IID240	2018	8	15	0	21	0.039370
IID240	2018	8	15	0	22	0.039370
IID240	2018	8	15	0	23	0.039370
IID240	2018	8	15	0	24	0.039370
IID240	2018	8	15	0	25	0.039370
IID240	2018	8	15	0	26	0.039370
IID240	2018	8	15	0	27	0.039370
IID240	2018	8	15	0	28	0.039370
IID240	2018	8	15	0	29	0.039370
IID240	2018	8	15	0	30	0.039370
IID240	2018	8	15	0	31	0.039370
IID240	2018	8	15	0	32	0.039370
IID240	2018	8	15	0	33	0.039370
IID240	2018	8	15	0	34	0.039370
IID240	2018	8	15	0	35	0.039370
IID240	2018	8	15	0	36	0.039370
IID240	2018	8	15	0	37	0.039370
IID240	2018	8	15	0	38	0.039370
IID240	2018	8	15	0	39	0.039370
IID240	2018	8	15	0	40	0.039370
IID240	2018	8	15	0	41	0.039370
IID240	2018	8	15	0	42	0.039370
IID240	2018	8	15	0	43	0.039370
IID240	2018	8	15	0	44	0.039370
IID240	2018	8	15	0	45	0.039370
IID240	2018	8	15	0	46	0.039370
IID240	2018	8	15	0	47	0.039370
IID240	2018	8	15	0	48	0.039370
IID240	2018	8	15	0	49	0.039370
IID240	2018	8	15	0	50	0.039370
IID240	2018	8	15	0	51	0.039370
IID240	2018	8	15	0	52	0.039370
IID240	2018	8	15	0	53	0.039370
IID240	2018	8	15	0	54	0.039370
IID240	2018	8	15	0	55	0.039370
IID240	2018	8	15	0	56	0.039370
IID240	2018	8	15	0	57	0.039370
IID240	2018	8	15	0	58	0.039370
IID240	2018	8	15	0	59	0.039370
IID240	2018	8	15	1	00	0.039370
IID240	2018	8	15	1	01	0.039370
IID240	2018	8	15	1	02	0.039370
IID240	2018	8	15	1	03	0.039370
IID240	2018	8	15	1	04	0.039370
IID240	2018	8	15	1	05	0.039370
IID240	2018	8	15	1	06	0.039370
IID240	2018	8	15	1	07	0.039370
IID240	2018	8	15	1	08	0.039370
IID240	2018	8	15	1	09	0.039370
IID240	2018	8	15	1	10	0.039370
IID240	2018	8	15	1	11	0.039370
IID240	2018	8	15	1	12	0.039370
IID240	2018	8	15	1	13	0.039370
IID240	2018	8	15	1	14	0.039370
IID240	2018	8	15	1	15	0.039370
IID240	2018	8	15	1	16	0.039370
IID240	2018	8	15	1	17	0.039370
IID240	2018	8	15	1	18	0.039370
IID240	2018	8	15	1	19	0.039370
IID240	2018	8	15	1	20	0.039370
IID240	2018	8	15	1	21	0.039370
IID240	2018	8	15	1	22	0.039370
IID240	2018	8	15	1	23	0.039370
IID240	2018	8	15	1	24	0.039370
IID240	2018	8	15	1	25	0.039370
IID240	2018	8	15	1	26	0.039370
IID240	2018	8	15	1	27	0.039370
IID240	2018	8	15	1	28	0.039370

IID240	2018	8	15	1	29	0.039370
IID240	2018	8	15	1	30	0.039370
IID240	2018	8	15	1	31	0.039370
IID240	2018	8	15	1	32	0.039370
IID240	2018	8	15	1	33	0.039370
IID240	2018	8	15	1	34	0.039370
IID240	2018	8	15	1	35	0.039370
IID240	2018	8	15	1	36	0.039370
IID240	2018	8	15	1	37	0.039370
IID240	2018	8	15	1	38	0.039370
IID240	2018	8	15	1	39	0.039370
IID240	2018	8	15	1	40	0.039370
IID240	2018	8	15	1	41	0.039370
IID240	2018	8	15	1	42	0.039370
IID240	2018	8	15	1	43	0.039370
IID240	2018	8	15	1	44	0.039370
IID240	2018	8	15	1	45	0.039370
IID240	2018	8	15	1	46	0.039370
IID240	2018	8	15	1	47	0.039370
IID240	2018	8	15	1	48	0.039370
IID240	2018	8	15	1	49	0.039370
IID240	2018	8	15	1	50	0.039370
IID240	2018	8	15	1	51	0.039370
IID240	2018	8	15	1	52	0.039370
IID240	2018	8	15	1	53	0.039370
IID240	2018	8	15	1	54	0.039370
IID240	2018	8	15	1	55	0.039370
IID240	2018	8	15	1	56	0.039370
IID240	2018	8	15	1	57	0.039370
IID240	2018	8	15	1	58	0.039370
IID240	2018	8	15	1	59	0.039370
IID240	2018	8	15	2	00	0.039370
IID240	2018	8	15	2	01	0.039370
IID240	2018	8	15	2	02	0.039370
IID240	2018	8	15	2	03	0.039370
IID240	2018	8	15	2	04	0.039370
IID240	2018	8	15	2	05	0.039370
IID240	2018	8	15	2	06	0.039370
IID240	2018	8	15	2	07	0.039370
IID240	2018	8	15	2	08	0.039370
IID240	2018	8	15	2	09	0.039370
IID240	2018	8	15	2	10	0.039370
IID240	2018	8	15	2	11	0.039370
IID240	2018	8	15	2	12	0.039370
IID240	2018	8	15	2	13	0.039370
IID240	2018	8	15	2	14	0.039370
IID240	2018	8	15	2	15	0.039370
IID240	2018	8	15	2	16	0.039370
IID240	2018	8	15	2	17	0.039370
IID240	2018	8	15	2	18	0.039370
IID240	2018	8	15	2	19	0.039370
IID240	2018	8	15	2	20	0.039370
IID240	2018	8	15	2	21	0.039370
IID240	2018	8	15	2	22	0.039370
IID240	2018	8	15	2	23	0.039370
IID240	2018	8	15	2	24	0.039370
IID240	2018	8	15	2	25	0.039370
IID240	2018	8	15	2	26	0.039370
IID240	2018	8	15	2	27	0.039370
IID240	2018	8	15	2	28	0.039370
IID240	2018	8	15	2	29	0.039370
IID240	2018	8	15	2	30	0.039370
IID240	2018	8	15	2	31	0.039370
IID240	2018	8	15	2	32	0.039370
IID240	2018	8	15	2	33	0.039370
IID240	2018	8	15	2	34	0.039370
IID240	2018	8	15	2	35	0.039370
IID240	2018	8	15	2	36	0.039370
IID240	2018	8	15	2	37	0.039370
IID240	2018	8	15	2	38	0.039370
IID240	2018	8	15	2	39	0.039370
IID240	2018	8	15	2	40	0.039370
IID240	2018	8	15	2	41	0.039370
IID240	2018	8	15	2	42	0.039370
IID240	2018	8	15	2	43	0.039370
IID240	2018	8	15	2	44	0.039370
IID240	2018	8	15	2	45	0.039370
IID240	2018	8	15	2	46	0.039370
IID240	2018	8	15	2	47	0.039370
IID240	2018	8	15	2	48	0.039370
IID240	2018	8	15	2	49	0.039370
IID240	2018	8	15	2	50	0.039370
IID240	2018	8	15	2	51	0.039370
IID240	2018	8	15	2	52	0.039370
IID240	2018	8	15	2	53	0.039370
IID240	2018	8	15	2	54	0.039370
IID240	2018	8	15	2	55	0.039370
IID240	2018	8	15	2	56	0.039370
IID240	2018	8	15	2	57	0.039370
IID240	2018	8	15	2	58	0.039370
IID240	2018	8	15	2	59	0.039370
IID240	2018	8	15	3	00	0.039370
IID240	2018	8	15	3	01	0.039370
IID240	2018	8	15	3	02	0.039370
IID240	2018	8	15	3	03	0.039370
IID240	2018	8	15	3	04	0.039370
IID240	2018	8	15	3	05	0.039370
IID240	2018	8	15	3	06	0.039370
IID240	2018	8	15	3	07	0.039370

IID240	2018	8	15	3	08	0.039370
IID240	2018	8	15	3	09	0.039370
IID240	2018	8	15	3	10	0.039370
IID240	2018	8	15	3	11	0.039370
IID240	2018	8	15	3	12	0.039370
IID240	2018	8	15	3	13	0.039370
IID240	2018	8	15	3	14	0.039370
IID240	2018	8	15	3	15	0.039370
IID240	2018	8	15	3	16	0.039370
IID240	2018	8	15	3	17	0.039370
IID240	2018	8	15	3	18	0.039370
IID240	2018	8	15	3	19	0.039370
IID240	2018	8	15	3	20	0.039370
IID240	2018	8	15	3	21	0.039370
IID240	2018	8	15	3	22	0.039370
IID240	2018	8	15	3	23	0.039370
IID240	2018	8	15	3	24	0.039370
IID240	2018	8	15	3	25	0.039370
IID240	2018	8	15	3	26	0.039370
IID240	2018	8	15	3	27	0.039370
IID240	2018	8	15	3	28	0.039370
IID240	2018	8	15	3	29	0.039370
IID240	2018	8	15	3	30	0.039370
IID240	2018	8	15	3	31	0.039370
IID240	2018	8	15	3	32	0.039370
IID240	2018	8	15	3	33	0.039370
IID240	2018	8	15	3	34	0.039370
IID240	2018	8	15	3	35	0.039370
IID240	2018	8	15	3	36	0.039370
IID240	2018	8	15	3	37	0.039370
IID240	2018	8	15	3	38	0.039370
IID240	2018	8	15	3	39	0.039370
IID240	2018	8	15	3	40	0.039370
IID240	2018	8	15	3	41	0.039370
IID240	2018	8	15	3	42	0.039370
IID240	2018	8	15	3	43	0.039370
IID240	2018	8	15	3	44	0.039370
IID240	2018	8	15	3	45	0.039370
IID240	2018	8	15	3	46	0.039370
IID240	2018	8	15	3	47	0.039370
IID240	2018	8	15	3	48	0.039370
IID240	2018	8	15	3	49	0.039370
IID240	2018	8	15	3	50	0.039370
IID240	2018	8	15	3	51	0.039370
IID240	2018	8	15	3	52	0.039370
IID240	2018	8	15	3	53	0.039370
IID240	2018	8	15	3	54	0.039370
IID240	2018	8	15	3	55	0.039370
IID240	2018	8	15	3	56	0.039370
IID240	2018	8	15	3	57	0.039370
IID240	2018	8	15	3	58	0.039370
IID240	2018	8	15	3	59	0.039370
IID240	2018	8	15	4	00	0.039370
IID300	2018	8	15	0	00	0.039370
IID300	2018	8	15	0	01	0.039370
IID300	2018	8	15	0	02	0.039370
IID300	2018	8	15	0	03	0.039370
IID300	2018	8	15	0	04	0.039370
IID300	2018	8	15	0	05	0.039370
IID300	2018	8	15	0	06	0.039370
IID300	2018	8	15	0	07	0.039370
IID300	2018	8	15	0	08	0.039370
IID300	2018	8	15	0	09	0.039370
IID300	2018	8	15	0	10	0.039370
IID300	2018	8	15	0	11	0.039370
IID300	2018	8	15	0	12	0.039370
IID300	2018	8	15	0	13	0.039370
IID300	2018	8	15	0	14	0.039370
IID300	2018	8	15	0	15	0.039370
IID300	2018	8	15	0	16	0.039370
IID300	2018	8	15	0	17	0.039370
IID300	2018	8	15	0	18	0.039370
IID300	2018	8	15	0	19	0.039370
IID300	2018	8	15	0	20	0.039370
IID300	2018	8	15	0	21	0.039370
IID300	2018	8	15	0	22	0.039370
IID300	2018	8	15	0	23	0.039370
IID300	2018	8	15	0	24	0.039370
IID300	2018	8	15	0	25	0.039370
IID300	2018	8	15	0	26	0.039370
IID300	2018	8	15	0	27	0.039370
IID300	2018	8	15	0	28	0.039370
IID300	2018	8	15	0	29	0.039370
IID300	2018	8	15	0	30	0.039370
IID300	2018	8	15	0	31	0.039370
IID300	2018	8	15	0	32	0.039370
IID300	2018	8	15	0	33	0.039370
IID300	2018	8	15	0	34	0.039370
IID300	2018	8	15	0	35	0.039370
IID300	2018	8	15	0	36	0.039370
IID300	2018	8	15	0	37	0.039370
IID300	2018	8	15	0	38	0.039370
IID300	2018	8	15	0	39	0.039370
IID300	2018	8	15	0	40	0.039370
IID300	2018	8	15	0	41	0.039370
IID300	2018	8	15	0	42	0.039370
IID300	2018	8	15	0	43	0.039370
IID300	2018	8	15	0	44	0.039370
IID300	2018	8	15	0	45	0.039370

IID300	2018	8	15	0	46	0.039370
IID300	2018	8	15	0	47	0.039370
IID300	2018	8	15	0	48	0.039370
IID300	2018	8	15	0	49	0.039370
IID300	2018	8	15	0	50	0.039370
IID300	2018	8	15	0	51	0.039370
IID300	2018	8	15	0	52	0.039370
IID300	2018	8	15	0	53	0.039370
IID300	2018	8	15	0	54	0.039370
IID300	2018	8	15	0	55	0.039370
IID300	2018	8	15	0	56	0.039370
IID300	2018	8	15	0	57	0.039370
IID300	2018	8	15	0	58	0.039370
IID300	2018	8	15	0	59	0.039370
IID300	2018	8	15	1	00	0.039370
IID300	2018	8	15	1	01	0.039370
IID300	2018	8	15	1	02	0.039370
IID300	2018	8	15	1	03	0.039370
IID300	2018	8	15	1	04	0.039370
IID300	2018	8	15	1	05	0.039370
IID300	2018	8	15	1	06	0.039370
IID300	2018	8	15	1	07	0.039370
IID300	2018	8	15	1	08	0.039370
IID300	2018	8	15	1	09	0.039370
IID300	2018	8	15	1	10	0.039370
IID300	2018	8	15	1	11	0.039370
IID300	2018	8	15	1	12	0.039370
IID300	2018	8	15	1	13	0.039370
IID300	2018	8	15	1	14	0.039370
IID300	2018	8	15	1	15	0.039370
IID300	2018	8	15	1	16	0.039370
IID300	2018	8	15	1	17	0.039370
IID300	2018	8	15	1	18	0.039370
IID300	2018	8	15	1	19	0.039370
IID300	2018	8	15	1	20	0.039370
IID300	2018	8	15	1	21	0.039370
IID300	2018	8	15	1	22	0.039370
IID300	2018	8	15	1	23	0.039370
IID300	2018	8	15	1	24	0.039370
IID300	2018	8	15	1	25	0.039370
IID300	2018	8	15	1	26	0.039370
IID300	2018	8	15	1	27	0.039370
IID300	2018	8	15	1	28	0.039370
IID300	2018	8	15	1	29	0.039370
IID300	2018	8	15	1	30	0.039370
IID300	2018	8	15	1	31	0.039370
IID300	2018	8	15	1	32	0.039370
IID300	2018	8	15	1	33	0.039370
IID300	2018	8	15	1	34	0.039370
IID300	2018	8	15	1	35	0.039370
IID300	2018	8	15	1	36	0.039370
IID300	2018	8	15	1	37	0.039370
IID300	2018	8	15	1	38	0.039370
IID300	2018	8	15	1	39	0.039370
IID300	2018	8	15	1	40	0.039370
IID300	2018	8	15	1	41	0.039370
IID300	2018	8	15	1	42	0.039370
IID300	2018	8	15	1	43	0.039370
IID300	2018	8	15	1	44	0.039370
IID300	2018	8	15	1	45	0.039370
IID300	2018	8	15	1	46	0.039370
IID300	2018	8	15	1	47	0.039370
IID300	2018	8	15	1	48	0.039370
IID300	2018	8	15	1	49	0.039370
IID300	2018	8	15	1	50	0.039370
IID300	2018	8	15	1	51	0.039370
IID300	2018	8	15	1	52	0.039370
IID300	2018	8	15	1	53	0.039370
IID300	2018	8	15	1	54	0.039370
IID300	2018	8	15	1	55	0.039370
IID300	2018	8	15	1	56	0.039370
IID300	2018	8	15	1	57	0.039370
IID300	2018	8	15	1	58	0.039370
IID300	2018	8	15	1	59	0.039370
IID300	2018	8	15	2	00	0.039370
IID300	2018	8	15	2	01	0.039370
IID300	2018	8	15	2	02	0.039370
IID300	2018	8	15	2	03	0.039370
IID300	2018	8	15	2	04	0.039370
IID300	2018	8	15	2	05	0.039370
IID300	2018	8	15	2	06	0.039370
IID300	2018	8	15	2	07	0.039370
IID300	2018	8	15	2	08	0.039370
IID300	2018	8	15	2	09	0.039370
IID300	2018	8	15	2	10	0.039370
IID300	2018	8	15	2	11	0.039370
IID300	2018	8	15	2	12	0.039370
IID300	2018	8	15	2	13	0.039370
IID300	2018	8	15	2	14	0.039370
IID300	2018	8	15	2	15	0.039370
IID300	2018	8	15	2	16	0.039370
IID300	2018	8	15	2	17	0.039370
IID300	2018	8	15	2	18	0.039370
IID300	2018	8	15	2	19	0.039370
IID300	2018	8	15	2	20	0.039370
IID300	2018	8	15	2	21	0.039370
IID300	2018	8	15	2	22	0.039370
IID300	2018	8	15	2	23	0.039370
IID300	2018	8	15	2	24	0.039370

