

130



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“CONTRIBUCIÓN DE ZONAS URBANAS COMO FUENTE NO PUNTUAL DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ALEJANDRO DE LA SOTA RIVA TORRES

DIRECTOR DE TESIS:
M.I. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ



MÉXICO, D.F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

130



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“CONTRIBUCIÓN DE ZONAS URBANAS COMO FUENTE NO PUNTUAL DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
ALEJANDRO DE LA SOTA RIVA TORRES

DIRECTOR DE TESIS:
M.I. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ



MÉXICO, D.F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2002



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/152/01

Señor
ALEJANDRO DE LA SOTA RIVA TORRES
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. ENRIQUE CESAR VALDEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

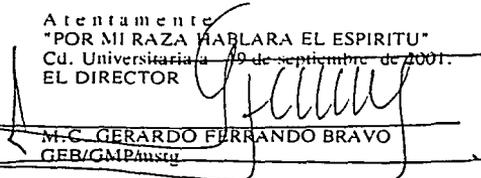
"CONTRIBUCIÓN DE ZONAS URBANAS COMO FUENTE NO PUNTUAL DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA"

- INTRODUCCIÓN
I. CONCEPTOS BÁSICOS
II. FUENTES DE CONTAMINACIÓN NO PUNTUAL
III. MODELO MATEMÁTICO DE DESCARGA DE UN ALCANTARILLADO PLUVIAL
IV. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO
V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 19 de septiembre de 2001.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GEB/GMP/instg

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	i
I. CONCEPTOS BÁSICOS	1
1.1 Calidad y contaminación del agua	2
1.2 Fuente de contaminación puntual	3
1.3 Fuente de contaminación no puntual	3
1.4 Control de la contaminación	4
II. FUENTES DE CONTAMINACIÓN NO PUNTUAL	
2.1 Zonas agrícolas	7
2.2 Áreas urbanas	10
2.3 Zonas de deforestación	12
2.4 Zonas de turismo náutico	14
2.5 Contaminación proveniente de la atmósfera	15
2.6 Actividades mineras	17
III. MODELO MATEMÁTICO DE DESCARGA DE UN ALCANTARILLADO PLUVIAL	19
3.1 Descripción general del modelo matemático	19
3.2 Modelo de escurrimiento del agua de lluvia	22
3.3 Modelo de lavado de contaminantes	26
3.4 Modelo de acumulación de contaminantes en la superficie de la cuenca	29
3.5 Modelo de transporte de agua de lluvia y contaminantes en una red de alcantarillado	31
IV. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO	35
4.1 Alcance del modelo y métodos de calibración y verificación	35
Localización y descripción de la cuenca estudiada	38
Estudios de campo	38
Resultados de la calibración	44
Análisis de sensibilidad del modelo	53
Aplicación del modelo a otras cuencas	60
V. CONCLUSIONES	62
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

INTRODUCCIÓN

Hasta hace pocos años, las principales preocupaciones respecto a la contaminación del agua estaban relacionadas con la transmisión de enfermedades causadas por bacterias o sustancias tóxicas presentes en el agua, con resultados negativos en la salud pública.

En los países desarrollados y altamente industrializados, cuyas poblaciones generalmente cuentan con servicios adecuados de abastecimiento de agua y disposición de residuos, estas preocupaciones han sido ampliamente superadas. Sin embargo, la descarga de residuos industriales sin tratamiento, provenientes de las grandes industrias, continúa siendo un problema.

Por otro lado, para los países en vías de desarrollo, donde los sistemas de abastecimiento de agua o disposición de residuos son limitados o inexistentes, la transmisión de enfermedades a través del uso de agua contaminada y otras rutas continúa siendo una gran preocupación.

Además de los efectos en la salud (como, por ejemplo, cuando se utilizan aguas contaminadas para el abastecimiento doméstico o irrigación de frutas y verduras), la contaminación también interfiere seriamente con otros usos, lo que puede afectar directamente al desarrollo económico de un país. Dependiendo del país o de una región específica, estos usos generalmente incluyen sectores como: industria, agricultura, recreación, pesca, protección de la fauna silvestre y navegación.

Las fuentes y la naturaleza de la contaminación, así como las características de las aguas receptoras, determinarán en gran medida los efectos de ésta y las medidas que deberán tomarse para su control.

Las fuentes no puntuales son aquellas de naturaleza difusa y que descargan sustancias contaminantes sobre amplias zonas de terrenos. Las principales fuentes de este tipo son las actividades agrícolas, silvícolas, constructivas y de extracción de minerales, así como los escurrimientos provenientes de zonas poco urbanizadas o sin servicio de alcantarillado.

Los contaminantes provenientes de las actividades agrícolas incluyen sedimentos, nutrientes, plaguicidas, cargas orgánicas y organismos patógenos. Su transporte se realiza mediante escurrimiento hacia las aguas superficiales, infiltración y penetración en aguas subterráneas, y vientos que los trasladan hasta las aguas superficiales.

Los contaminantes provenientes de las actividades de silvicultura, como la tala de árboles, son similares a los agrícolas; los sedimentos son los principales. Los sedimentos tienen una gran importancia, pues llevan hasta las aguas receptoras los residuos de plaguicidas y elementos nutritivos presentes en el suelo. También pueden causar problemas de azolvamiento en los cauces de las corrientes de agua y embalses. En cierta medida, se puede producir una contaminación térmica como resultado de la eliminación de las copas de los árboles que protegen a las corrientes de agua de la energía solar.

Las actividades de construcción también generan contaminación, éstas incluyen proyectos relacionados con transportes y comunicaciones, sistemas de energía, desarrollo de recursos hidráulicos y obras de recreación.

Las cantidades y los tipos de contaminación generada por las actividades de construcción dependerán del tipo y tiempo de duración del proyecto, de la ubicación y tamaño del área en construcción, de la resistencia de la superficie del terreno al deslizamiento y a la erosión por acción de la gravedad, el agua y el viento, de las propiedades químicas o la geología del suelo bajo la superficie del terreno y del número de personas y máquinas que participan en cada área de construcción.

Los escurrimientos provenientes de áreas sin urbanizar o sin alcantarillado pueden tener un papel significativo entre las denominadas fuentes no puntuales. Generalmente, en muchos de los países en vías de desarrollo, estas áreas constituyen enclaves urbanos ocupados por invasores, los que viven en lo que frecuentemente se denominan "barriadas" o "pueblos jóvenes". Estos pobladores han migrado de las áreas rurales hacia los centros urbanos y no cuentan con recursos financieros ni de otro tipo. Se crean nuevos asentamientos humanos en las barriadas ya existentes o en las áreas sin ocupar. Se construyen viviendas precarias con residuos de madera, metal u otros materiales. Estos asentamientos se crean indistintamente cerca o lejos de un río. Estas áreas rara vez cuentan con

alcantarillas u otras obras de ingeniería sanitaria, por lo que los desechos y otros tipos de residuos domésticos son descargados directamente, sin tratamiento alguno, en una corriente de agua o en el suelo, de donde pueden infiltrarse al subsuelo, o ser arrastrados hacia las aguas superficiales.

Objetivo general

El objetivo del presente trabajo es clasificar y describir las diversas fuentes de contaminación no puntual, así como el estado del arte en los estudios sobre esta materia realizados en los países desarrollados.