IID300	2018	8	15	2	25	0.039370
IID300	2018	8	15	2	26	0.039370
IID300	2018	8	15	2	27	0.039370
IID300	2018	8	15	2	28	0.039370
IID300	2018	8	15	2	29	0.039370
IID300	2018	8	15	2	30	0.039370
IID300	2018	8	15	2	31	0.039370
IID300	2018	8	15	2	32	0.039370
IID300	2018	8	15	2	33	0.039370
IID300	2018	8	15	2	34	0.039370
IID300	2018	8	15	2	35	0.039370
IID300	2018	8	15	2	36	0.039370
IID300	2018	8	15	2	37	0.039370
IID300	2018	8	15	2	38	0.039370
IID300	2018	8	15	2	39	0.039370
IID300	2018	8	15	2	40	0.039370
IID300	2018	8	15	2	41	0.039370
IID300	2018	8	15	2	42	0.039370
IID300	2018	8	15	2	43	0.039370
IID300	2018	8	15	2	44	0.039370
IID300	2018	8	15	2	45	0.039370
IID300	2018	8	15	2	46	0.039370
IID300	2018	8	15	2	47	0.039370
IID300	2018	8	15	2	48	0.039370
IID300	2018	8	15	2	49	0.039370
IID300	2018	8	15	2	50	0.039370
IID300	2018	8	15	2	51	0.039370
IID300	2018	8	15	2	52	0.039370
IID300	2018	8	15	2	53	0.039370
IID300	2018	8	15	2	54	0.039370
IID300	2018	8	15	2	55	0.039370
IID300	2018	8	15	2	56	0.039370
IID300	2018	8	15	2	57	0.039370
IID300	2018	8	15	2	58	0.039370
IID300	2018	8	15	2	59	0.039370
IID300	2018	8	15	3	00	0.039370
IID300	2018	8	15	3	01	0.039370
IID300	2018	8	15	3	02	0.039370
IID300	2018	8	15	3	03	0.039370
IID300	2018	8	15	3	04	0.039370
IID300	2018	8	15	3	05	0.039370
IID300	2018	8	15	3	06	0.039370
IID300	2018	8	15	3	07	0.039370
IID300	2018	8	15	3	08	0.039370
IID300	2018	8	15	3	09	0.039370
IID300	2018	8	15	3	10	0.039370
IID300	2018	8	15	3	11	0.039370
IID300	2018	8	15	3	12	0.039370
IID300	2018	8	15	3	13	0.039370
IID300	2018	8	15	3	14	0.039370
IID300	2018	8	15	3	15	0.039370
IID300	2018	8	15	3	16	0.039370
IID300	2018	8	15	3	17	0.039370
IID300	2018	8	15	3	18	0.039370
IID300	2018	8	15	3	19	0.039370
IID300	2018	8	15	3	20	0.039370
IID300	2018	8	15	3	21	0.039370
IID300	2018	8	15	3	22	0.039370
IID300	2018	8	15	3	23	0.039370
IID300	2018	8	15	3	24	0.039370
IID300	2018	8	15	3	25	0.039370
IID300	2018	8	15	3	26	0.039370
IID300	2018	8	15	3	27	0.039370
IID300	2018	8	15	3	28	0.039370
IID300	2018	8	15	3	29	0.039370
IID300	2018	8	15	3	30	0.039370
IID300	2018	8	15	3	31	0.039370
IID300	2018	8	15	3	32	0.039370
IID300	2018	8	15	3	33	0.039370
IID300	2018	8	15	3	34	0.039370
IID300	2018	8	15	3	35	0.039370
IID300	2018	8	15	3	36	0.039370
IID300	2018	8	15	3	37	0.039370
IID300	2018	8	15	3	38	0.039370
IID300	2018	8	15	3	39	0.039370
IID300	2018	8	15	3	40	0.039370
IID300	2018	8	15	3	41	0.039370
IID300	2018	8	15	3	42	0.039370
IID300	2018	8	15	3	43	0.039370
IID300	2018	8	15	3	44	0.039370
IID300	2018	8	15	3	45	0.039370
IID300	2018	8	15	3	46	0.039370
IID300	2018	8	15	3	47	0.039370
IID300	2018	8	15	3	48	0.039370
IID300	2018	8	15	3	49	0.039370
IID300	2018	8	15	3	50	0.039370
IID300	2018	8	15	3	51	0.039370
IID300	2018	8	15	3	52	0.039370
IID300	2018	8	15	3	53	0.039370
IID300	2018	8	15	3	54	0.039370
IID300	2018	8	15	3	55	0.039370
IID300	2018	8	15	3	56	0.039370
IID300	2018	8	15	3	57	0.039370
IID300	2018	8	15	3	58	0.039370
IID300	2018	8	15	3	59	0.039370
IID300	2018	8	15	4	00	0.039370
IID300	2018	8	15	4	01	0.039370
IID300	2018	8	15	4	02	0.039370
IID300	2018	8	15	4	03	0.039370

I1D300	2018	8	15	4	04	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	05	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	06	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	07	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	08	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	09	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	10	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	11	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	12	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	13	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	14	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	15	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	16	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	17	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	18	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	19	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	20	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	21	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	22	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	23	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	24	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	25	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	26	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	27	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	28	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	29	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	30	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	31	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	32	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	33	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	34	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	35	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	36	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	37	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	38	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	39	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	40	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	41	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	42	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	43	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	44	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	45	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	46	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	47	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	48	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	49	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	50	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	51	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	52	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	53	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	54	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	55	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	56	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	57	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	58	0.039370
I1D300	2018	8	15	4	59	0.039370
I1D300	2018	8	15	5	00	0.039370

Y así sucesivamente. El fichero continua con el resto de las intensidades de la Matriz de lluvias:

I (mm/h): 3, 5, 7, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 300

Solo se detalla los datos para la I (mm/h) = 1



ANEXO

A4.2 EJEMPLO DE FICHERO DE RESULTADOS

- 1) FICHERO DE RESULTADOS CON DATOS DE LLUVIA EN EL FICHERO DE DATOS DE ENTRADA.

FICHERO DE RESULTADOS

Nota: El fichero ASCII que contiene los resultados de la simulación se lo ha denominado "Case1622.rpt"

Case1622.rpt

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.2 (Build 5.2.4)

(DOCTORAL THESIS)
RUNOFF ANALYSIS FOR AN URBAN BASIN OF MIXED USE (RESIDENTIAL-COMMERCIAL)
Case N°1622, 1 ha, 60% Imper., 0.5% Slope

Element Count

Number of rain gages 1
Number of subcatchments ... 1
Number of nodes 0
Number of links 0
Number of pollutants 3
Number of land uses 1

Pollutant Summary

Name	Ppt. Units	GW Concen.	Kdecay Concen.	1/days	CoPollutant
BOD5	MG/L	0.00	0.00	0.00	TS (0.01)
TS	MG/L	0.00	0.00	0.00	
TN	MG/L	0.00	0.00	0.00	TS (0.00)

Landuse Summary

Name	Sweeping Interval	Maximum Removal	Last Swept
Urban	0.00	0.00	0.00

Raingage Summary

Name	Data Source	Data Type	Recording Interval
Rain	I140D4	INTENSITY	1 min.

Subcatchment Summary

Name	Area	Width	%Imperv	%Slope	Rain Gage	Outlet
Basin	2.47	328.00	60.00	0.5000	Rain	Basin

Analysis Options

Flow Units CFS

Process Models:

Rainfall/Runoff YES

RDII NO

Snowmelt NO

Groundwater NO

Flow Routing NO

Water Quality YES

Infiltration Method HORTON

Starting Date 08/15/2018 00:00:00

Ending Date 08/15/2018 06:00:00

Antecedent Dry Days 7.0

Report Time Step 00:01:00

Wet Time Step 00:01:00

Dry Time Step 01:00:00

Control Actions Taken

	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	acre-feet	inches
*****	-----	-----
Total Precipitation	0.095	0.459
Evaporation Loss	0.004	0.018
Infiltration Loss	0.038	0.183
Surface Runoff	0.053	0.256
Final Storage	0.001	0.006
Continuity Error (%)	-0.740	

	BOD5	TS	TN
Runoff Quality Continuity	lbs	lbs	lbs
*****	-----	-----	-----
Initial Buildup	0.000	315.976	0.000
Surface Buildup	0.637	24.253	0.061
Wet Deposition	0.000	0.000	0.000
Sweeping Removal	0.000	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.000	0.000	0.000
BMP Removal	0.000	0.000	0.000
Surface Runoff	0.637	126.690	0.061
Remaining Buildup	0.000	213.540	0.000
Continuity Error (%)	0.000	0.000	0.000

Subcatchment Runoff Summary

Subcatchment	Total Precip in	Total Runon in	Total Evap in	Total Infil in	Imperv Runoff in	Perv Runoff in	Total Runoff in	Total Runoff 10^6 gal	Peak Runoff CFS	Runoff Coeff
Basin	0.46	0.00	0.02	0.18	0.26	0.00	0.26	0.02	7.59	0.557

Subcatchment Washoff Summary

Subcatchment	BOD5 lbs	TS lbs	TN lbs
Basin	0.637	126.690	0.061
System	0.637	126.690	0.061

Subcatchment Time Series Results

<<< Subcatchment Basin >>>

Date	Time	Precip. in/hr	Losses in/hr	Runoff CFS	BOD5 MG/L	TS MG/L	TN MG/L
08/15/2018	00:01:00	5.512	0.567	0.9983	6.576	1307.330	0.628
08/15/2018	00:02:00	5.512	0.573	3.5217	5.292	1052.008	0.505
08/15/2018	00:03:00	5.512	0.573	5.6113	4.693	932.923	0.448
08/15/2018	00:04:00	5.512	0.573	6.8881	4.242	843.300	0.405
08/15/2018	00:05:00	0.000	0.573	7.5920	3.849	765.253	0.367
08/15/2018	00:06:00	0.000	0.573	4.0352	3.897	774.737	0.372
08/15/2018	00:07:00	0.000	0.573	2.4336	4.014	798.047	0.383
08/15/2018	00:08:00	0.000	0.573	1.5952	4.154	825.935	0.396
08/15/2018	00:09:00	0.000	0.573	1.1110	4.301	855.097	0.410
08/15/2018	00:10:00	0.000	0.573	0.8100	4.448	884.220	0.424
08/15/2018	00:11:00	0.000	0.573	0.6114	4.592	912.934	0.438
08/15/2018	00:12:00	0.000	0.573	0.4743	4.733	941.033	0.452
08/15/2018	00:13:00	0.000	0.573	0.3763	4.871	968.449	0.465
08/15/2018	00:14:00	0.000	0.573	0.3042	5.006	995.177	0.478
08/15/2018	00:15:00	0.000	0.573	0.2497	5.137	1021.242	0.490
08/15/2018	00:16:00	0.000	0.573	0.2077	5.265	1046.688	0.502
08/15/2018	00:17:00	0.000	0.573	0.1748	5.390	1071.563	0.514
08/15/2018	00:18:00	0.000	0.573	0.1485	5.512	1095.917	0.526
08/15/2018	00:19:00	0.000	0.573	0.1273	5.633	1119.799	0.538
08/15/2018	00:20:00	0.000	0.197	0.1099	5.751	1143.259	0.549
08/15/2018	00:21:00	0.000	0.004	0.0955	5.867	1166.344	0.560
08/15/2018	00:22:00	0.000	0.004	0.0835	5.981	1189.099	0.571
08/15/2018	00:23:00	0.000	0.004	0.0734	6.094	1211.567	0.582
08/15/2018	00:24:00	0.000	0.004	0.0648	6.206	1233.790	0.592
08/15/2018	00:25:00	0.000	0.004	0.0575	6.317	1255.807	0.603
08/15/2018	00:26:00	0.000	0.004	0.0512	6.427	1277.657	0.613
08/15/2018	00:27:00	0.000	0.004	0.0457	6.536	1299.379	0.624
08/15/2018	00:28:00	0.000	0.004	0.0409	6.645	1321.009	0.634
08/15/2018	00:29:00	0.000	0.004	0.0367	6.753	1342.583	0.644
08/15/2018	00:30:00	0.000	0.004	0.0330	6.862	1364.140	0.655
08/15/2018	00:31:00	0.000	0.004	0.0298	6.970	1385.715	0.665
08/15/2018	00:32:00	0.000	0.004	0.0269	7.079	1407.346	0.676
08/15/2018	00:33:00	0.000	0.004	0.0243	7.188	1429.072	0.686
08/15/2018	00:34:00	0.000	0.004	0.0220	7.298	1450.930	0.696
08/15/2018	00:35:00	0.000	0.004	0.0200	7.409	1472.962	0.707
08/15/2018	00:36:00	0.000	0.004	0.0181	7.521	1495.210	0.718
08/15/2018	00:37:00	0.000	0.004	0.0165	7.634	1517.720	0.729
08/15/2018	00:38:00	0.000	0.004	0.0149	7.749	1540.539	0.739
08/15/2018	00:39:00	0.000	0.004	0.0136	7.866	1563.719	0.751
08/15/2018	00:40:00	0.000	0.004	0.0123	7.984	1587.313	0.762
08/15/2018	00:41:00	0.000	0.004	0.0112	8.105	1611.382	0.773
08/15/2018	00:42:00	0.000	0.004	0.0102	8.229	1635.992	0.785
08/15/2018	00:43:00	0.000	0.004	0.0092	8.356	1661.215	0.797
08/15/2018	00:44:00	0.000	0.004	0.0083	8.486	1687.130	0.810
08/15/2018	00:45:00	0.000	0.004	0.0076	8.621	1713.828	0.823
08/15/2018	00:46:00	0.000	0.004	0.0068	8.759	1741.410	0.836
08/15/2018	00:47:00	0.000	0.004	0.0062	8.903	1769.990	0.850
08/15/2018	00:48:00	0.000	0.004	0.0055	9.052	1799.698	0.864
08/15/2018	00:49:00	0.000	0.004	0.0050	9.208	1830.688	0.879
08/15/2018	00:50:00	0.000	0.004	0.0045	9.372	1863.133	0.894
08/15/2018	00:51:00	0.000	0.004	0.0040	9.543	1897.241	0.911
08/15/2018	00:52:00	0.000	0.004	0.0035	9.724	1933.255	0.928
08/15/2018	00:53:00	0.000	0.004	0.0031	9.916	1971.469	0.946
08/15/2018	00:54:00	0.000	0.004	0.0027	10.122	2012.237	0.966

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

08/15/2018 05:51:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:52:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:53:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:54:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:55:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:56:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:57:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:58:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:59:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 06:00:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000

Analysis begun on: Thu Aug 1 20:19:15 2023

Analysis ended on: Thu Aug 1 20:19:15 2023

Total elapsed time: < 1 sec

- 2) FICHERO DE RESULTADOS CON LECTURA DE DATOS DE LLUVIA DESDE EL FICHERO DE DATOS DE ENTRADA MEDIANTE UNA "LLAMADA" A FICHERO ADICIONAL.

FICHERO DE RESULTADOS

Nota: El fichero ASCII que contiene los resultados de la simulación se ha denominado también "Case1622.rpt"

Case1622.rpt

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.2 (Build 5.2.4)

(DOCTORAL THESIS)

RUNOFF ANALYSIS FOR AN URBAN BASIN OF MIXED USE (RESIDENTIAL-COMMERCIAL)

Case N°1622, 1 ha, 60% Imper., 0,5% Slope

Element Count

Number of rain gages 1

Number of subcatchments ... 1

Number of nodes 0

Number of links 0

Number of pollutants 3

Number of land uses 1

Pollutant Summary

Name	Ppt. Units	GW Concen.	Kdecay Concen.	1/days	CoPollutant
BOD5	MG/L	0.00	0.00	0.00	TS (0.01)
TS	MG/L	0.00	0.00	0.00	
TN	MG/L	0.00	0.00	0.00	TS (0.00)

Landuse Summary

Name	Sweeping Interval	Maximum Removal	Last Swept

Urban 0.00 0.00 0.00

Raingage Summary

Name	Data Source	Data Type	Recording Interval
Rain	Rains.dat		

Subcatchment Summary

Name	Area	Width	%Imperv	%Slope	Rain Gage	Outlet
Basin	2.47	328.00	60.00	0.5000	Rain	Basin

Analysis Options

Flow Units CFS
Process Models:
 Rainfall/Runoff YES
 RDII NO
 Snowmelt NO
 Groundwater NO
 Flow Routing NO
 Water Quality YES
Infiltration Method HORTON
Starting Date 08/15/2018 00:00:00
Ending Date 08/15/2018 06:00:00
Antecedent Dry Days 7.0
Report Time Step 00:01:00
Wet Time Step 00:01:00
Dry Time Step 01:00:00

Rainfall File Summary

Station ID	First Date	Last Date	Recording Frequency	Periods w/Precip	Periods Missing	Periods Malfunc.
I140D4	08/15/2018	08/15/2018	1 min	5	0	0

Control Actions Taken

	Volume	Depth
Runoff Quantity	Contiguity	acre-feet
		inches
Total Precipitation	0.095	0.459
Evaporation Loss	0.004	0.018
Infiltration Loss	0.038	0.183
Surface Runoff	0.053	0.256
Final Storage	0.001	0.006
Continuity Error (%)	-0.740	

	BOD5	TS	TN
Runoff Quality	Contiguity	lbs	lbs
		lbs	lbs
Initial Buildup	0.000	315.976	0.000
Surface Buildup	0.637	24.253	0.061
Wet Deposition	0.000	0.000	0.000
Sweeping Removal	0.000	0.000	0.000

Infiltration Loss	0.000	0.000	0.000
BMP Removal	0.000	0.000	0.000
Surface Runoff	0.637	126.690	0.061
Remaining Buildup	0.000	213.540	0.000
Continuity Error (%)	0.000	0.000	0.000