Objetivos específicos

- Clasificar y describir las diversas fuentes de contaminación no puntual existentes, así como explicar algunas de las medidas de mitigación para algunos casos.
- Investigar si existe alusión a este tipo de contaminación en la legislación ambiental de México.
- Presentar uno de los múltiples estudios que se están realizando sobre la materia en los países desarrollados.

Para el presente trabajo se consultó el acervo de la biblioteca de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, así como en sitios de internet. Al realizar dicha investigación y revisar la información existente en el país sobre las fuentes de contaminación no puntual, fue muy notorio el hecho de que aún no se ha considerado el tema en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, ni en la Ley de Aguas Nacionales, lo cual debe hacerse debido a la gran importancia de dichas fuentes.

El resultado de la investigación se presenta en cuatro capítulos.

En el Capítulo 1, titulado "CONCEPTOS BÁSICOS", se presentan las definiciones necesarias para comprender el contenido del presente trabajo.

En el Capítulo 2, titulado "FUENTES DE CONTAMINACIÓN NO PUNTUAL", se presenta la clasificación y descripción de las diversas fuentes de contaminación no puntual.

En el Capítulo 3, titulado "MODELO MATEMÁTICO DE DESCARGA DE UN ALCANTARILLADO PLUVIAL", se busca cumplir el segundo objetivo de este trabajo, el cual es mostrar uno de los múltiples estudios realizados sobre el tema en países desarrollados, en esta caso, se seleccionó un estudio realizado en Polonia acerca de la cantidad y calidad del agua en un sistema de alcantarillado pluvial localizado en la ciudad de Lodz.

En el Capítulo 4, titulado "CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO", se presentan los parámetros necesarios para realizar los cálculos del modelo y se

incluye un análisis de sensibilidad de los resultados finales respecto a dichos parámetros.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS BÁSICOS

Hasta hace pocos años, la mayor parte de los estudios sobre contaminación del agua se enfocaron al análisis de las descargas de aguas residuales, municipales e industriales, a los cuerpos naturales de agua para, posteriormente, determinar el impacto en la calidad del recurso y el tratamiento requerido por las descargas para favorecer el proceso natural de autodepuración. Al proceder de esta forma se obtiene una medida de la contaminación que se provoca en el sitio de la descarga, lo que la define como una fuente de contaminación puntual. Sin embargo, el análisis no considera los efectos producidos por fenómenos naturales y actividades humanas en el entorno del lugar en el que se descarga, sino solamente los debidos a dicha descarga. En consecuencia podemos definir a las fuentes de contaminación no puntual como aquellas que consideran la contribución de toda una zona de la cuenca al sitio que nos interesa y, de manera muy particular, este concepto se aplica a la contaminación generada por el lavado y el escurrimiento debidos a la lluvia.

En general, la contaminación no puntual no fue reconocida sino hasta finales de los años 1960's. La erosión en áreas no urbanas no se consideraba perjudicial para la agricultura hasta que se presentaron las tormentas de arena de los años 1920's y 30's en los Estados Unidos de América. Desde entonces se implantaron programas de conservación del suelo y el agua en ese país, que permitieron mitigar la erosión del suelo por aire y por agua.

Las investigaciones recientes en la materia muestran que el tratamiento de descargas de aguas residuales municipales e industriales no es suficiente para obtener grandes mejoras en la calidad del agua de los cuerpos receptores, especialmente lagos, vasos de presas, estuarios y ríos, ya que muchos cuerpos de agua reciben cargas importantes de contaminantes de otras fuentes, además de las descargas de aguas residuales municipales e industriales, principalmente de fuentes relacionadas con el uso que el hombre le da a la tierra y con los procesos naturales que se presentan en la cuenca, tales como la lluvia y el escurrimiento.

En otros países, Suiza, Alemania y los escandinavos, por ejemplo, se le ha dado una gran importancia a la clasificación y control de la contaminación no puntual y particularmente en Suiza se han implantado programas de mitigación no puntual que incluyen la modificación de drenajes en los tejados, almacenamiento y tratamiento químico del agua de lluvia, tratamiento de las corrientes superficiales y otras técnicas de control. La Universidad Técnica de Dinamarca en Copenhague se ha incorporado al programa y todos los pavimentos y áreas abiertas son diseñadas para maximizar la infiltración con el uso de pavimento permeable, pavimento enrejado y vegetación, y en Suecia se practicó la partición de un lago para almacenar y posteriormente tratar el agua de lluvia.

La Agencia de Protección al Ambiente (EPA) de los Estados Unidos de América ha patrocinado numerosos proyectos de investigación que han contribuido a incrementar el conocimiento referente al problema creciente de la contaminación no puntual y su control. Se han estudiado y monitoreado muchas cuencas y actualmente se está utilizando la información obtenida para desarrollar nuevas técnicas de mitigación y control.

1.1 Calidad y contaminación del agua

El término calidad se refiere a la composición que tiene el agua como consecuencia de procesos naturales o actividades humanas, expresada en términos de cantidades medibles y relacionadas con el uso deseado para ella.

La contaminación puede definirse como un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, suelo y agua, que afecta o puede afectar de manera perjudicial a la vida humana o la de otras especies, así como sus condiciones de vida o que puedan devastar o deteriorar nuestros recursos naturales. Otra definición de contaminación, más simple que la anterior, expresa que la contaminación del agua es la adición de sustancias ajenas a su composición natural.

La calidad y la contaminación del agua son determinadas por medio de la medición de parámetros físicos, químicos, biológicos, microbiológicos y radiológicos que son comparados con parámetros estándar basados en afluentes o arroyos que presentan condiciones deseables o que aún no hayan sido afectados, así como en un criterio de importancia basado en la peligrosidad de las

sustancias que se presentan. Tales criterios y parámetros deben ser fijados por la autoridad correspondiente.

1.2 Fuente de contaminación puntual

Una fuente de contaminación puntual es aquella que envía los contaminantes a un lugar identificable y discreto (desde el punto de vista matemático); generalmente pueden ser medidos y su impacto puede ser evaluado directamente. La mayor parte de estas fuentes son los efluentes de aguas residuales industriales y de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

1.3 Fuente de contaminación no puntual

Se pueden definir como fuentes de contaminación no puntuales o difusas de un sitio a aquellas que involucran los efectos de toda una zona sobre dicho lugar; este concepto se aplica particularmente a los efectos que tiene una cuenca sobre la contaminación de los cuerpos de agua, considerando los usos que el hombre le da a la tierra y los procesos naturales que ocurren en dicha cuenca.

La contaminación por fuentes no puntuales, a diferencia de la contaminación debida a las descargas de aguas residuales industriales y municipales, proviene de varias fuentes difusas. Es causada por la lluvia y la nieve derretida que al moverse de manera superficial y subterránea levanta y arrastra contaminantes, tanto naturales como creados por el hombre, depositándolos finalmente en los lagos, ríos, pantanos, costas e incluso en los acuíferos que se utilizan como fuentes de abastecimiento para la población. Entre estos contaminantes se incluyen:

- Fertilizantes, herbicidas e insecticidas de tierras agrícolas y áreas residenciales.
- Aceites, grasa y sustancias químicas de los pavimentos y de la producción de energía.
- Sedimentos de sitios de construcción manejados inapropiadamente, tierras de cultivo, bosques y del lecho de ríos y arroyos.
- Sal proveniente de prácticas de irrigación y drenaje ácido de minas abandonadas.
- Bacterias y nutrientes del ganado, desperdicios de mascotas y sistemas sépticos con falta de mantenimiento

Se estima que las fuentes de contaminación no puntuales representan más del 50% del total del problema del deterioro de la calidad del agua. Actualmente dichas fuentes se empiezan a reconocer e investigar a nivel internacional y en varios aspectos, tales como el escurrimiento en tierras de cultivo, agua de lluvia en zonas urbanas y en sitios de construcción, son un problema de contaminación cada vez mayor.

El problema de la contaminación no puntual es mucho más complejo que el de la contaminación puntual, ya que además de involucrar los parámetros de sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), oxígeno disuelto (OD) y cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), que se utilizan comúnmente como indicadores de contaminación, involucra otros elementos tales como la muerte de los peces debida a un incremento en la temperatura del agua, lluvia ácida y contaminación de la superficie del agua y fauna acuática debido a los pesticidas que se emplean en las tierras de cultivo y que la lluvia arrastra hacia los cuerpos de agua.

Existen varias características generales que describen la contaminación por fuentes no puntuales:

- Las descargas de las fuentes no puntuales llegan a las aguas superficiales de manera difusa y a intervalos intermitentes que están relacionados en su mayoría con la ocurrencia de fenómenos meteorológicos.
- Los contaminantes se levantan de una gran extensión de tierra y transitan sobre ella antes de alcanzar los cuerpos de agua.
- Las fuentes no puntuales generalmente no pueden ser monitoreadas en un punto de origen y la misma fuente es muy difícil o imposible de determinar.
- La eliminación o control de contaminantes debe ser dirigida a sitios específicos.
- En general, las técnicas de control más efectivas y económicas son de dos tipos: de manejo y conservación de la tierra en zonas rurales y de control arquitectónico en zonas urbanas
- La cantidad de contaminantes llega a ser monitoreada más fácilmente en la tierra que en el agua.
- Los contaminantes no pueden ser medidos en términos de déficit en los efluentes.
- La extensión de la contaminación no puntual está relacionada, en parte, con eventos climáticos incontrolables, así como con circunstancias climáticas y geográficas y pueden variar enormemente de un sitio a otro o de un año a otro.
- La contaminación no puntual se deriva de operaciones consecutivas en grandes extensiones de tierra, a diferencia de las actividades industriales, que generalmente ocupan pequeñas extensiones de tierra.

1.4 Control de la contaminación

El control de la contaminación del agua se refiere a regular la cantidad de contaminantes provenientes de descargas individuales (fuentes puntuales) o de un área determinada (fuente no puntual) que se concentran en los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos, incluyendo los contaminantes derivados de zonas urbanas, pastizales, áreas agrícolas y otros provenientes del uso de la tierra. Los propósitos de un programa de control de la contaminación son los siguientes:

1. Proteger la capacidad de las aguas superficiales para asimilar la contaminación sin ser dañadas o perjudicadas.
2. Proteger la flora y la fauna existentes.
3. Preservar o restaurar los valores estéticos y recreativos de las aguas superficiales.
4. Proteger la salud pública de condiciones adversas en la calidad del agua.

CAPÍTULO 2

FUENTES DE CONTAMINACIÓN NO PUNTUAL

En este capítulo se realizará el estudio y análisis de las diferentes fuentes de contaminación no puntual y se destacarán las diferencias entre fuentes de contaminación puntuales y no puntuales.

Las principales diferencias entre fuentes puntuales y no puntuales se resumen en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 Características de las fuentes de contaminación puntuales y no puntuales

Fuentes puntuales	Fuentes no puntuales
Flujo regular y constante; los rangos de variación son menores a un orden de magnitud.	Flujo muy dinámico en intervalos intermitentes; los rangos de variación son de varios órdenes de magnitud.
El impacto más severo se da durante el periodo de estiaje, en verano.	El impacto más severo se presenta durante la época de lluvias.
Entra al cuerpo receptor en puntos identificables.	El punto de entrada no puede ser identificado o definido.
Los parámetros principales de interés son DBO, oxígeno disuelto, nutrientes y sólidos suspendidos.	Los parámetros principales de interés son los sedimentos, nutrientes, sustancias tóxicas, pH y oxígeno disuelto.

Las principales fuentes de contaminación no puntual son:

- Los terrenos agrícolas
- Las áreas urbanas
- Las zonas deforestadas
- Las zonas de turismo náutico

2.1 Zonas agrícolas

El principal objetivo de la agricultura es el de producir una cantidad abundante de alimentos de alta calidad a un bajo costo y entregarlos eficientemente al consumidor; sin embargo, casi no han sido considerados los efectos que las actividades agrícolas realizadas inapropiadamente pueden tener sobre la calidad del agua.

La contaminación no puntual producida por los terrenos agrícolas se debe principalmente al arrastre de nutrientes provenientes de los desechos de animales, pesticidas y fertilizantes utilizados en las actividades agrícolas. Los contaminantes derivados de dichas actividades representan el contribuyente líder en el impacto provocado en ríos y lagos y el tercero en importancia para el caso de los estuarios.

Los programas de control que se han implantado en los países con avances en la materia, son para el manejo de la sedimentación, de los nutrientes, de la irrigación, de pesticidas y del confinamiento de animales.

Manejo de la sedimentación. La sedimentación ocurre cuando el viento o el escurrimiento arrastran partículas del suelo de un área y los transporta a un cuerpo de agua, como ríos o lagos. La sedimentación excesiva enturbia el agua, reduciendo la cantidad de luz solar que llega a las plantas acuáticas, además de cubrir el alimento de los peces y las áreas donde van a desovar y atascar sus branquias. Junto con estas partículas de suelo, se arrastran otros contaminantes como fósforo, microorganismos patógenos y metales pesados que se encuentran adheridos a dichas partículas y se sedimentan con ellos.

Los campesinos y granjeros pueden reducir la erosión y la sedimentación entre un 20% a un 90% si se les enseña a controlar el volumen de agua que escurre o que se deja correr innecesariamente, a mantener el suelo en su lugar y reducir su transporte.

Manejo de los nutrientes. Para mejorar la productividad se aplican nutrientes tales como fósforo, nitrógeno y potasio que se encuentran en forma de fertilizantes, estiércol, lodo, agua de riego, y residuos de cultivo. Cuando se aplican en exceso, es decir, más allá de las necesidades de las plantas, los nutrientes son arrastrados hacia ecosistemas acuáticos donde provocan un excesivo crecimiento de las plantas, lo cual reduce las posibilidades de nadar o navegar en el sitio y mata a los peces. En agua para consumo humano, dan un

sabor y olor desagradables y las altas concentraciones de nitratos puede causar una enfermedad potencialmente fatal en los niños, conocida como el síndrome del bebé azul (metahemoglobinemia).

Manejo de la irrigación. El agua de riego es aplicada para suplir a la precipitación natural o para proteger al cultivo de congelamiento o marchitamiento. El riego ineficiente puede ocasionar problemas en la calidad del agua. En áreas áridas, donde el agua de lluvia no arrastra residuos a gran profundidad en el suelo, el riego excesivo puede concentrar pesticidas, nutrientes, microorganismos y sales, que impactan el agua en la capa superior del suelo. Se puede reducir la contaminación mejorando la eficiencia en el uso del agua.