Subcatchment Runoff Summary

Subcatchment	Total Precip in	Total Runon in	Total Evap in	Total Infil in	Imperv Runoff in	Perv Runoff in	Total Runoff in	Total Runoff 10^6 gal	Peak Runoff CFS	Runoff Coeff
Basin	0.46	0.00	0.02	0.18	0.26	0.00	0.26	0.02	7.59	0.557

Subcatchment Washoff Summary

Subcatchment	BOD5 lbs	TS lbs	TN lbs
Basin	0.637	126.690	0.061
System	0.637	126.690	0.061

Subcatchment Time Series Results

<<< Subcatchment Basin >>>

Date	Time	Precip. in/hr	Losses in/hr	Runoff CFS	BOD5 MG/L	TS MG/L	TN MG/L
08/15/2018	00:01:00	5.512	0.567	0.9983	6.576	1307.330	0.628
08/15/2018	00:02:00	5.512	0.573	3.5217	5.292	1052.008	0.505
08/15/2018	00:03:00	5.512	0.573	5.6113	4.693	932.923	0.448
08/15/2018	00:04:00	5.512	0.573	6.8881	4.242	843.300	0.405
08/15/2018	00:05:00	0.000	0.573	7.5920	3.849	765.253	0.367
08/15/2018	00:06:00	0.000	0.573	4.0352	3.897	774.737	0.372
08/15/2018	00:07:00	0.000	0.573	2.4336	4.014	798.047	0.383
08/15/2018	00:08:00	0.000	0.573	1.5952	4.154	825.935	0.396
08/15/2018	00:09:00	0.000	0.573	1.1110	4.301	855.097	0.410
08/15/2018	00:10:00	0.000	0.573	0.8100	4.448	884.219	0.424
08/15/2018	00:11:00	0.000	0.573	0.6114	4.592	912.933	0.438
08/15/2018	00:12:00	0.000	0.573	0.4743	4.733	941.033	0.452
08/15/2018	00:13:00	0.000	0.573	0.3763	4.871	968.449	0.465
08/15/2018	00:14:00	0.000	0.573	0.3042	5.006	995.177	0.478
08/15/2018	00:15:00	0.000	0.573	0.2497	5.137	1021.242	0.490
08/15/2018	00:16:00	0.000	0.573	0.2077	5.265	1046.688	0.502
08/15/2018	00:17:00	0.000	0.573	0.1748	5.390	1071.563	0.514
08/15/2018	00:18:00	0.000	0.573	0.1485	5.512	1095.917	0.526
08/15/2018	00:19:00	0.000	0.573	0.1273	5.633	1119.799	0.538
08/15/2018	00:20:00	0.000	0.197	0.1099	5.751	1143.259	0.549
08/15/2018	00:21:00	0.000	0.004	0.0955	5.867	1166.344	0.560
08/15/2018	00:22:00	0.000	0.004	0.0835	5.981	1189.099	0.571
08/15/2018	00:23:00	0.000	0.004	0.0734	6.094	1211.567	0.582
08/15/2018	00:24:00	0.000	0.004	0.0648	6.206	1233.790	0.592
08/15/2018	00:25:00	0.000	0.004	0.0575	6.317	1255.807	0.603
08/15/2018	00:26:00	0.000	0.004	0.0512	6.427	1277.657	0.613
08/15/2018	00:27:00	0.000	0.004	0.0457	6.536	1299.379	0.624
08/15/2018	00:28:00	0.000	0.004	0.0409	6.645	1321.008	0.634
08/15/2018	00:29:00	0.000	0.004	0.0367	6.753	1342.583	0.644
08/15/2018	00:30:00	0.000	0.004	0.0330	6.862	1364.140	0.655
08/15/2018	00:31:00	0.000	0.004	0.0298	6.970	1385.715	0.665
08/15/2018	00:32:00	0.000	0.004	0.0269	7.079	1407.346	0.676
08/15/2018	00:33:00	0.000	0.004	0.0243	7.188	1429.071	0.686

08/15/2018 00:34:00	0.000	0.004	0.0220	7.298	1450.930	0.696
08/15/2018 00:35:00	0.000	0.004	0.0200	7.409	1472.962	0.707
08/15/2018 00:36:00	0.000	0.004	0.0181	7.521	1495.210	0.718
08/15/2018 00:37:00	0.000	0.004	0.0165	7.634	1517.720	0.729
08/15/2018 00:38:00	0.000	0.004	0.0149	7.749	1540.539	0.739
08/15/2018 00:39:00	0.000	0.004	0.0136	7.866	1563.718	0.751
08/15/2018 00:40:00	0.000	0.004	0.0123	7.984	1587.313	0.762
08/15/2018 00:41:00	0.000	0.004	0.0112	8.105	1611.382	0.773
08/15/2018 00:42:00	0.000	0.004	0.0102	8.229	1635.992	0.785
08/15/2018 00:43:00	0.000	0.004	0.0092	8.356	1661.214	0.797
08/15/2018 00:44:00	0.000	0.004	0.0083	8.486	1687.130	0.810
08/15/2018 00:45:00	0.000	0.004	0.0076	8.621	1713.828	0.823
08/15/2018 00:46:00	0.000	0.004	0.0068	8.759	1741.410	0.836
08/15/2018 00:47:00	0.000	0.004	0.0062	8.903	1769.989	0.850
08/15/2018 00:48:00	0.000	0.004	0.0055	9.052	1799.698	0.864
08/15/2018 00:49:00	0.000	0.004	0.0050	9.208	1830.688	0.879
08/15/2018 00:50:00	0.000	0.004	0.0045	9.372	1863.133	0.894
08/15/2018 00:51:00	0.000	0.004	0.0040	9.543	1897.240	0.911
08/15/2018 00:52:00	0.000	0.004	0.0035	9.724	1933.255	0.928
08/15/2018 00:53:00	0.000	0.004	0.0031	9.916	1971.469	0.946
08/15/2018 00:54:00	0.000	0.004	0.0027	10.122	2012.236	0.966
08/15/2018 00:55:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 00:56:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 00:57:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 00:58:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 00:59:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:00:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:01:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:02:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:03:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:04:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:05:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:06:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:07:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:08:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:09:00	0.000	0.004	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:10:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:11:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:12:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:13:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:14:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:15:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:16:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:17:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:18:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:19:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:20:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:21:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:22:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:23:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:24:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:25:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:26:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:27:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:28:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:29:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:30:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:31:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:32:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:33:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:34:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:35:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:36:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:37:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:38:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:39:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:40:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:41:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:42:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:43:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:44:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:45:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:46:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 01:47:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000

[illegible]

[illegible]

[illegible]

08/15/2018 05:30:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:31:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:32:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:33:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:34:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:35:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:36:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:37:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:38:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:39:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:40:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:41:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:42:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:43:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:44:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:45:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:46:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:47:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:48:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:49:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:50:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:51:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:52:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:53:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:54:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:55:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:56:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:57:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:58:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 05:59:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000
08/15/2018 06:00:00	0.000	0.003	0.0000	0.000	0.000	0.000

Analysis begun on: Thu Aug 1 20:24:12 2023

Analysis ended on: Thu Aug 1 20:24:12 2023

Total elapsed time: < 1 sec



ANEXO

A4.3 DATOS DE LLUVIA EN FICHERO CASE1622.INP

En esta carpeta se encuentran los siguientes ficheros:

Case1622 (leer).txt
Case1622.inp
runswmm.exe
swmm5.dll
Simula.bat
Case1622.rpt

ANEXO

A4.4 DATOS DE LLUVIA EN FICHERO RAINS.DAT

En esta carpeta se encuentran los siguientes ficheros:

Case1622 (leer).txt
Case1622.inp
Rains.dat
runswmm.exe
swmm5.dll
Simula.bat
Case1622.rpt

ANEXO

A4.5 HIDROGRAMAS Y POLUTOGRAMAS

En esta carpeta se encuentran los 208 ficheros de resultados de las lluvias simuladas en formato Excel.

ANEXO

A4.6 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

En esta carpeta se encuentra el libro Excel A4.6 HERRAMIENTA DE SIMULACION.xlsm como herramienta matemática para la obtención de datos y gráficos complementarios.

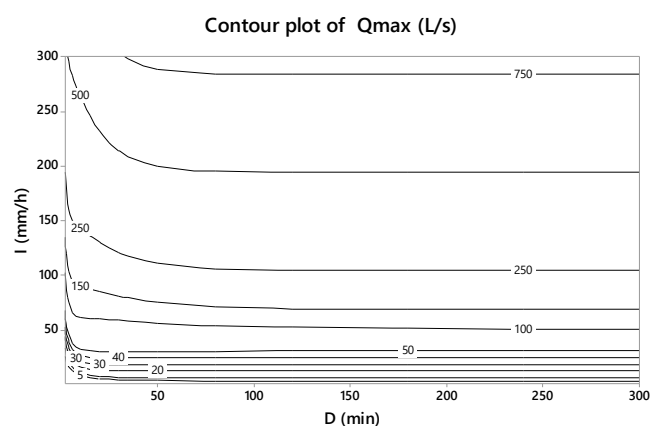
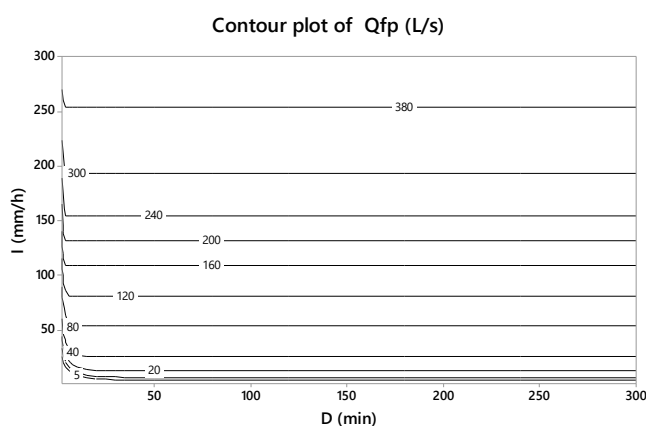
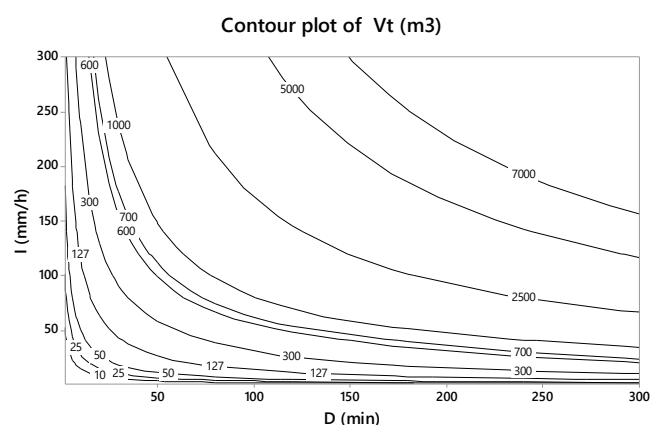
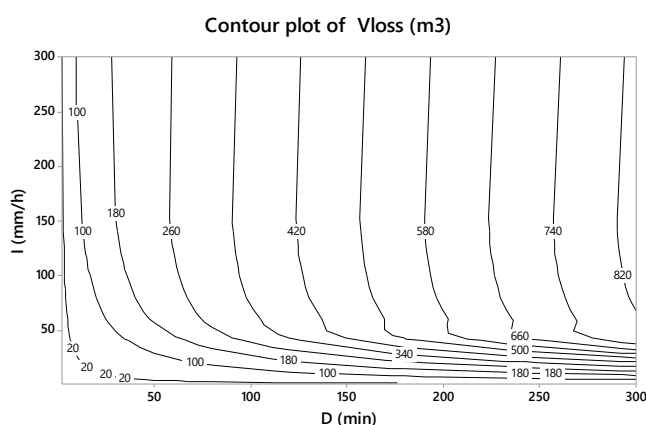
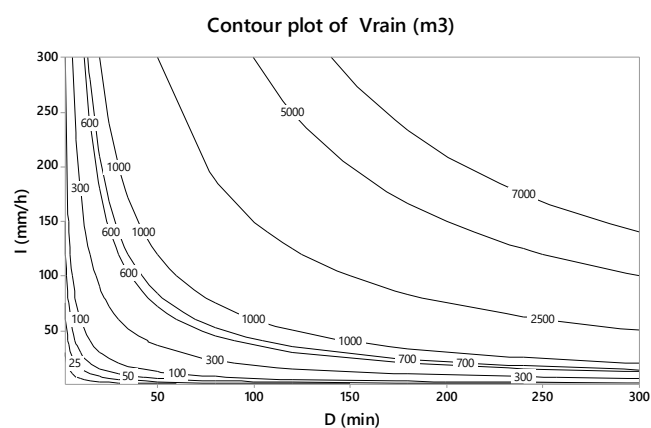
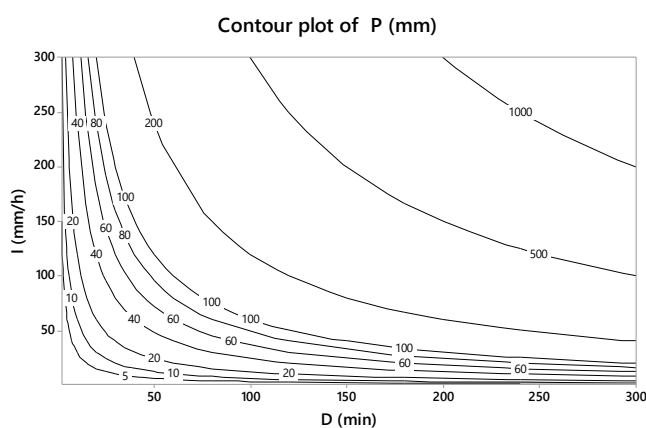
ANEXO

A4.7 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DE POLUTOGRAMAS PARA EL CONTAMINANTE TS

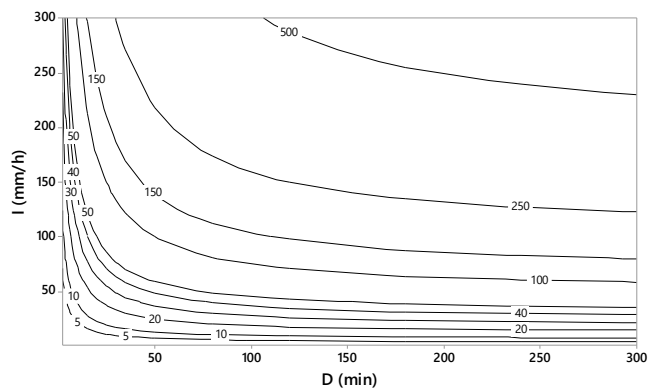
En esta carpeta se encuentra el libro Excel A4.7 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACION.xlsx con sus datos.

ANEXO

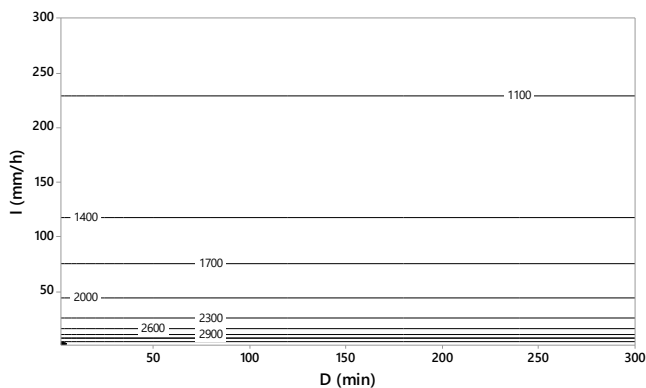
A4.8 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CONTAMINANTE TS



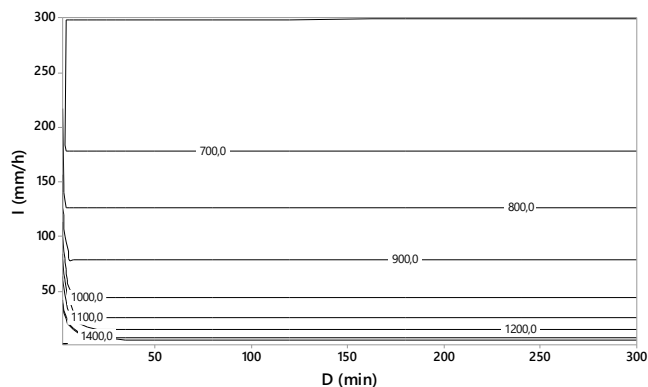
Contour plot of Q_{mean} (L/s)



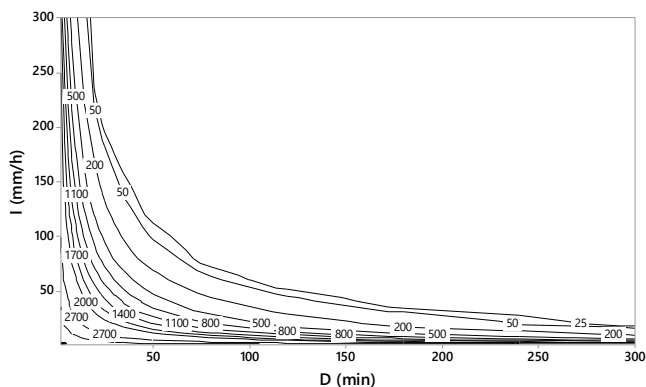
Contour plot of C_p (mg/L)



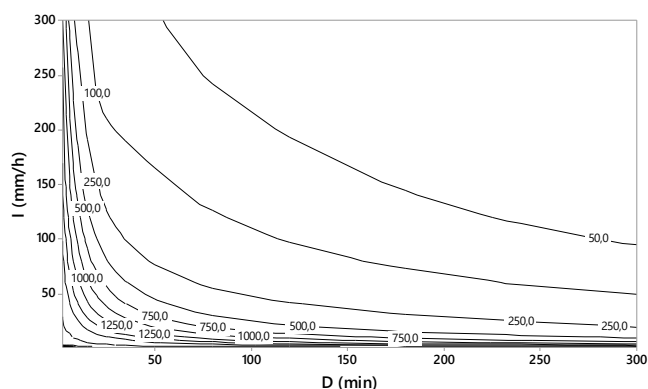
Contour plot of C_{fp} (mg/L)



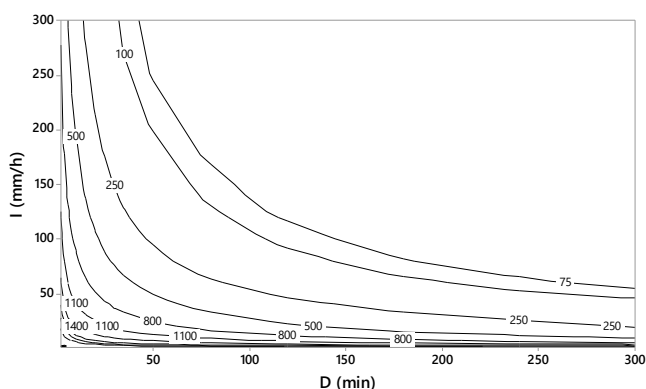
Contour plot of C_{last} (mg/L)



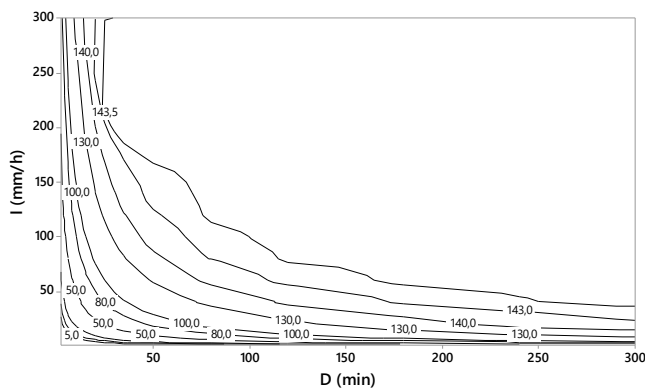
Contour plot of C_m (mg/L)



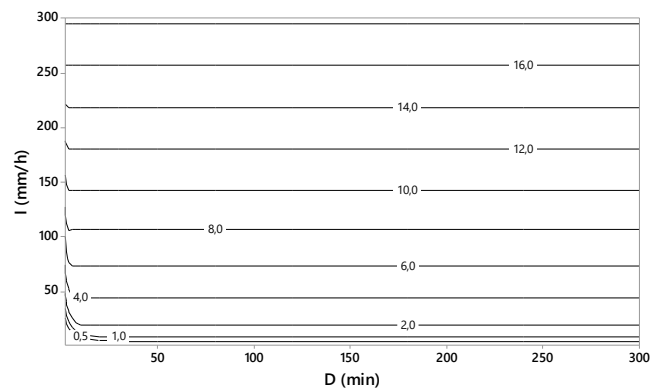
Contour plot of EMC (mg/L)



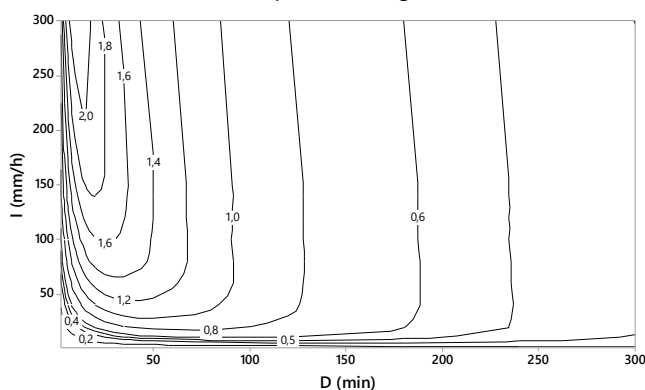
Contour plot of Mt (kg)



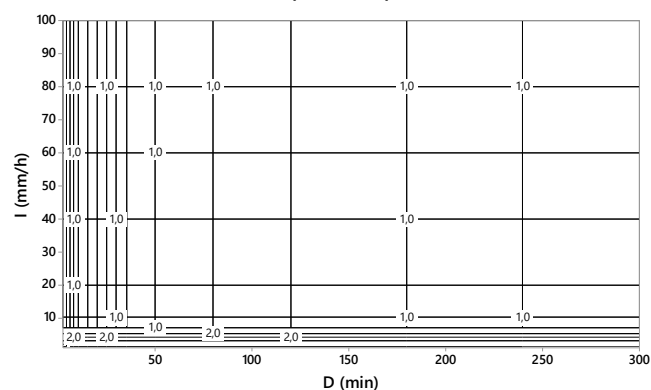
Contour plot of Fp (kg/min)



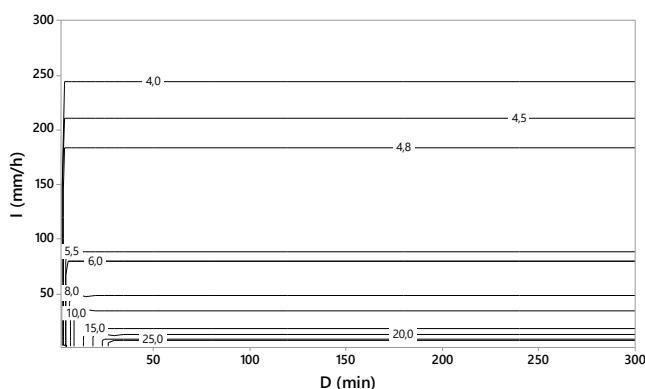
Contour plot of Fm (kg/min)



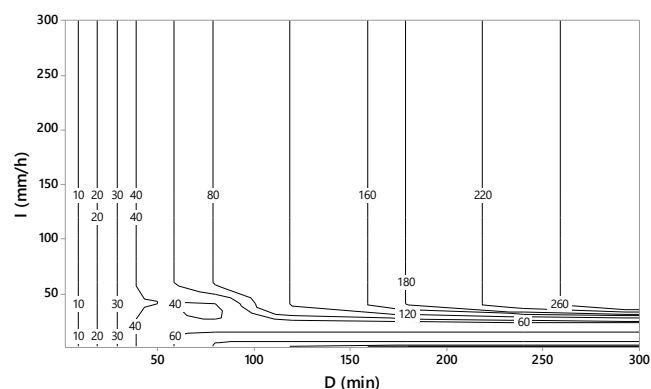
Contour plot of T_{cp} (min)



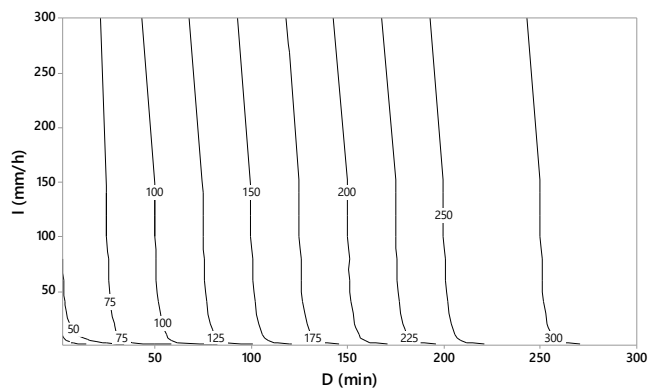
Contour plot of T_{fp} (min)



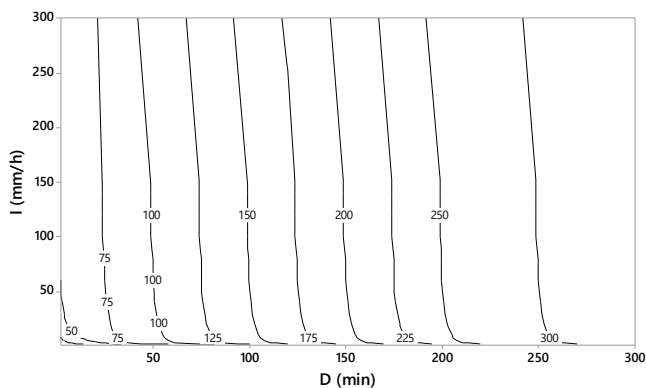
Contour plot of T_{qmax} (min)



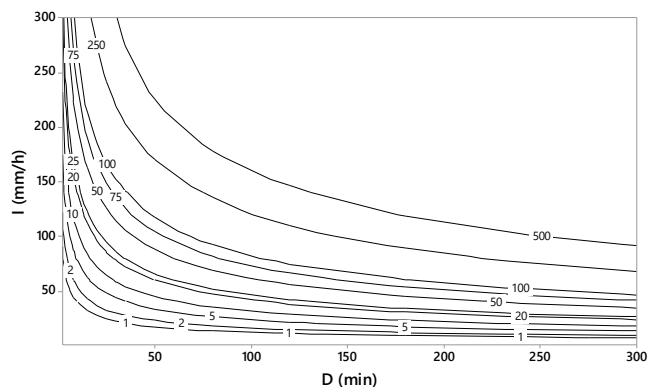
Contour plot of T_{clast} (min)



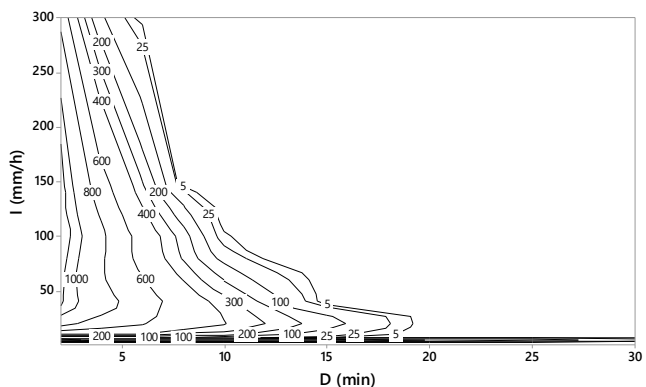
Contour plot of T_t (min)



Contour plot of T_r (years)



Contour plot of $(C_{last} - C_p) > 0$ (mg/L)



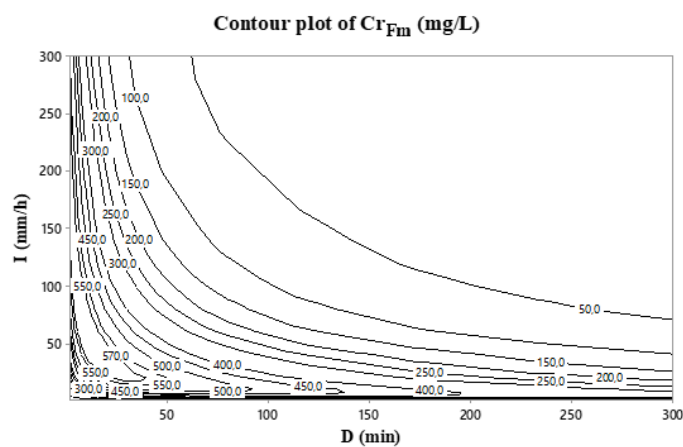
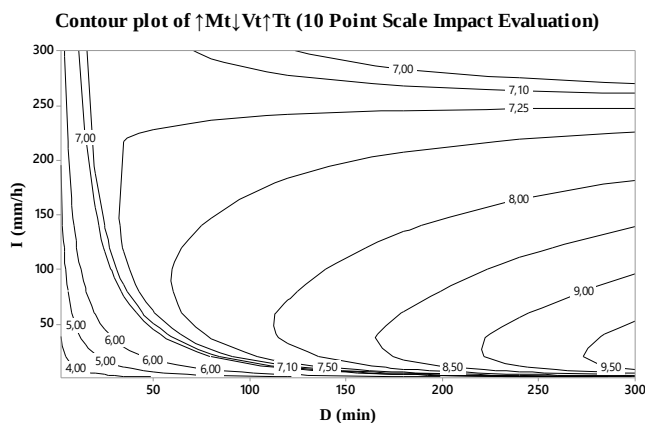
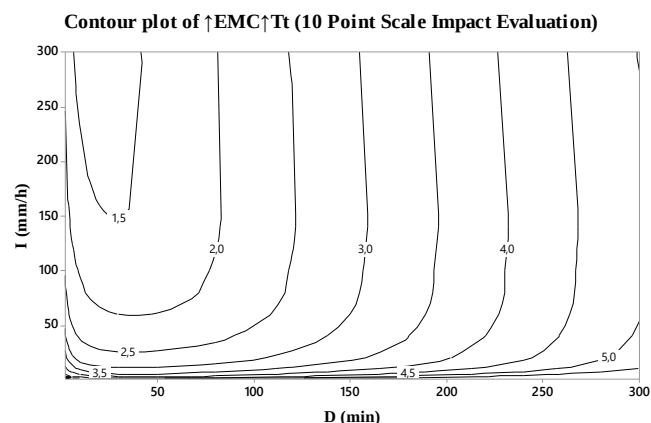
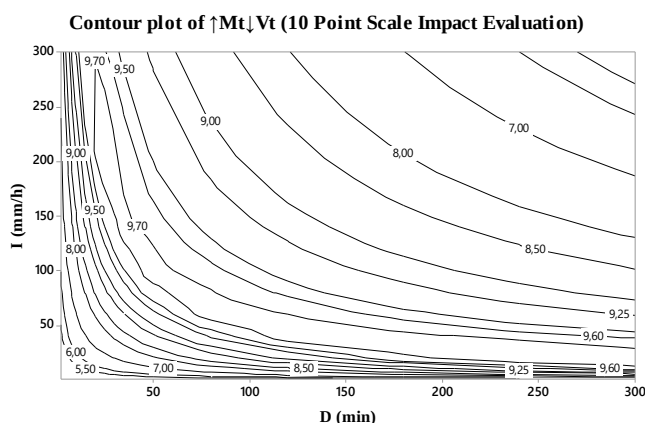
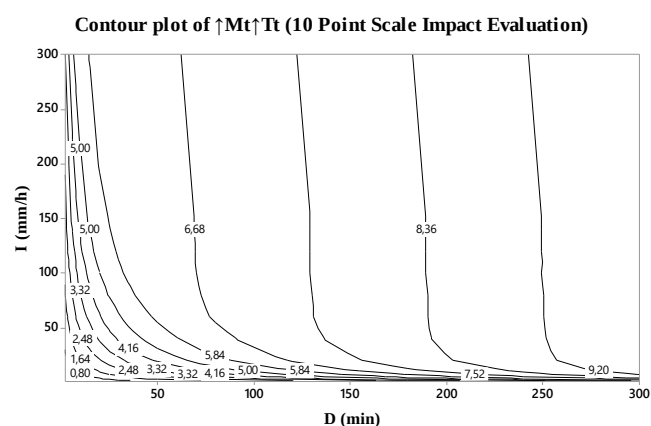
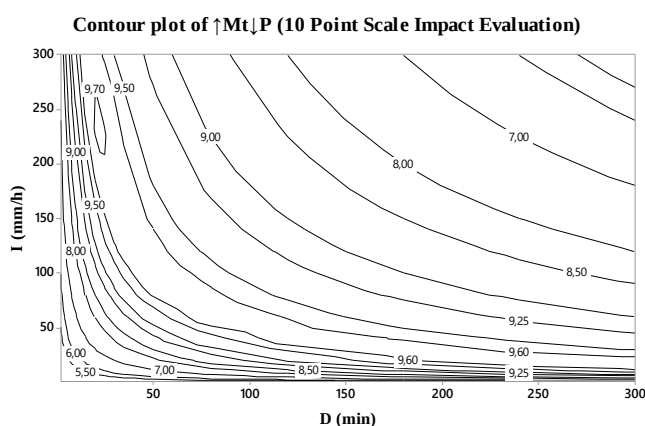
ANEXO

A4.9 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y DETERMINACIÓN ENTRE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CONTAMINANTE TS

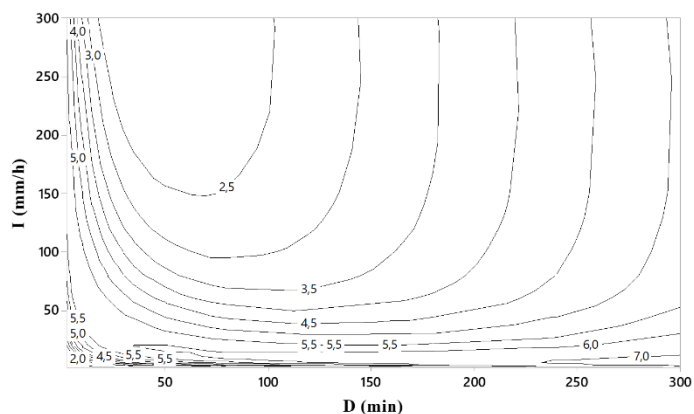
En esta carpeta se encuentra el libro Excel A4.9 COEFICIENTES DE CORRELACION Y DETERMINACION.xlsx con sus datos.