Manejo de pesticidas. Se usan pesticidas, herbicidas y funguicidas para matar plagas y controlar el crecimiento de maleza y hongos. Estas sustancias químicas pueden entrar y contaminar el agua mediante la aplicación directa, el escurrimiento, el transporte por el viento y por depósito de la atmósfera; pueden matar a los peces y a la vida silvestre, envenenar sus fuentes de alimento y destruir el hábitat que los animales utilizan como refugio. Para reducir la contaminación provocada por los pesticidas, se pueden aplicar programas de control de plagas basados en el clima, tipo de suelo, historial de la plaga y tipo de cultivo con el objetivo de minimizar el uso de pesticidas.

Manejo del confinamiento de animales. El confinar a los animales en determinada área o en lotes ayuda a los granjeros y rancheros a alimentar y mantener unido al ganado, pero estas áreas de confinamiento se vuelven fuentes mayores de desechos de animales. El escurrimiento en estas áreas puede arrastrar microorganismos patógenos, nutrientes y sustancias demandantes de oxígeno que contaminan a los moluscos y seres de la zona. El agua subterránea también puede ser contaminada por la infiltración. Las descargas pueden limitarse almacenando y manejando el agua de desperdicio de dichas superficies.



Figura 2.1. Las zonas de confinamiento de animales se vuelven grandes fuentes de desechos y nutrientes

Control del ganado al pastar. Cuando se excede el uso de una zona para pastura el suelo queda expuesto, incrementa la erosión, estimula el crecimiento de plantas indeseables y reduce la infiltración del agua. Para reducir los impactos provocados por las zonas de pastura, se debe programar la intensidad de la pastura, alejar el ganado de áreas sensibles y proveer fuentes alternas de agua y sombra, así como renovar las zonas de pastura.

Como puede observarse, en general los efectos en la calidad del agua ocasionados por las actividades agrícolas se deben a un problema de tipo cultural debidos a la falta de capacitación al respecto. Para disminuir la mayoría de los efectos, que consisten es recomendable implantar programas de concientización y capacitación sobre el uso correcto de fertilizantes, pesticidas y del agua que se utiliza, lo cual además es muy benéfico para los campesinos y granjeros, ya que representa un ahorro en la compra de productos, más alta productividad y en general, una mejor economía.



Figura 2.2. Las grandes zonas de pastura se vuelven sitios vulnerables a la erosión y en ellas disminuye la infiltración del agua.

2.2 Áreas urbanas

El escurrimiento proveniente de áreas urbanas es la fuente principal de contaminación en estuarios y la tercera en importancia en lagos. Para proteger la calidad del agua superficial y subterránea, los desarrollos urbanos y las actividades domésticas deben ser guiadas por planes que limiten el escurrimiento y reduzcan las descargas de contaminantes.

Los terrenos porosos y variados de paisajes naturales como bosques, zonas húmedas y pastizales capturan el agua proveniente de la lluvia y la nieve fundida y poco a poco le permiten infiltrarse y moverse lentamente bajo tierra y este movimiento tiende a alcanzar gradualmente las aguas receptoras. En contraste, las áreas no porosas de paisajes urbanos tales como caminos, puentes, lotes de estacionamiento y edificios, no permiten que el agua se infiltre lentamente, sino que son diseñados para recolectar y desalojar rápidamente el agua, que va a dar al sistema de alcantarillado pluvial, el cual fue diseñado con el mismo fin y el agua descarga en algún receptor, que se erosiona al recibir tal cantidad de agua a esa velocidad, se daña la vegetación y se ensanchan las orillas, lo cual a su vez provoca: una menor profundidad del agua en épocas de estiaje, profundidades mayores en época de lluvias, mayor cantidad de sedimentos y mayor temperatura del agua. Los peces y otras formas de vida acuática no pueden sobrevivir debido a los impactos tan severos que provoca el escurrimiento urbano, además de que

fácilmente puede dañar las reservas de agua destinadas a consumo humano y hacer inseguras las áreas de recreación.

La urbanización también incrementa la variedad y cantidad de contaminantes transportados a las aguas receptoras. Algunos de los contaminantes generados en áreas urbanas son: sedimentos de desarrollos y construcciones nuevas, aceite, grasa y sustancias químicas tóxicas de los automóviles, nutrientes y pesticidas de áreas verdes y jardinería, bacterias y virus de sistemas sépticos, sales y metales pesados. El mayor volumen de contaminantes producidos corresponde al transporte de sedimentos y sólidos.

Cuando el escurrimiento entra al alcantarillado pluvial, arrastra varios de estos contaminantes consigo. En las ciudades de nuestro país, este escurrimiento contaminado es liberado sin recibir ninguna clase de tratamiento.

2.2.1 Medidas para manejar el escurrimiento urbano

Para el caso de nuevos desarrollos, se debe intentar mantener el volumen de escurrimiento en niveles predeterminados usando controles estructurales (como pequeñas presas de regulación) y estrategias de prevención de contaminación. Pueden implantarse planes para el manejo del escurrimiento, sustancias tóxicas y nutrientes, basados en la protección de ciertas zonas de alta sensibilidad ecológica y maximizar la filtración mediante áreas verdes, evitando construir o cubrir el suelo al menos que sea necesario.

Para el caso del desarrollo existente, los esfuerzos deben dirigirse a identificar las principales fuentes y las oportunidades de reducción de contaminantes, proteger las áreas naturales existentes en la zona y realizar actividades de limpieza de los cuerpos de agua.

En este caso también se recomienda emprender una campaña educativa permanente en la que las escuelas puedan proponer proyectos para enseñar a los alumnos a reducir los contaminantes y evitar que descarguen desechos directamente en el alcantarillado pluvial.

2.3 Zonas de deforestación



Figura 2.3. Ejemplo de una tala de árboles sin previa planeación

Grandes zonas boscosas son deforestadas para la obtención de madera y esto puede causar importantes problemas en la calidad del agua si no se realiza adecuadamente. Se estima que las actividades de deforestación contribuyen en un 9% de los problemas de calidad del agua en ríos y corrientes.

Entre las fuentes de contaminación no puntual que se asocian con las actividades de deforestación se encuentran el remover la vegetación de la orilla de ríos y arroyos, la construcción y uso de caminos, la cosecha de madera y la preparación mecánica para el plantío de nuevos árboles. La construcción de caminos y su uso son las principales fuentes de contaminación en las áreas deforestadas, contribuyendo hasta con un 90% del sedimento total de las operaciones de deforestación. El eliminar los árboles en el área cercana a ríos y corrientes puede afectar la calidad del agua, ya que reduce la sombra que regula la temperatura del agua y se desestabilizan los bancos de los ríos. Estos cambios pueden dañar la vida acuática limitando sus fuentes de alimento, sombra y refugio.

Para mitigar impactos en la calidad del agua causados por la deforestación, se han desarrollado planes de manejo de sitios específicos. Por ejemplo, el operar planes de cosecha previamente diseñados puede dar como resultado una producción rentable así como protección a la calidad del agua. Dichos planes

identifican claramente el área a ser talada, localizan áreas especiales de protección, tales como zonas húmedas y vegetación a la orilla de las corrientes, se planifica la temporada correcta de actividades de cosecha, se toman medidas para el trazado, diseño, construcción y mantenimiento de caminos, así como los métodos de talado y reforestación.

Los factores a considerar en el plan de deforestación son los siguientes:

Reconocimiento del sitio. El reconocimiento previo ayuda a identificar áreas que puedan necesitar protección especial o manejo durante las actividades de cosecha. Es común que los paisajes sensibles tengan fuertes pendientes, un gran potencial de deslizamiento de tierra, formaciones rocosas inestables, niveles altos de precipitación, nieve acumulada o funciones ecológicas especiales tales como las que provee la vegetación a las orillas de una corriente. Las actividades de talado en este tipo de áreas tienen un gran potencial para afectar la calidad del agua.

Determinación de la temporada de actividades. Debido a que las actividades de deforestación afectan al suelo y contribuyen a la erosión y al escurrimiento, el realizar las operaciones en el momento adecuado puede reducir significativamente su impacto en la calidad del agua y en la vida acuática. Al realizar las actividades de talado deben evadirse las temporadas lluviosas, de migración de peces y de desove.

Establecimiento del manejo de las áreas a la orilla de los cauces. Los planes a menudo restringen las actividades en áreas cercanas a las orillas de las corrientes, estableciendo áreas especiales donde la vegetación es altamente benéfica para la calidad del agua y el hábitat acuático, ya que estabiliza los bancos de los ríos, reduce el escurrimiento y los niveles de nutrientes, captura el sedimento generado por las actividades cuesta arriba, antes de que éstos alcancen la superficie del agua, además de regular su temperatura debido a la sombra que producen sobre su superficie y formar un hábitat adecuado en la zona, al morir dichos árboles y caer en la corriente.

Manejo del uso, construcción, trazado y mantenimiento de caminos. Una buena planeación y diseño de caminos pueden reducir significativamente el transporte de sedimentos a los cuerpos de agua y en la medida de lo posible debe procurarse que los caminos sean diseñados de tal manera que su longitud y ancho sean los mínimos, así como el número de sitios en donde se crucen cuerpos de agua. Los caminos y carreteras deben seguir los contornos naturales del terreno y ubicarse lejos de pendientes bruscas, zonas propensas al deslizamiento o con poco drenaje. El mantenimiento apropiado y la clausura de caminos no necesarios puede reducir el impacto a largo plazo.

Manejo de la recolección de madera. Los efectos más importantes de la deforestación son los relacionados con el acceso de vehículos, maquinaria y el arrastre y transporte de árboles o troncos. Estos efectos incluyen movimiento y

compactación del suelo. Las técnicas de transporte mal manejadas pueden incrementar la producción de sedimentos hasta 10 o 20 veces y perturbar hasta el 40% de la superficie del suelo, mientras que la técnica apropiada sólo afecta alrededor de un 8 por ciento.

Manejo de la reforestación. Los bosques pueden regenerarse sembrando semillas o árboles pequeños. La reforestación requiere que la tierra se prepare previamente pero ya sea mediante semillas o árboles pequeños, el uso de maquinaria pesada puede dar como resultado un gran impacto en el suelo por lo que se recomienda su uso al mínimo.

2.4 Zonas de turismo náutico

Los botes y yates individualmente liberan solamente pequeñas cantidades de contaminantes, pero al multiplicarse, cientos o miles de ellos pueden causar diversos problemas en la calidad del agua en ríos, lagos y costas. El impacto ambiental potencial incluye una alta toxicidad en el agua, incremento de la concentración de contaminantes en los organismos acuáticos y de sedimentos, aumento de la erosión, mayor cantidad de nutrientes que conduce a un incremento de algas y a un decremento de oxígeno disuelto, y también se presentan altos niveles de microorganismos patógenos. Además, la construcción cercana a la orilla puede resultar en la destrucción física de ecosistemas sensibles y de comunidades acuáticas que habitan en el fondo del cuerpo de agua.

La contaminación debida al turismo náutico está relacionada con circunstancias tales como una mala recirculación del agua, el mantenimiento de los botes, descarga de aguas residuales de los mismos, escurrimiento de agua de lluvia en lotes de amarre de los botes y la alteración física de la orilla, así como de la vida acuática durante la construcción y operación de muelles. Un manejo apropiado ayudará a limitar la contaminación ocasionada por estas fuentes, promover un beneficio económico a largo plazo y una mayor salud ambiental.

Algunas de las medidas recomendadas para este tipo de fuentes son:

Operación y mantenimiento de botes. En el mantenimiento de botes se produce una cantidad considerable de solventes, pinturas y aceite que puede llegar a las aguas subterráneas o escurrir hacia las aguas superficiales. Las sustancias químicas y metales contenidos en la pintura pueden limitar el crecimiento de organismos en el fondo. Muchos productos de limpieza para botes contienen cloro, amoníaco y fosfatos; todos ellos pueden dañar al plancton y peces. El aceite liberado por los motores y por el suministro de combustible contienen hidrocarburos que tienden a adherirse a los sedimentos y que dañan a los organismos del fondo, que son la base de la cadena alimenticia acuática. Los propietarios de los botes pueden reducir los impactos utilizando productos de limpieza no tóxicos que no dañen a los humanos o a la vida acuática, limpiando y dando mantenimiento a los botes en sitios fuera del agua, aspirando manchas de

pintura, cargando combustible adecuadamente, reciclando aceite usado y desechando las partes de motor usadas, en sitios adecuados.

Manejo de desperdicios y aguas residuales. La descarga de desperdicios y aguas residuales de los botes puede degradar la calidad del agua, ya que los desechos fecales pueden hacer que el agua deje de ser apropiada para actividades recreativas, destruyendo los hábitats acuáticos y causando problemas a la salud humana; además, estimulan el crecimiento de algas, reduciendo la cantidad de oxígeno disponible y que es requerido por peces y otros organismos. Los propietarios y las autoridades deben procurar reducir la descarga de desechos a cero en las aguas de uso recreativo.

Diseño y ubicación de las zonas de recreación náuticas. Estos dos son de los más importantes factores de impacto en la calidad del agua. Los sitios mal planeados pueden interrumpir la circulación natural del agua y causar erosión en las orillas y destrucción del hábitat. Para reducir la contaminación, los centros de recreación deben ubicarse y diseñarse de manera que el flujo natural del agua renueve regularmente el agua del lugar. La siembra de plantas o pasto ayudan a evitar la erosión del lugar o en casos necesarios pueden tomarse medidas para estabilizar estructuralmente las orillas. El diseño final debe conjugar la combinación más deseable de capacidad, servicios y accesos, al tiempo en que minimice los impactos ambientales y los costos de operación y mantenimiento.

2.5 Contaminación proveniente de la atmósfera



Figura 2.4. Desechos liberados en la atmósfera por las actividades industriales.

La atmósfera es la porción del ambiente donde se originan algunos de los más severos problemas de contaminación no puntual y, de hecho, la intensidad y magnitud de la contaminación no puntual pueden ser correlacionadas con la contaminación atmosférica, así como con las condiciones propias de la atmósfera

y meteorológicas. Las emisiones de dióxido de azufre y óxidos nítricos por los procesos de quema de carbón y su circulación en la atmósfera, causan el fenómeno de "lluvia ácida", el cual tiene un efecto devastador en muchos cuerpos de agua en todo el mundo. Las partículas de aerosoles presentes en la atmósfera contienen importantes cantidades de azufre, metales, pesticidas, compuestos orgánicos, hongos y polen, otras partículas incluyen polen, suelo, ceniza, nutrientes y alquitrán, así como una variedad de compuestos químicos tales como óxidos, nitritos, nitratos, cloruros, fluoruros, ozono y silicatos.