ANEXO

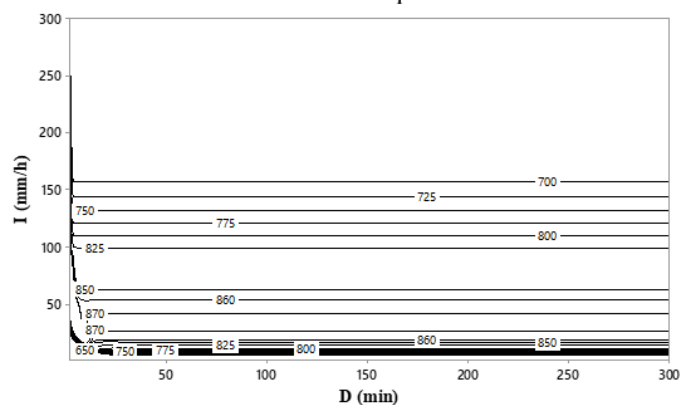
A4.10 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES IEV's PARA EL CONTAMINANTE TS



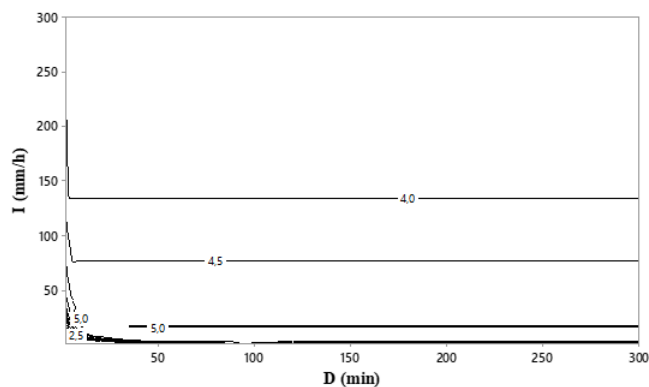
Contour plot of $\uparrow Cr_{Fm} \uparrow Tt$ (10 Point Scale Impact Evaluation)



Contour plot of Cr_{Fp} (mg/L)



Contour plot of $\uparrow Cr_{Fp} \uparrow 2 \cdot Tfp$ (10 Point Scale Impact Evaluation)



ANEXO

A5.1 HERRAMIENTA PARA GENERAR CURVAS M(V) CON DISTINTOS VALORES DE “b”

En esta carpeta se encuentra el libro Excel A5.1 HERRAMIENTA PARA GENERAR CURVAS M(V).xlsx como herramienta matemática para la obtención de datos y gráficos complementarios.

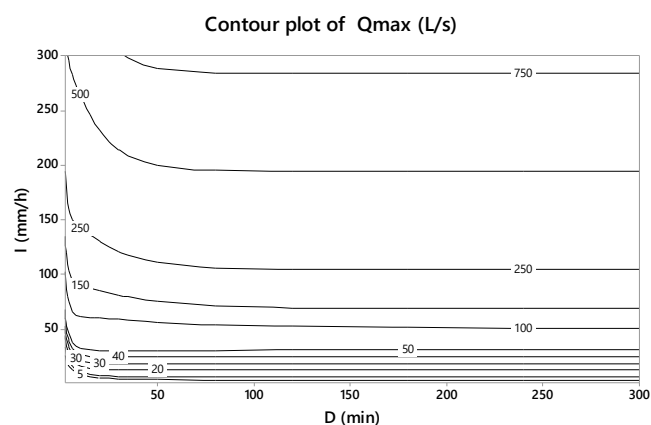
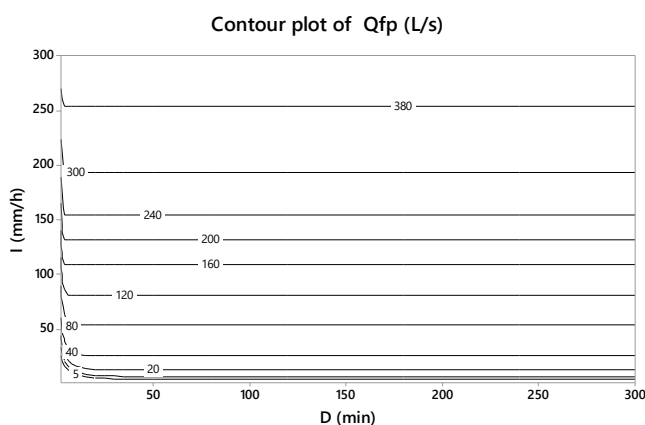
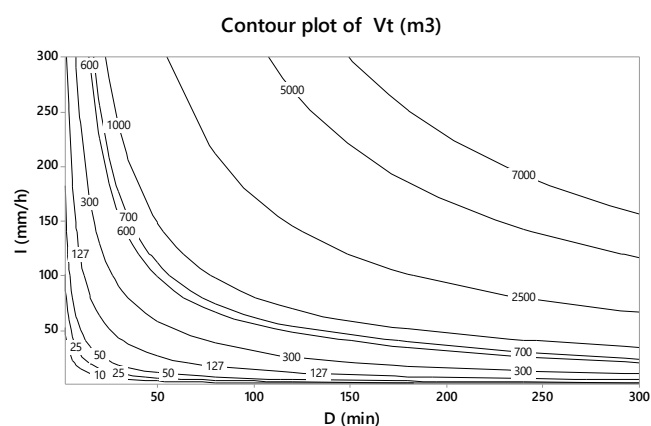
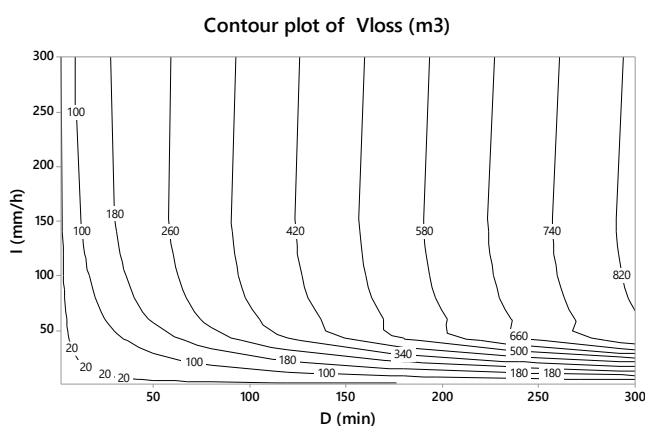
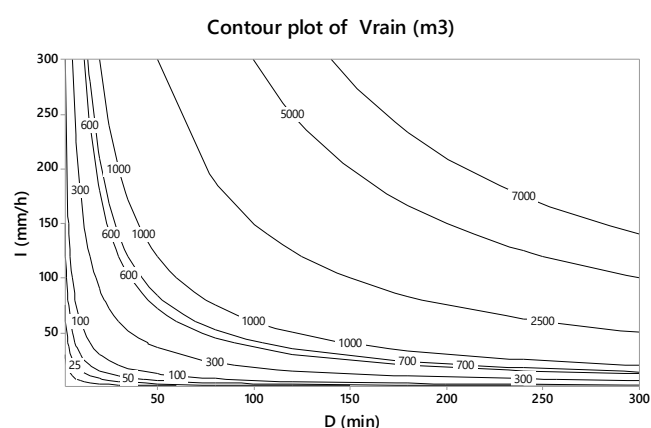
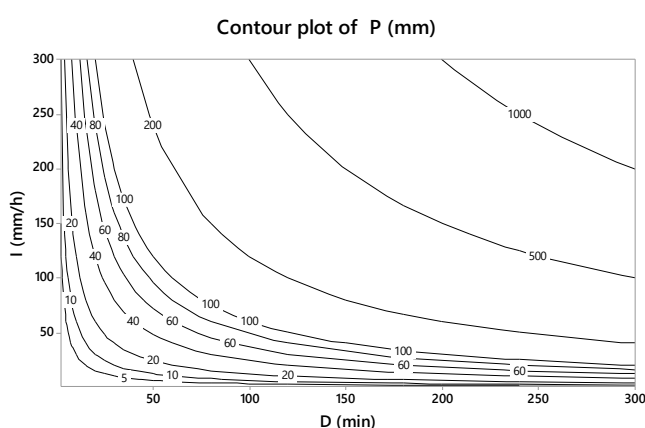
ANEXO

A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS

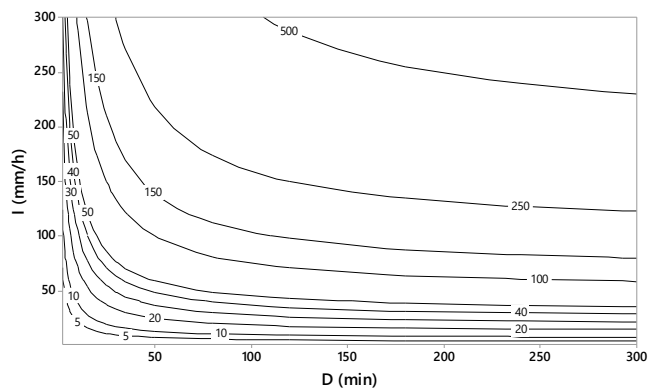
En esta carpeta se encuentra el libro Excel A5.2 VALORES DE VARIABLES DE CARACTERIZACION DEL PRIMER LAVADO.xlsx con sus datos.

ANEXO

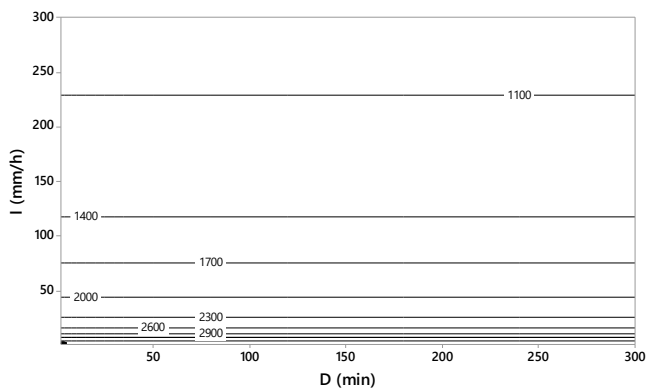
A5.3 GRÁFICOS DE CONTORNO DE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS



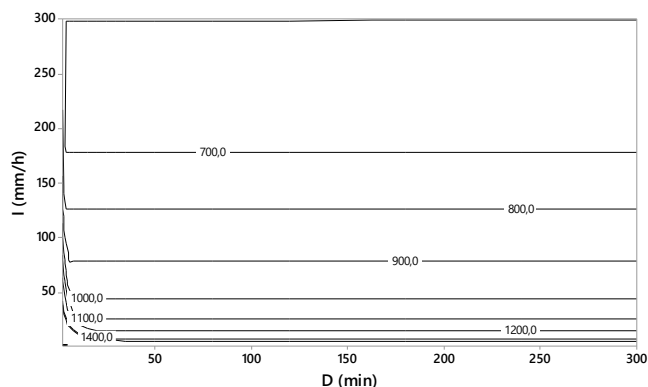
Contour plot of Q_{mean} (L/s)



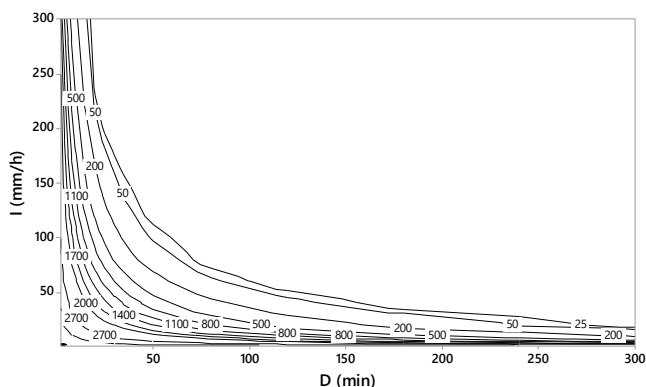
Contour plot of C_p (mg/L)



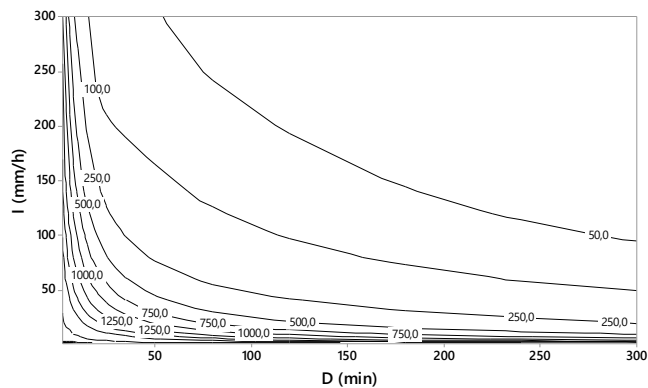
Contour plot of C_{fp} (mg/L)



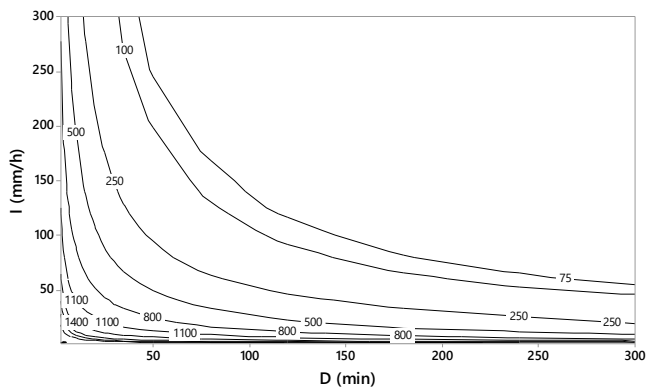
Contour plot of C_{last} (mg/L)



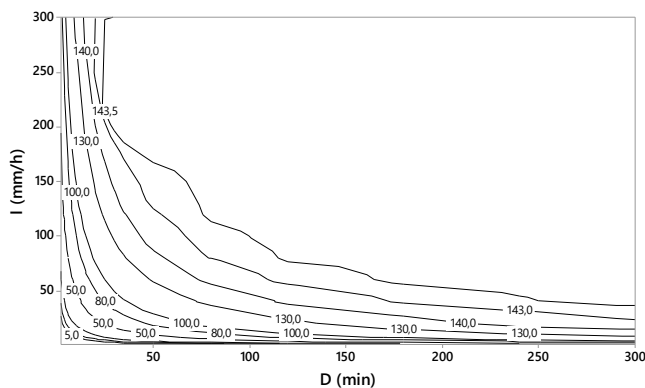
Contour plot of C_m (mg/L)



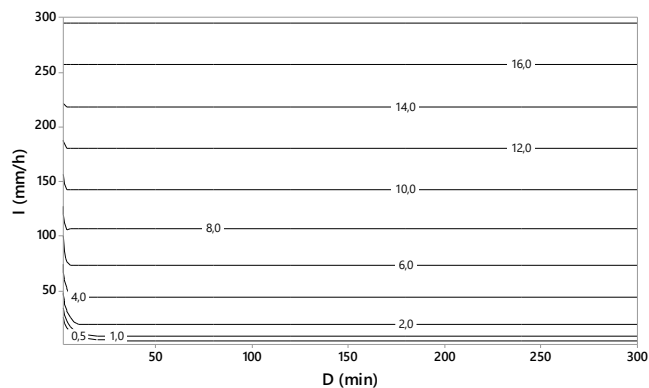
Contour plot of EMC (mg/L)



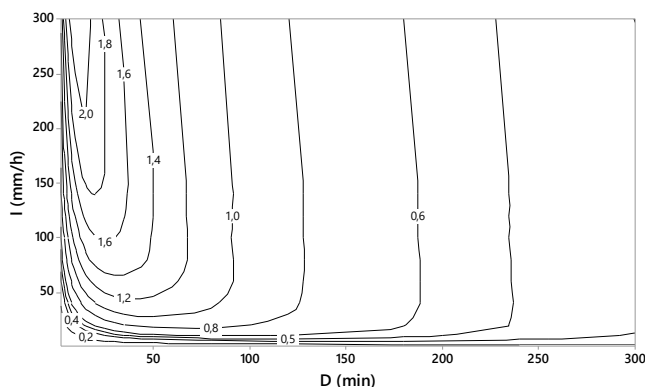
Contour plot of M_t (kg)



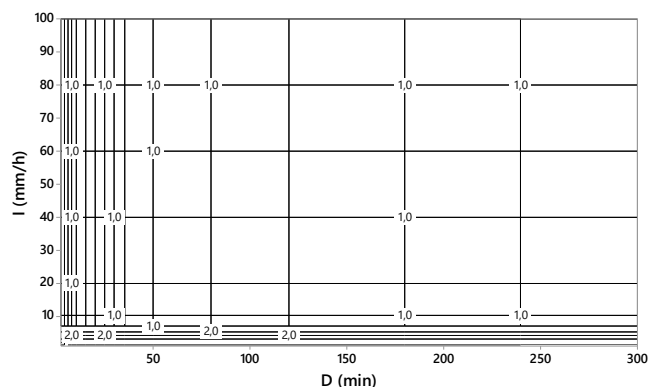
Contour plot of F_p (kg/min)



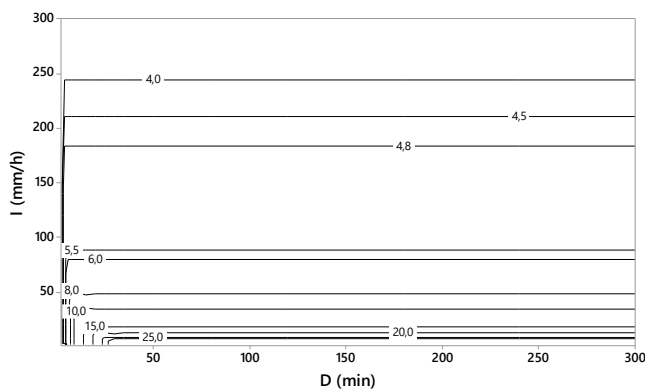
Contour plot of F_m (kg/min)



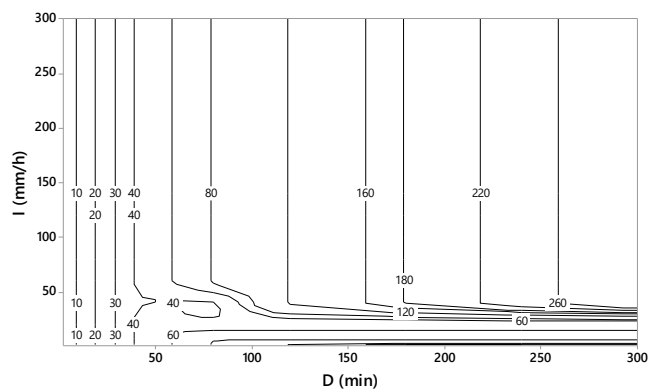
Contour plot of T_{cp} (min)