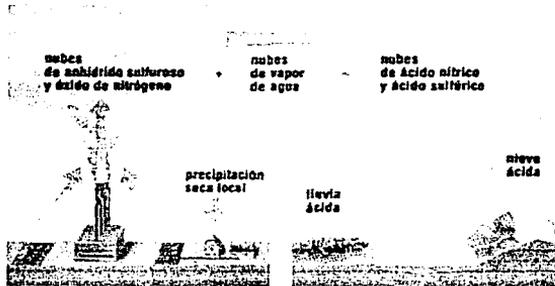


Figura 2.5. Formación de la "lluvia ácida"



Figura 2.6. Bosques en el área de Checoslovaquia y del este de Europa en la década de los años 1980s, afectados por la lluvia ácida.

2.5.1 Medidas de control de contaminantes atmosféricos

El traslado de partículas de la atmósfera se debe a:

- La remoción por la lluvia y la caída de nieve
- Depósito en seco por sedimentación
- Depósito en seco por el impacto en la vegetación y superficies rugosas

Los niveles de contaminación, locales o incluso globales, pueden reducirse a través de medidas de control de la contaminación del aire. Estas medidas se enfocan principalmente a reducir las tasas de emisión de aerosoles, de automóviles o a desaparecer ciertos compuestos del mercado.

Cabe mencionar que el problema de los contaminantes en la atmósfera es un problema de contaminación no puntual; sin embargo, en el caso particular de las descargas de contaminantes a la atmósfera por las actividades industriales, el caso puede analizarse como una fuente de contaminación puntual, ya que se conoce el punto exacto de descarga hacia la atmósfera y por lo tanto tomar medidas de control dentro de la misma industria.

2.6 Actividades mineras

Cerca de 200 de las 1600 especies minerales conocidas son consideradas importantes para la economía. Estos minerales son obtenidos por actividades mineras tanto subterráneas como superficiales.

La minería genera dos formas principales de contaminación del agua, la física y la química. El azolvamiento constituye el mayor impacto físico en la calidad del agua tanto de las actividades superficiales como subterráneas. Los bancos de desechos, pilas y tiraderos de roca resultantes de estas operaciones son particularmente vulnerables a la erosión a causa de su incapacidad de mantener vegetación.

La mayor parte de la contaminación química resulta de la oxidación de sulfuros la cual ocurre con gran parte de los minerales obtenidos. La minería pone una gran cantidad de sulfuros en contacto directo con el oxígeno del ambiente formando sulfatos, los cuales, al contacto con el escurrimiento forman ácido sulfúrico, el cual disuelve los metales, los cuales son arrastrados a los cuerpos de agua.

Los residuos de la extracción, es decir, los materiales residuales dejados cerca del lugar de extracción luego de haberse obtenido los minerales, constituyen otra fuente de contaminación. La lluvia que llega a estos cúmulos de residuos lixiviará parte de los contaminantes presentes y los drenará, ya sea hacia el subsuelo (contaminando las aguas subterráneas) o hacia aguas superficiales adyacentes.



Figura 2.7 Fotografía de una mina en Queensland, Australia, la cual muestra el impacto en el ambiente de la extracción de minerales.

En el Inventario Nacional de Calidad del Agua (National Water Quality Inventory, USA) realizado en 1994 se clasifican por importancia las diversas fuentes de contaminación, como se muestra en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2 Principales fuentes de contaminación no puntual

Rango	Ríos	Lagos	Estuarios
1	Agricultura	Agricultura	Escurrimiento urbano
2	Fuentes puntuales municipales	Fuentes puntuales municipales	Fuentes puntuales municipales
3	Cambios de hábitat y de corrientes	Escurrimiento urbano	Agricultura

Fuente: Water National Quality Inventory, USA, 1994
 Disponible en: <http://www.epa.gov/OWOW/NPS/facts/point1.htm>

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO DE DESCARGA DE UN ALCANTARILLADO PLUVIAL

Este capítulo presenta un modelo matemático determinístico propuesto por E. Osuch-Pajdzińska y M. Zawilski para simular la cantidad y calidad de la descarga de una red de alcantarillado pluvial para cualquier tormenta dada. El modelo integrado incluye cinco submodelos: para el escurrimiento superficial, para la acumulación de contaminantes en la zona de captación, para el lavado de contaminantes, para el flujo en la red de alcantarillado pluvial y para el transporte de contaminantes en la red. Los datos de entrada para el modelo son las características del área de captación de la red de alcantarillado y de la lluvia.

3.1 Descripción general del modelo matemático

Los procesos principales que determinan la cantidad de escurrimiento y la concentración de contaminantes en él son:

- El escurrimiento superficial
- La acumulación de contaminantes en la superficie del área de captación
- El lavado de los contaminantes del área de captación
- El transporte del agua de lluvia en la red pluvial

Estos procesos incluyen varios fenómenos y son afectados por muchos factores que dependen de la intensidad y duración de la lluvia y del tipo de superficie de captación.

Se requiere elaborar estudios de simulación y de campo para describir matemáticamente los fenómenos esenciales que ocurren en el área de captación. El modelo que aquí se expone utiliza fórmulas matemáticas para los siguientes fenómenos:

- Humedad inicial de la superficie (adhesión y filtración)
- Relleno gradual de las desigualdades del terreno (retención de superficie)
- Cambio del coeficiente de escurrimiento debido a la intensidad de la lluvia
- Cambio en el índice de lavado de contaminantes durante la lluvia

Estos fenómenos no han sido tomados en cuenta en modelos previos; sin embargo, no fue posible considerar otros fenómenos en el modelo. Algunos de ellos fueron dejados a un lado porque tienen poca influencia relativa en el resultado final, por ejemplo: el cambio del coeficiente de rugosidad en la superficie de escurrimiento variable, el efecto de las gotas de lluvia que teóricamente incrementan la turbulencia en la superficie del flujo, la simulación completa del flujo inestable y el cambio en el contenido de los contaminantes durante el flujo en la red de alcantarillado. Tales fenómenos no pueden ser totalmente verificados en la descripción matemática; además, el incluirlos haría que el modelo se complicara y se volviera poco práctico. También fueron omitidos los desbordamientos, el efecto de cuencas de retención locales, sobrecarga a largo plazo de alcantarillas e inundaciones.

Estos fenómenos no siempre ocurren en redes de alcantarillado pluvial urbanas y no son necesarios para verificar el modelo. De cualquier manera, podrían utilizarse submodelos complementarios que describan estos fenómenos.

Los procesos principales están presentados en forma de submodelos matemáticos individuales. La relación entre los submodelos se muestra en la Figura 3.1. Fueron considerados tres tipos de superficies: permeable, impermeable y parcialmente permeable. Cada tipo de superficie fue simulada separadamente.