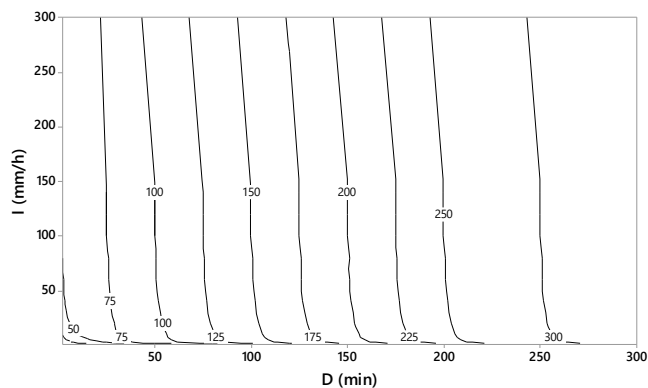
Contour plot of T_{fp} (min)



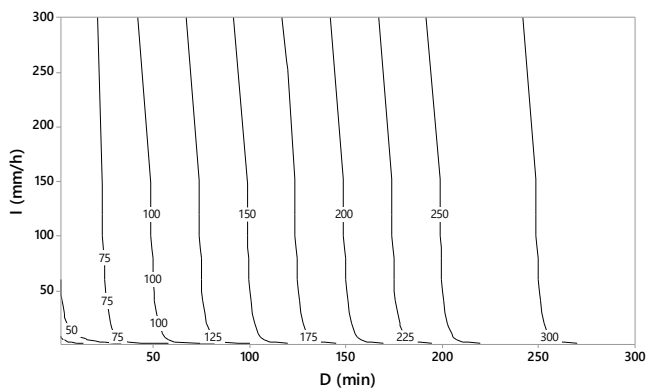
Contour plot of T_{qmax} (min)



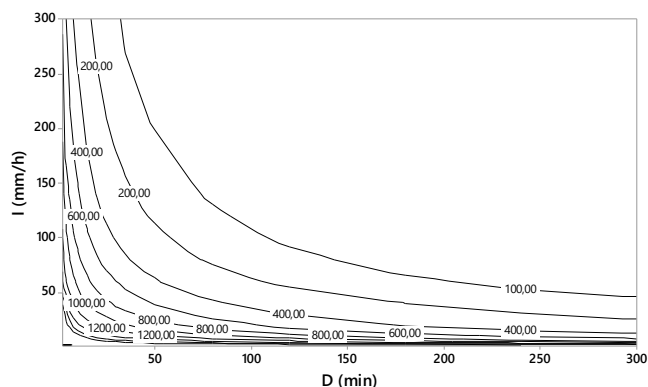
Contour plot of T_{clast} (min)



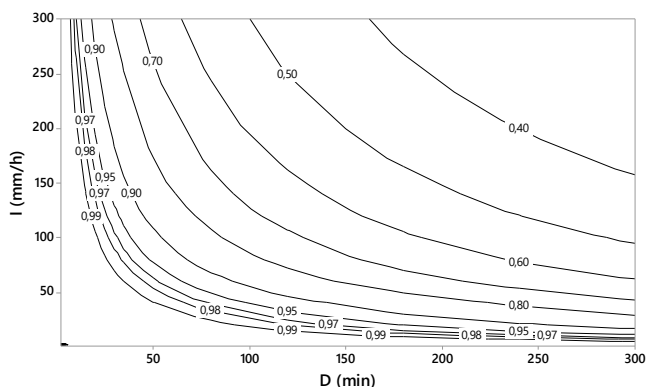
Contour plot of T_t (min)



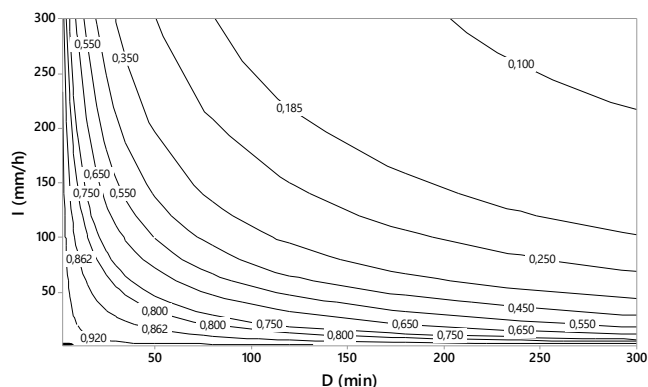
Contour plot of EMCT_{ff} (mg/L)



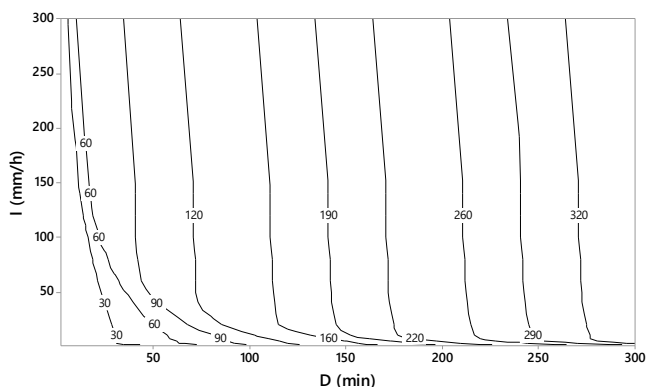
Contour plot of R₂MiMt



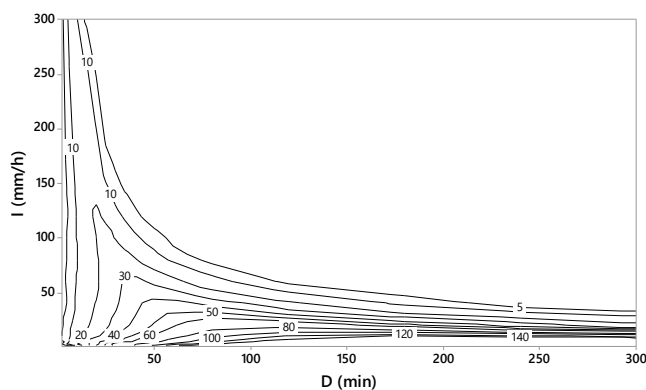
Contour plot of bMiMt



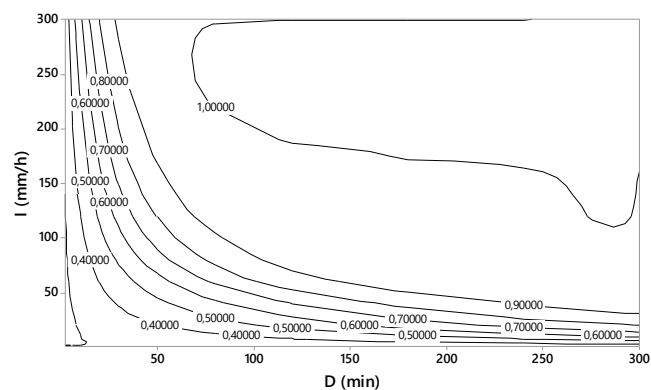
Contour plot of T_{ff} (min)



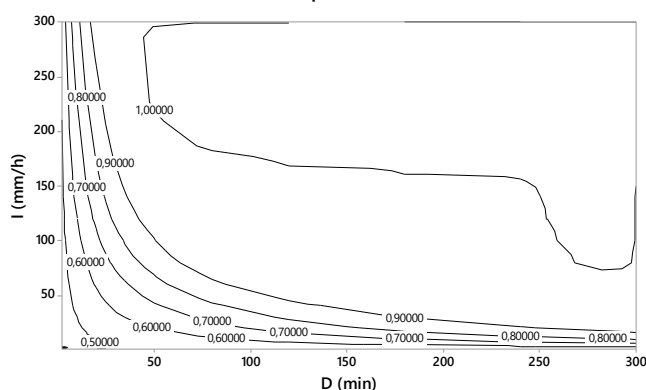
Contour plot of Tdose



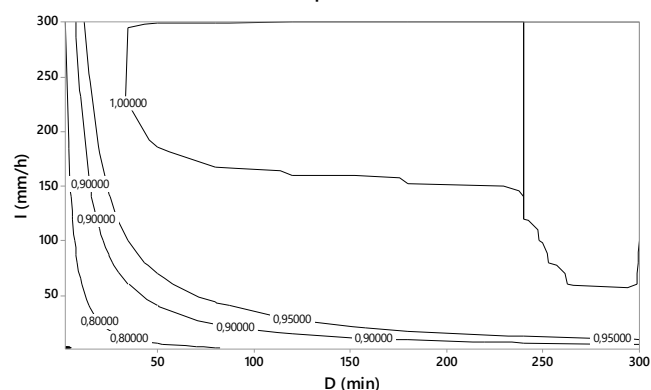
Contour plot of FF30



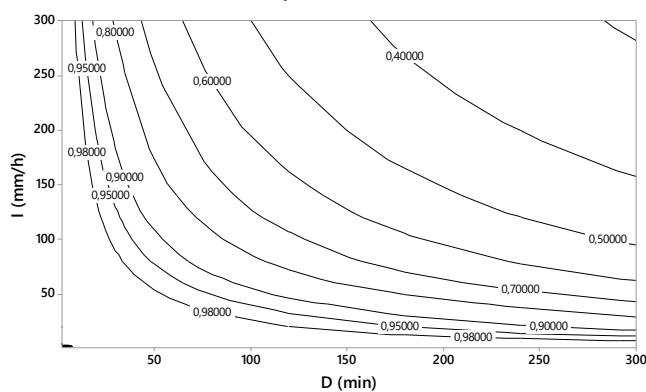
Contour plot of FF50



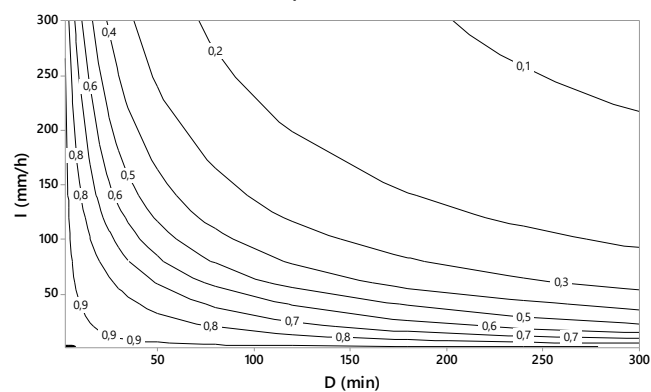
Contour plot of FF80



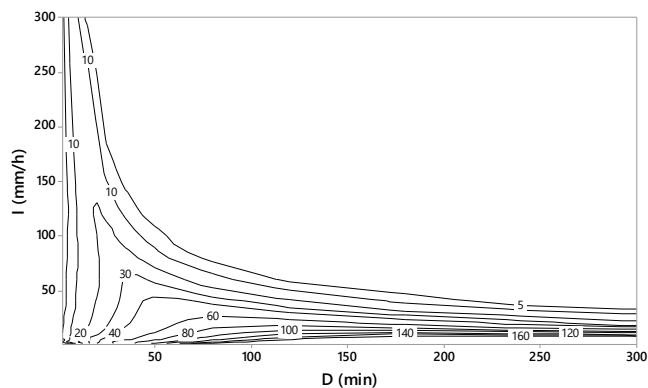
Contour plot of R2MiMtTff



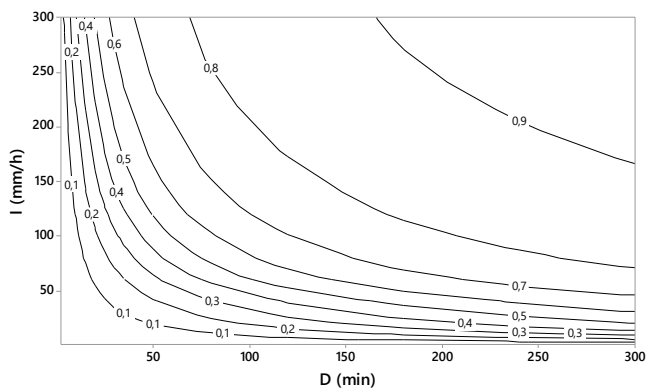
Contour plot of bMiMtTff



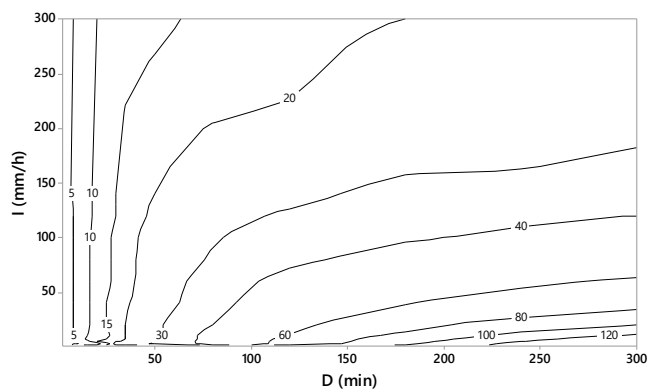
Contour plot of TdoseTff



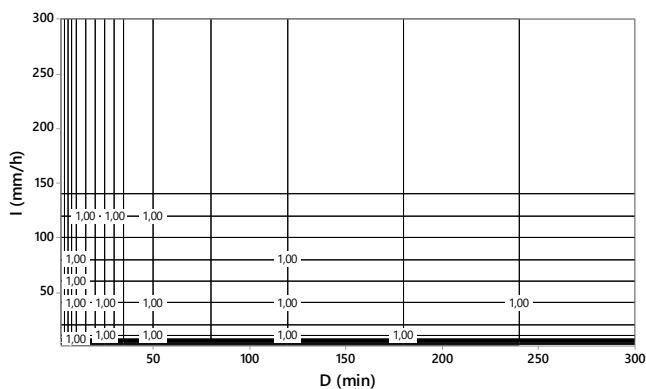
Contour plot of Maxgap



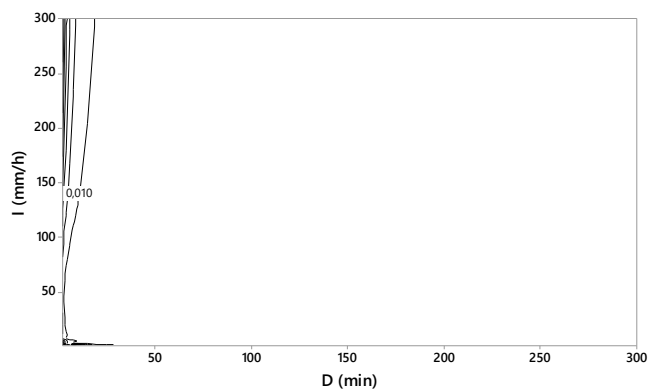
Contour plot of Tmaxgap (min)



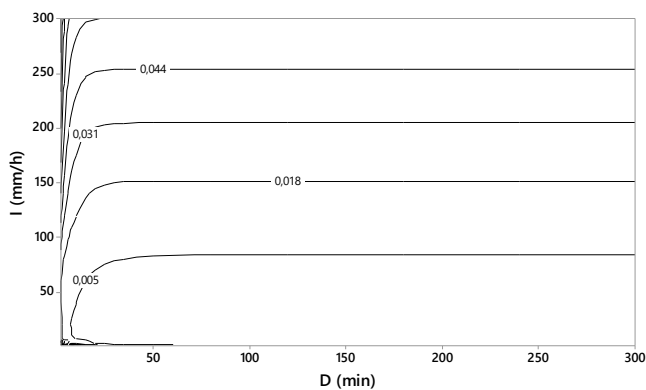
Contour plot of To (min)