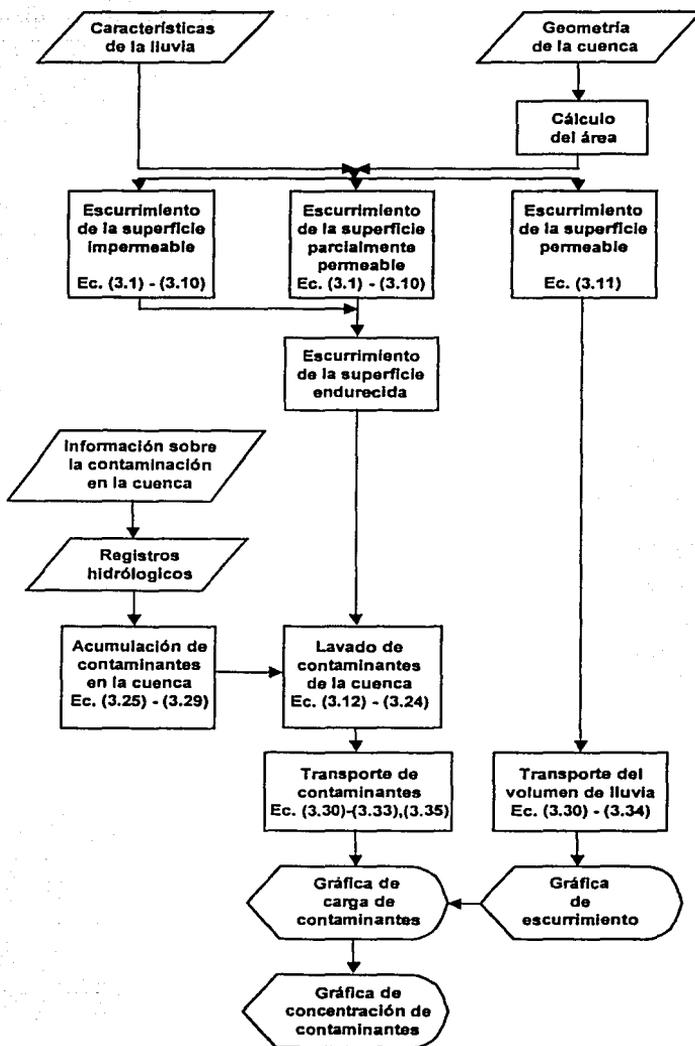


Figura 3.1 Algoritmo de modelos

3.2 Modelo de escurrimiento del agua de lluvia

El modelo del escurrimiento del agua de lluvia está basado en ecuaciones conocidas que describen el movimiento del agua en superficies inclinadas. El escurrimiento está descrito por las ecuaciones de continuidad y de Manning.

La ecuación de la continuidad es:

$$\frac{dh}{dt} = q_{op} - q_p - q_{od} - q_f \quad (3.1)$$

donde:

h = Tirante actual del flujo del agua en la superficie (m)

q_{op} = Intensidad de la lluvia ($m^3/m^2 \cdot día$)

q_p = Intensidad de la evaporación ($m^3/m^2 \cdot día$)

q_{od} = Intensidad de flujo en la superficie ($m^3/m^2 \cdot día$)

q_f = Intensidad de infiltración en el terreno ($m^3/m^2 \cdot día$)

La ecuación de Manning es:

$$q_{od} = \alpha h^N \quad (3.2a)$$

donde:

α y N = Parámetros que dependen de la geometría y tipo de la superficie de la cuenca.

La intensidad del flujo en la superficie, q_{od} , está restringida por

$$q_{od} = 0 \quad \text{para} \quad H_{op} < h_a \quad (3.2b)$$

$$H_{op} = \int_0^1 (q_{op} - q_p) dt \quad (3.2c)$$

donde:

H_{op} = Tirante total de la precipitación menos la evaporación (m)

h_a = Tirante de humedad inicial, es decir, el total de lluvia perdida en el proceso de infiltración en la superficie (m).

En el caso de flujo turbulento, el cual ocurre durante el escurrimiento en una superficie con grandes pendientes, los parámetros α y N de la ecuación (3.2a)

pueden determinarse con base en las fuentes secundarias. Cuando el ancho de la cuenca no tiene restricciones, $N = 5/3$ y el valor del parámetro α es el siguiente:

$$\alpha = \frac{\sqrt{i_t}}{n\lambda} \quad (3.3)$$

donde:

i_t = Pendiente del terreno

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

λ = Distancia media del flujo superficial (m).

La intensidad de escurrimiento efectiva (q_{ef}) a la red pluvial de alcantarillado es menor que la intensidad de flujo superficial (q_{od}) determinada por las ecuaciones (3.1) a (3.3), debido a la influencia de factores tales como una superficie desigual de la cuenca, la infiltración y, a largo plazo, el tipo de superficie de la cuenca. El principio para la formación de corrientes se presenta en la Figura 3.2, que ilustra el escurrimiento que parte de una superficie parcialmente permeable. La intensidad de lluvia (q_{op}), reducida por la evaporación (q_p) crea un escurrimiento en la superficie de intensidad q_{od} , el cual disminuye al llenar las desigualdades del terreno y por la infiltración. La cantidad final de escurrimiento se denomina escurrimiento efectivo (q_{ef}).

El modelo aquí presentado clasifica el escurrimiento según tres tipos de superficie de captación:

- Escurrimiento proveniente de superficies impermeables, tales como asfalto y tejados (q_{ef1})
- Escurrimiento proveniente de superficies parcialmente permeables, tales como el pavimento de concreto y adoquinado (q_{ef2})
- Escurrimiento proveniente de superficies permeables, tales como césped o tierra suelta (q_{ef3})

El escurrimiento total hacia la red de alcantarillado es la suma del escurrimiento de estos tres tipos de superficie.

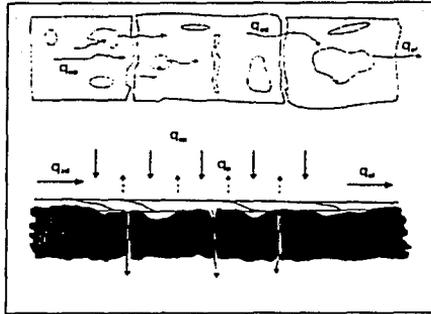


Figura 3.2 Principio básico de escurrimiento para superficies parcialmente permeables.

3.2.1 Superficies impermeables y parcialmente permeables

En este apartado se describe la influencia de la retención de la superficie en la cantidad efectiva de escurrimiento, con base en trabajos previos (Haug 1970; Bertillotti et. al. 1986). Una superficie receptora contiene varias áreas desiguales; la distribución de su profundidad y volumen no se pueden conocer con precisión. Durante una tormenta estas áreas se llenan gradualmente y reducen la intensidad de escurrimiento. La tasa de infiltración a través de las pequeñísimas grietas del terreno depende de la cantidad y profundidad de la corriente de agua. En el caso de tirantes poco profundos, casi la totalidad del agua desaparece entre dichas grietas, en el caso contrario, en que se presentan profundidades mayores, solamente una parte del agua desaparece debido a que la infiltración se halla limitada por la capacidad de absorción del suelo. El escurrimiento para las superficies receptoras impermeables y parcialmente permeables se halla modelado, por lo tanto, de la siguiente manera:

$$q_{ef1} = q_{od} W_r \quad (3.4)$$

$$q_{ef2} = q_{od} W_r W_h \quad (3.5)$$

$$W_r = 1 - \exp\left(-\frac{hr}{h_0}\right) \quad (3.6)$$

$$W_h = 1 - \exp\left(-\frac{h}{h_h}\right) \quad (3.7)$$

donde:

h_r = Tirante del escurrimiento retenido, o capacidad de retención y almacenamiento del suelo (m)

h_0 = Superficie empírica de las desigualdades del terreno, o bien, la capacidad de almacenamiento de las depresiones en el terreno (m)

h_h = Tirante empírico para el cálculo de la infiltración a través de una superficie parcialmente permeable (m)

W_r y W_h = Coeficientes de pérdida debidos, respectivamente, a la retención de la superficie y a la infiltración en superficies parcialmente permeables.