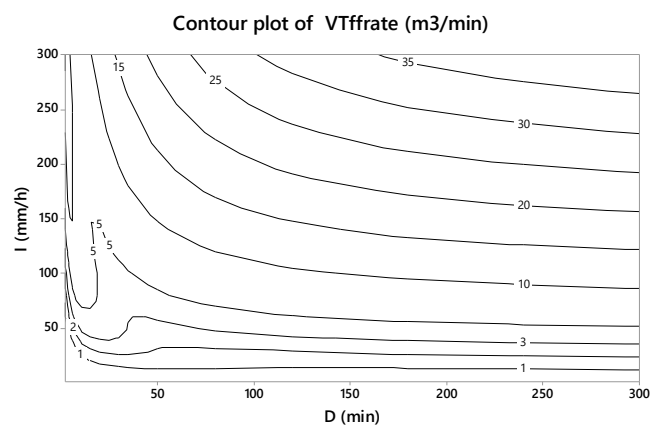
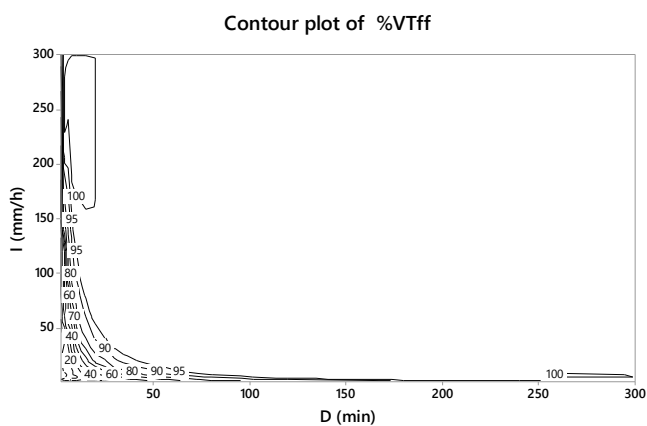
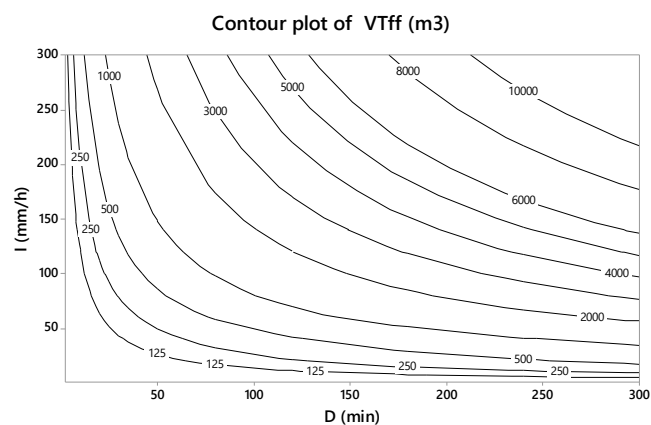
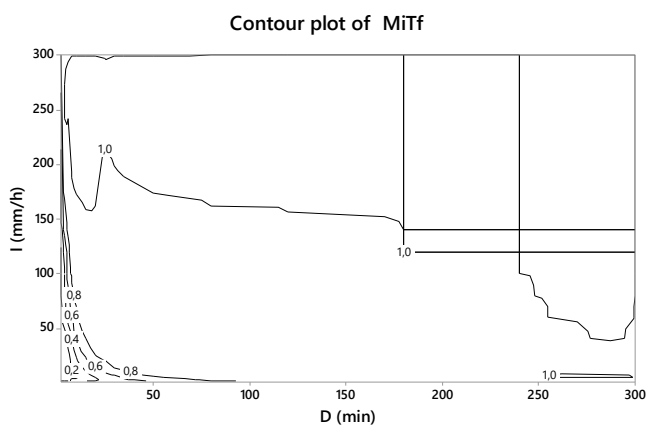
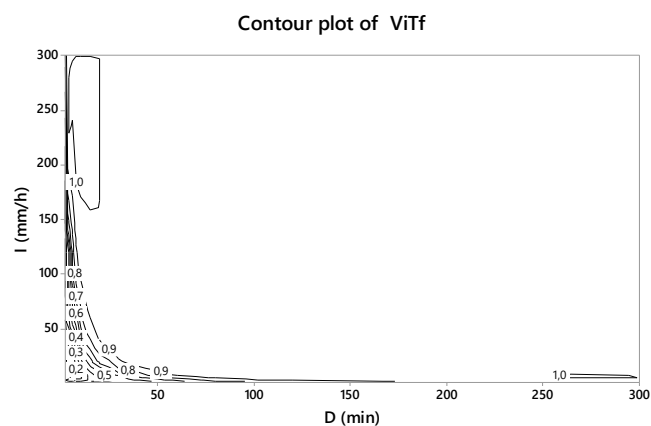
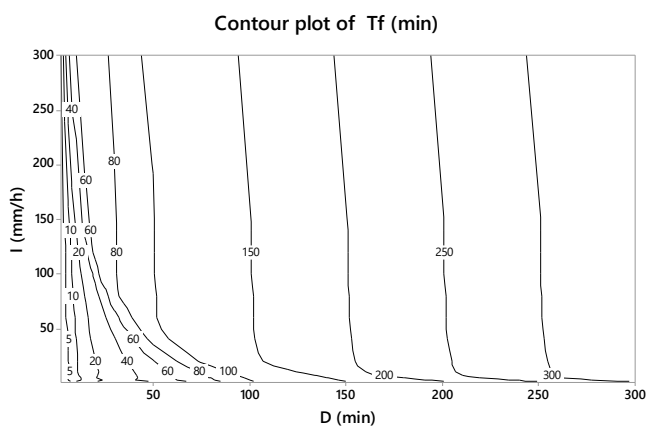


Contour plot of ViTo

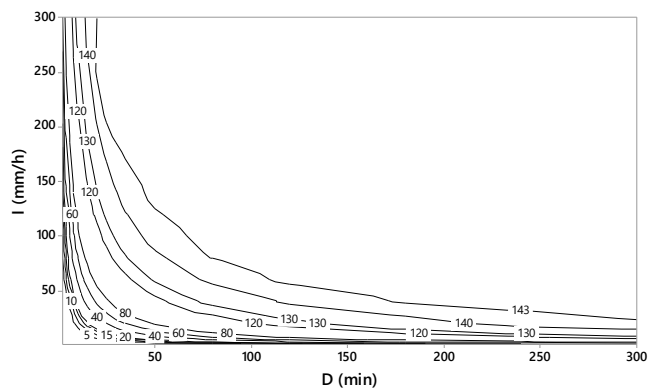


Contour plot of MiTo

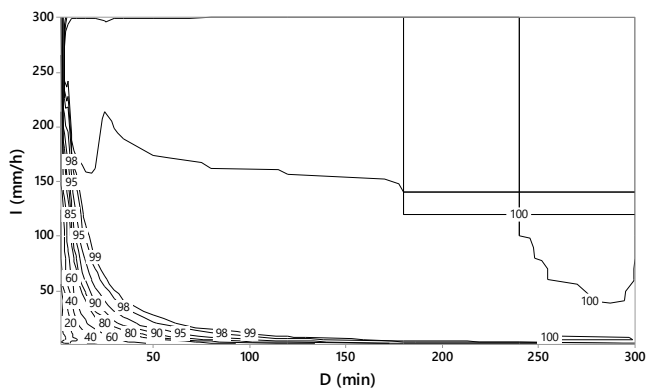




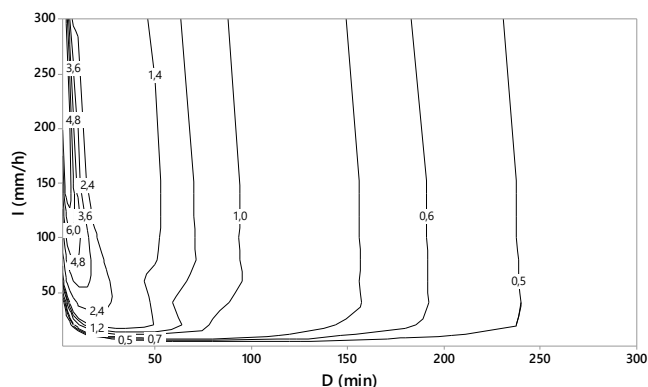
Contour plot of MTff (kg)



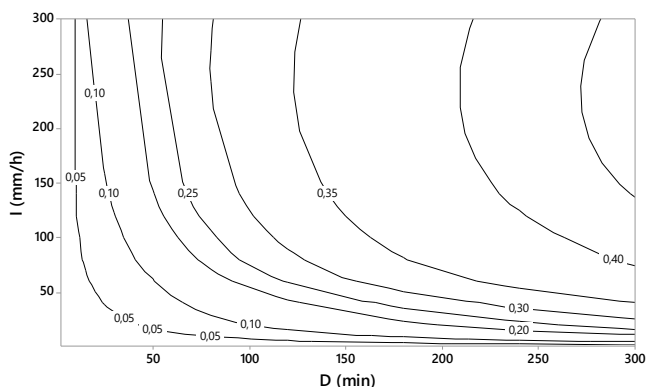
Contour plot of %MTff



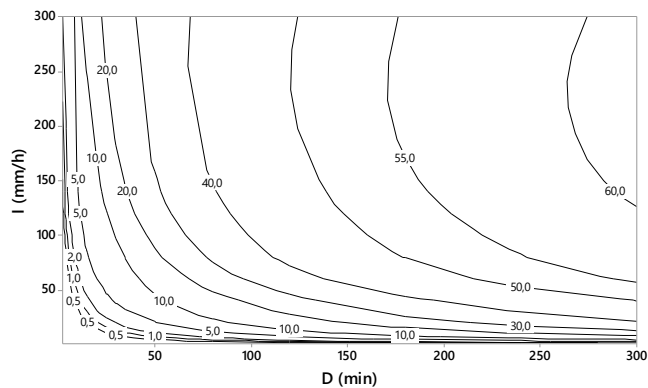
Contour plot of MTffrate (kg/min)



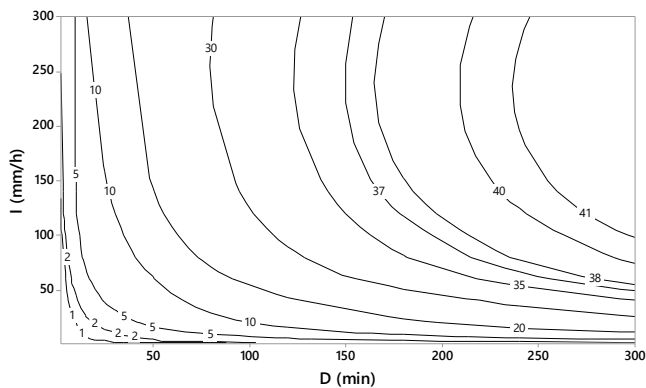
Contour plot of GapmeanTff(M)



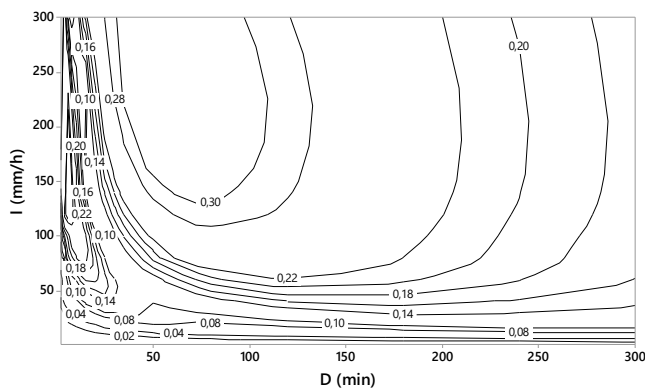
Contour plot of MassGapmean (kg)



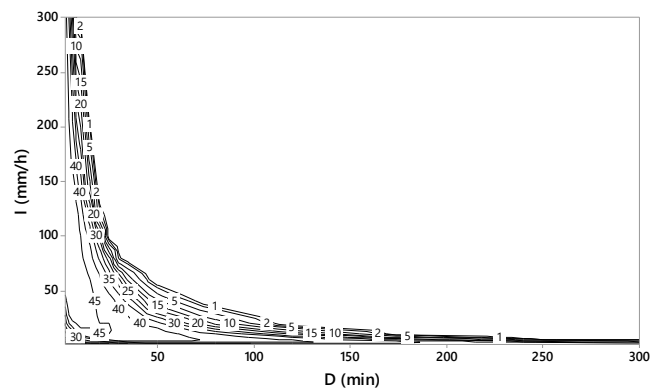
Contour plot of %MassGapmean



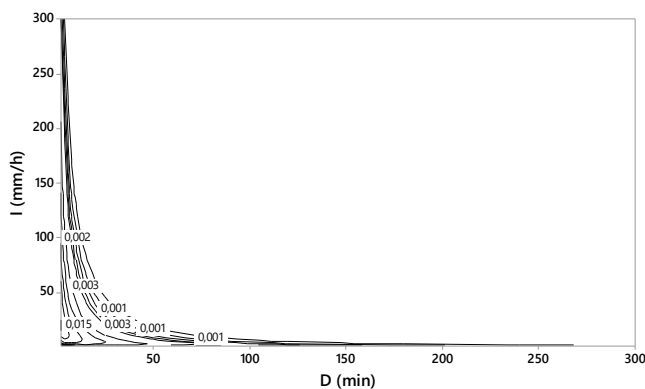
Contour plot of MassGapmeanrate (kg/min)



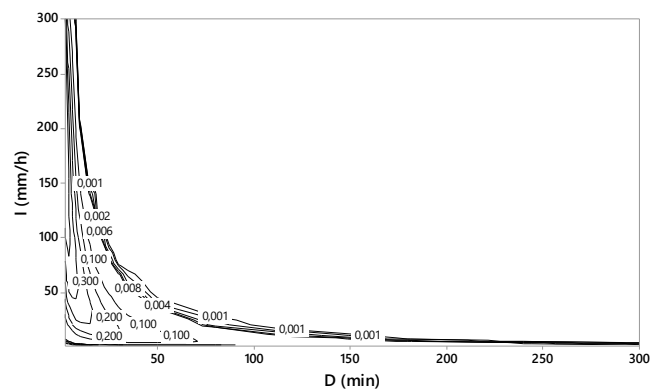
Contour plot of Tv (min)



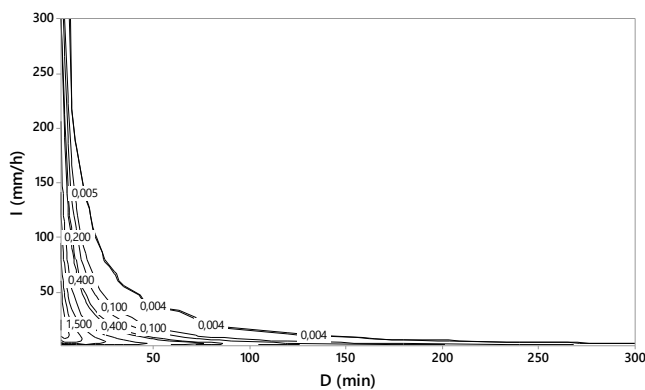
Contour plot of GapmeanTff(V)



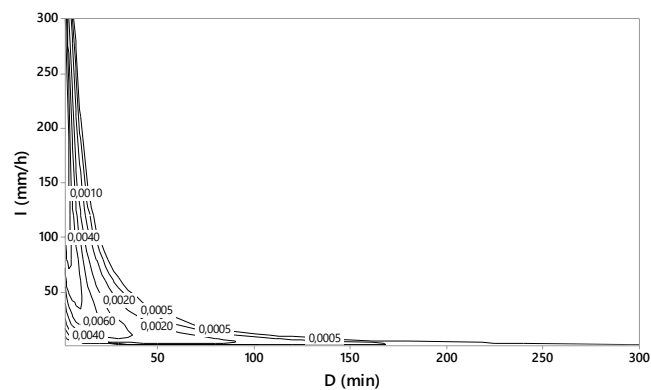
Contour plot of VolGapmean (m3)



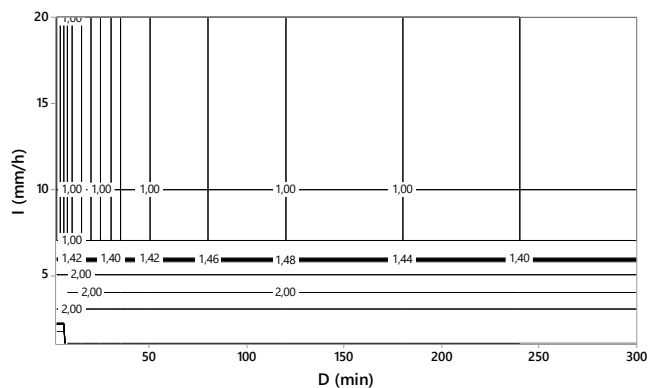
Contour plot of %VolGapmean



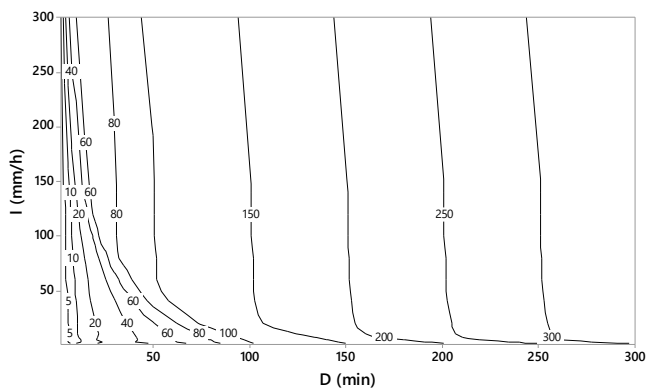
Contour plot of VolGapmeanrate (m3/min)



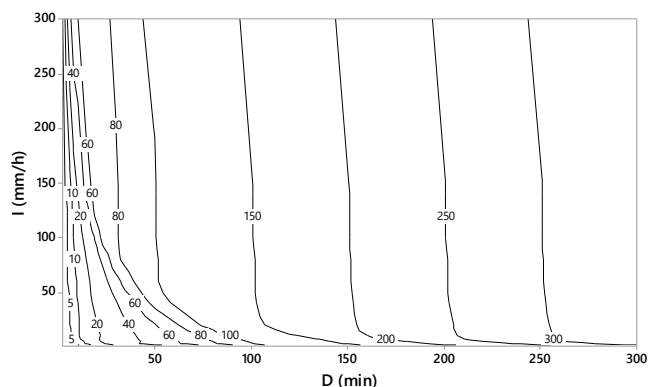
Contour plot of $To\theta$ (min)



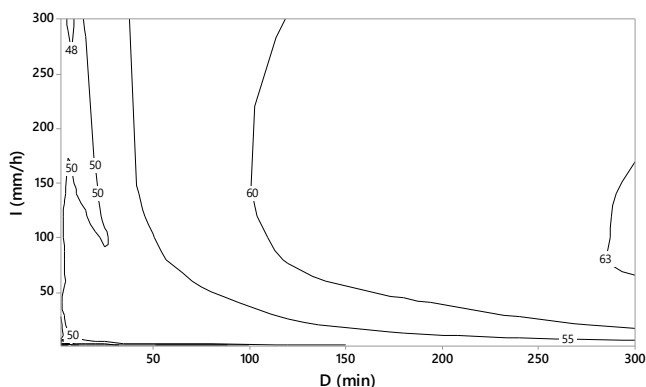
Contour plot of $Tf\theta$ (min)



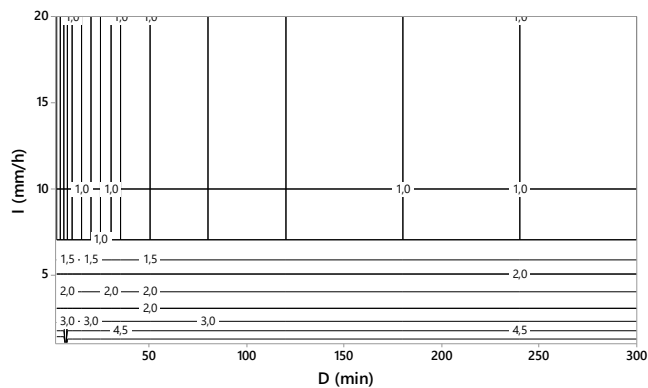
Contour plot of $Tff\theta$ (min)



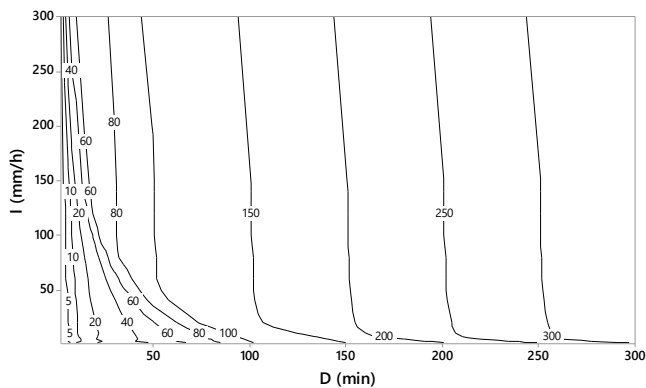
Contour plot of θ_{mean} (°)



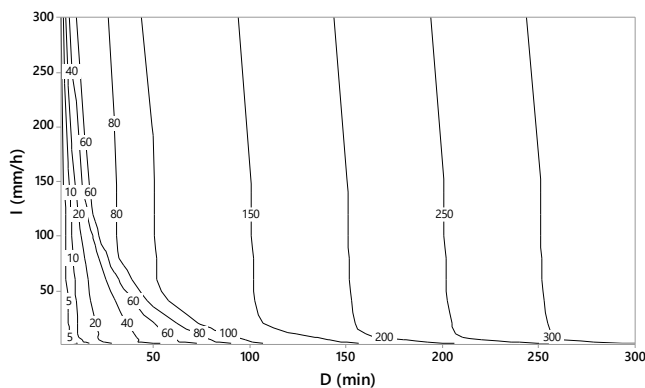
Contour plot of $ToDynEMC$ (min)



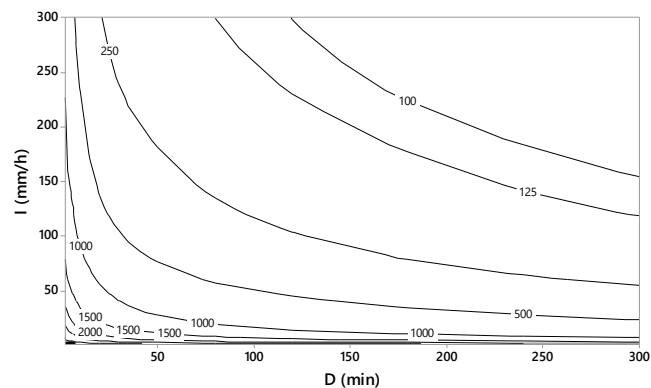
Contour plot of $TfDynEMC$ (min)



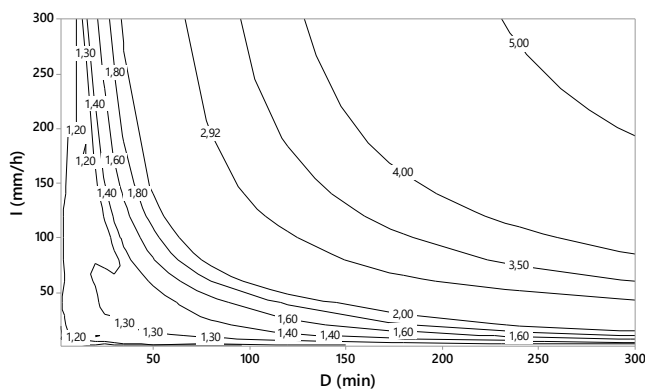
Contour plot of TffDynEMC (min)



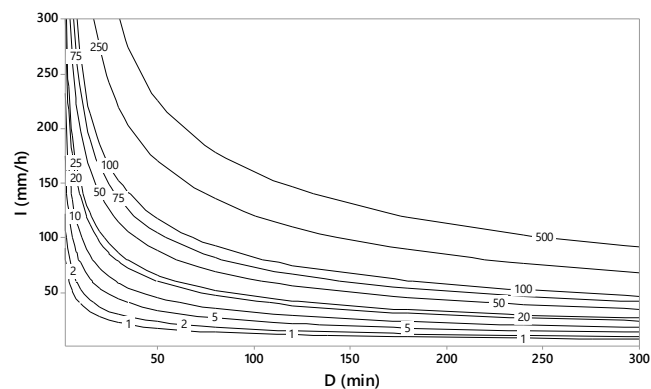
Contour plot of DynEMCmean (mg/L)



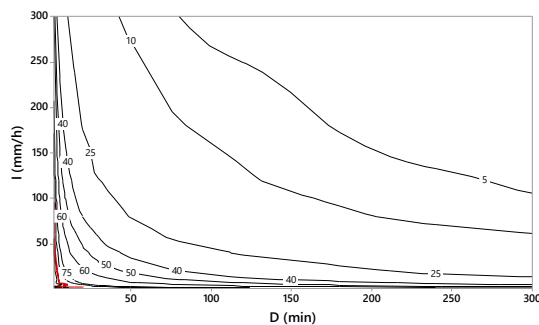
Contour plot of DynEMCmean/EMC



Contour plot of Tr (years)

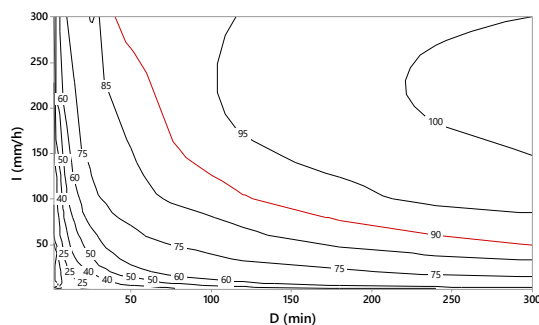


Percentile lines of bMiMt

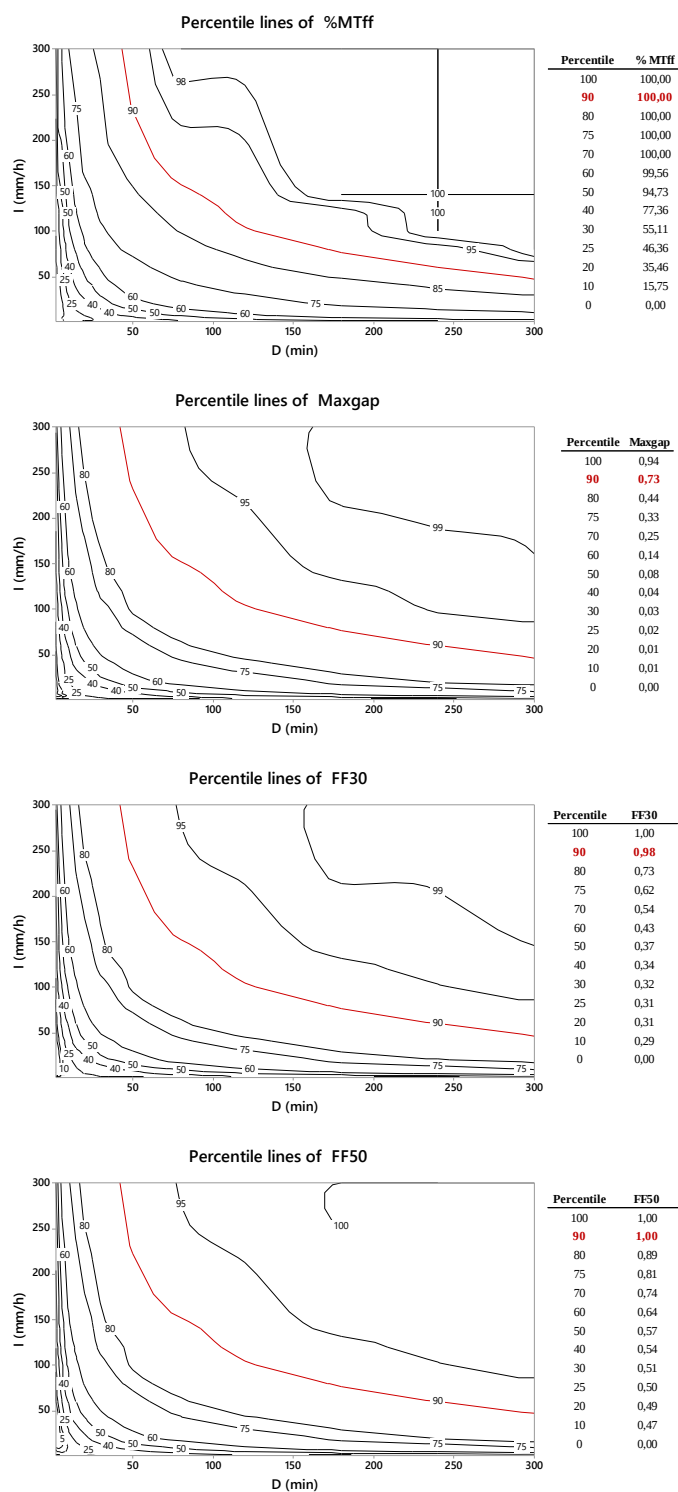


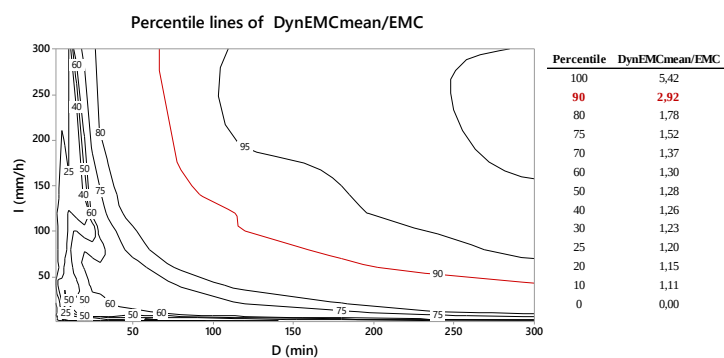
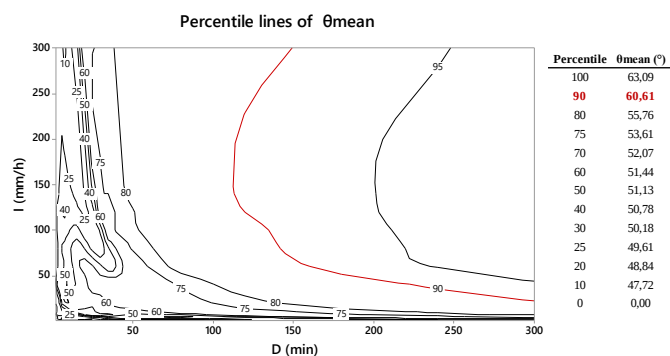
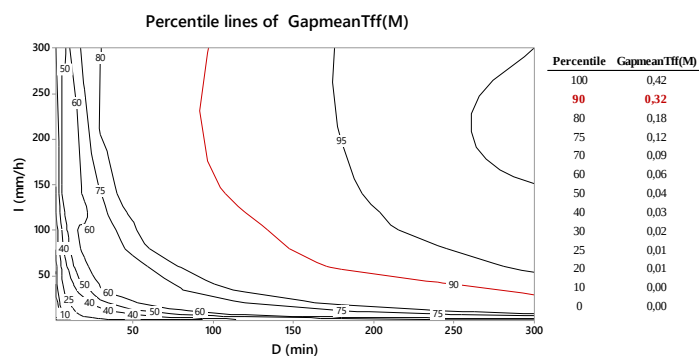
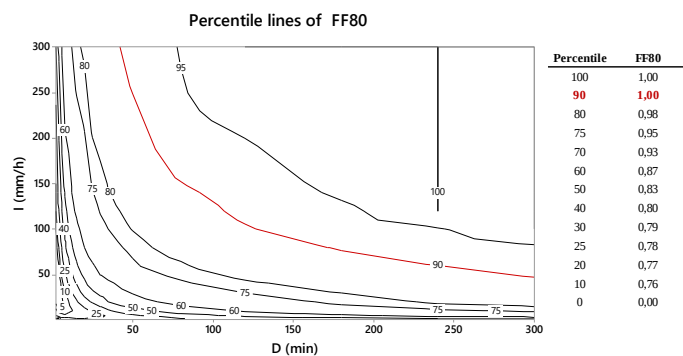
Percentile	bMiMt
100	1,02
90	0,97
80	0,94
75	0,92
70	0,91
60	0,89
50	0,85
40	0,80
30	0,69
25	0,62
20	0,50
10	0,27
0	0,00

Percentile lines of %VTff



Percentile	% VTff
100	100,00
90	100,00
80	100,00
75	100,00
70	100,00
60	99,56
50	94,63
40	77,25
30	55,04
25	46,22
20	35,14
10	15,65
0	0,00





ANEXO

A5.4 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN Y DETERMINACIÓN ENTRE VARIABLES DE CARACTERIZACIÓN DEL PRIMER LAVADO PARA EL CONTAMINANTE TS

En esta carpeta se encuentra el libro Excel A5.4 COEF.CORRELACION Y DETERMINACION VARIABLES PRIMER LAVADO.xlsx con sus datos.



PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN



ANEXO

ART-1 THEORETICAL ANALYSIS OF URBAN RUNOFF POLLUTOGRAPHS: IDENTIFICATION OF CHARACTERIZATION VARIABLES AND IMPACT

ARTÍCULO	Nº1
Título:	<i>Theoretical analysis of urban runoff pollutographs: identification of characterization variables and impact</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	Environmental Technology
JCR:	Q2
Año:	2022
Mes:	Abril
Estado:	Publicado
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	22
URL:	https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2059406

Jiménez, R., López, A., Lobo, A., & Tejero, I. (2023). Theoretical analysis of urban runoff pollutographs: identification of characterization variables and impact. *Environmental Technology*, 44(22), 3415-3436.

<https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2059406>

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/29995/TheoreticalAnalysUrban.pdf?sequence=3>

ANEXO

ART-2 SLOPE (θ_i) & TANGENT (Δ_i) OF THE CURVE $M(V)$ AS ALTERNATIVES FOR THE STUDY OF THE FIRST FLUSH

ARTÍCULO

Nº2

Título:	<i>Slope (θ_i) & tangent (Δ_i) of the curve $M(V)$ as alternatives for the study of the first flush</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	Environmental Modelling & Software
JCR:	Q1
Año:	2024
Mes:	Octubre
Estado:	Enviado a la revista. En revisión. (ID: ENVSOFT-D-24-01364)
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	-
URL:	-

De: em.envsoft.0.8ec09e.93e00a12@editorialmanager.com

<em.envsoft.0.8ec09e.93e00a12@editorialmanager.com> en nombre de Environmental Modelling and Software <em@editorialmanager.com>

Enviado: martes, 15 de octubre de 2024 09:12 a. m.

Para: Roberto Jiménez Gallardo <r-jimenezg@outlook.es>

Asunto: ENVSOFT-D-24-01364 - Confirming your submission to Environmental Modelling and Software

*This is an automated message. *

Slope (θ_i) & tangent (Δi) of the curve $M(V)$ as alternatives for the study of the first flush

Dear Mr. Jiménez Gallardo,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Environmental Modelling and Software. It has been assigned the following manuscript number: **ENVSOFT-D-24-01364**.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/envsoft/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Environmental Modelling and Software

FAQ: How can I reset a forgotten password?

https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/28452/supporthub/publishing/kw/editorial+manager/

ANEXO

ART-3 GAP, MI AND DYNAMIC EMC OF THE CURVE M(V) AS ALTERNATIVES FOR THE STUDY OF THE FIRST FLUSH

ARTÍCULO

Nº3

Título:	<i>GAP, MI and Dynamic EMC of the curve M(V) as alternatives for the study of the first flush</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	Water Resources Management
JCR:	Q1
Año:	2024
Mes:	Octubre
Estado:	Enviado a la revista. En revisión. (ID: WARM-D-24-01315)
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	-
URL:	-

De: em.warm.0.8cfa77.9085a418@editorialmanager.com

<em.warm.0.8cfa77.9085a418@editorialmanager.com> en nombre de Journals Editorial Office Water Resources Management <em@editorialmanager.com>

Enviado: viernes, 26 de julio de 2024 03:29 p. m.

Para: Roberto Jiménez Gallardo <r-jimenezg@outlook.es>

Asunto: WARM: New Submission Confirmation of "GAP, MI and Dynamic EMC of the curve M(V) as alternatives for the study of the first flush"

Dear Mr Jiménez Gallardo,

Thank you for submitting your article:

"GAP, MI and Dynamic EMC of the curve M(V) as alternatives for the study of the first flush"

to "Water Resources Management".

During the review process, you can keep track of the status of your article by accessing the EM web site.

We have sent an e-mail to all co-authors of this submission asking them to confirm their co-authorship. You can see the status of co-authorship confirmations under "Author Status" in your author main menu. Please check with your co-authors in case somebody does not confirm within reasonable time. In case of acceptance, a paper might not be published with outstanding co-author confirmations.

Your username is: RobertoJimenez

If you forgot your password, you can click the 'Send Login Details' link on the EM Login page at <https://www.editorialmanager.com/warm/>.

If your article is accepted for publication in Water Resources Management, you may elect to submit it to the "OpenChoice" program. For information about the "OpenChoice" program, please access:

<http://www.springer.com/openchoice>

Thank you very much.

With kind regards,

Journals Editorial Office WARM
Springer
P.O. Box 990
3300 AZ DORDRECHT
The Netherlands
Fax: +31 78 657 6555

ANEXO

ART-4 CHARACTERIZATION VARIABLES OF URBAN RUNOFF POLLUTOGRAPHS. FIRST FLUSH ANALYSIS AND IMPACT

ARTÍCULO

Nº4

Título:	<i>Characterization variables of urban runoff pollutographs. First flush analysis and impact</i>
Autores:	Roberto Jiménez, Ana López, Amaya Lobo & Iñaki Tejero
Revista:	-
JCR:	-
Año:	2024
Mes:	Octubre
Estado:	En revisión por parte del Director y la Tutora de Tesis.
Vol:	-
Issue:	-
Pags:	-
URL:	-