Debido a que la capacidad entre las pequeñas grietas es limitada, la infiltración en el suelo se halla limitada a su vez, por lo cual en este caso no se calcula la tasa de infiltración q_f .

El tirante de agua de lluvia retenido (h_r) en el terreno desigual se halla expresado como una función del tiempo a partir del inicio de la tormenta según la ecuación (3.6) y el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$h_r = H_{od} - H_r \quad (3.8)$$

donde:

$$H_{od} = \int q_{od} dt \quad (3.9)$$

$$H_r = \int q_{od} W_r dt \quad (3.10)$$

Las variables H_{od} y H_r son los tirantes totales instantáneos de escurrimiento y escurrimiento reducido, respectivamente.

3.2.2 Superficies permeables

Para las superficies permeables la infiltración del agua en el suelo está descrita por la fórmula de Horton:

$$q_f = q_{ck} + (q_{cp} - q_{ck}) \exp(-\xi t) \quad (3.11)$$

donde:

q_{cp} = Tasa de infiltración inicial ($m^3/m^2 \cdot s$)

q_{ck} = Tasa de infiltración final ($m^3/m^2 \cdot s$)

ξ = Tasa de decaimiento de la infiltración (s^{-1})

Para cuencas urbanas típicas el escurrimiento proveniente de superficies permeables constituye alrededor del 10% del escurrimiento total. Esto se halla confirmado por cálculos en simulaciones obtenidos por medio de las ecuaciones descritas anteriormente. Por lo tanto, para superficies permeables, la retención en la superficie se aproxima usando ecuaciones análogas a las ecuaciones (3.4), (3.6), (3.8), (3.9) y (3.10), asumiendo que el valor de h_0 en este caso es el doble del valor que se obtiene para este parámetro en el caso de superficies parcialmente permeables. Esta consideración se basa en datos obtenidos de fuentes secundarias (Papadakis y Preul, 1972; Mignosa et al. 1984) para almacenamiento en depresiones en superficies permeables de aproximadamente 6 mm.

3.3 Modelo de lavado de contaminantes

Numerosos estudios y análisis (Preul 1970; Sartor et al. 1974) han confirmado que la tasa de lavado de contaminantes (μ_L) es proporcional a la cantidad de dichos contaminantes y a la intensidad efectiva de escurrimiento constante (q_{ef}).

$$\mu_L = -\frac{dL_u}{dt} = kq_{ef}L_u \quad (3.12)$$

donde:

μ_L = Tasa de lavado de contaminantes ($g/m^2 s$)

k = Coeficiente constante de la tasa de lavado de contaminantes (m^{-1})

L_u = Carga unitaria de contaminantes (g/m^2)

Al integrar la ecuación (3.12) considerando como límites los valores de 0 a t y de L_{u0} a L_{ut} , el siguiente paso a seguir es calcular la carga restante (L_{ut}) en la cuenca al transcurrir la lluvia, la cual tiene una duración de tiempo t .

$$\int_{L_{u0}}^{L_{ut}} \frac{dL}{L} = -k \int_0^t q_{ef} dt \quad (3.13a)$$

$$L_{ut} = L_{u0} \exp(-kH_{ef}) \quad (3.13b)$$

donde:

L_{u0} = Carga unitaria de contaminantes previa a la lluvia (g/m^2)

H_{ef} = Tirante total efectivo de escurrimiento (m)

$$H_{ef} = \int_0^t q_{ef} dt = Iq_{ef} \quad (3.14)$$

La carga de contaminantes lavados por la lluvia se halla definida por la fórmula

$$L_{uw} = L_{u0}[1 - \exp(-kH_{ef})] \quad (3.15)$$

Para un período de tiempo dado entre t_1 y t_2 donde $t_2 > t_1$ durante la lluvia la carga lavada por dicha lluvia puede ser calculada por la fórmula

$$L_{uw} = L_{u0}[\exp(-kH_{ef}(t_1)) - \exp(-kH_{ef}(t_2))] \quad (3.16)$$

De acuerdo a lo anterior, la concentración media de contaminantes en el escurrimiento de tirante H_{ef} será

$$S_i = \frac{L_{uw}}{H_{ef}} \quad (3.17)$$

En el escurrimiento entre los tiempos t_1 y t_2 será

$$S_{t_1-t_2} = \frac{L_{uw}(t_1-t_2)}{H_{ef}(t_1-t_2)} \quad (3.18)$$

3.3.1 Coeficiente de la tasa de lavado de contaminantes

En artículos y modelos previos el coeficiente de lavado de contaminantes fue considerado como una constante $k = 181 \text{ m}^{-1}$ (Preul 1970; Sartor et. al. 1974). Tanto los estudios de campo como los de laboratorio muestran claramente que la tasa de lavado de contaminantes es una variable y es dependiente del tipo y cantidad de contaminantes lavados, del tipo de superficie de escurrimiento y su pendiente, así como de la intensidad de la lluvia y el tiempo transcurrido desde su inicio. La tasa de lavado de contaminantes es influenciada en su mayor parte por la intensidad y volumen de lluvia; sin embargo, la tasa decrece con el tiempo de escurrimiento proporcionalmente al incremento en su volumen (Nakamura 1984; Osuch-Pajdzin'ska 1987). Este fenómeno fue también considerado un incremento en la disponibilidad de contaminantes para el lavado durante el incremento de la precipitación (programa STORM 1974). Los estudios de campo y las pruebas del programa para cálculo y simulación dieron como resultado que el coeficiente para la tasa de lavado de contaminantes se halla descrito por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{a}{1 - \exp\left(-\frac{H}{b}\right) + d} q^c + k_{\min} \quad (3.19)$$

donde:

a, b, c y d = Parámetros empíricos constantes

q = Intensidad de escurrimiento
 H = Tirante del escurrimiento

Esta fórmula hace a los resultados de los cálculos de simulación más consistentes con los resultados de los estudios de campo. El coeficiente k puede ser calculado usando la ecuación (3.19), en ambos casos:

Caso 1: Para construir la gráfica de contaminantes del escurrimiento, los valores de los parámetros de la ecuación (3.19) se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:

$$H = H_{ef} = \frac{PH_{ef1} + UH_{ef2}}{P + U} \quad (3.20)$$

donde, para una superficie impermeable, se tiene:

$$H_{ef1} = \int q_{ef1} dt \quad (3.21a)$$

y para una superficie parcialmente permeable se tiene:

$$H_{ef2} = \int q_{ef2} dt \quad (3.21b)$$

$$q = q_{ef} = \frac{Pq_{ef1} + Uq_{ef2}}{P + U} \quad (3.22)$$

En este caso, el cálculo de la carga de contaminantes requiere una solución numérica para la ecuación compleja (3.12).

Caso 2: Para determinar la carga total de contaminantes lavados por la lluvia, el escurrimiento efectivo es considerado como el escurrimiento promedio durante el evento, y la profundidad total del escurrimiento efectivo (H_{ef}) se estima basándose en el tirante total de lluvia (H_{ra}) y el coeficiente de escurrimiento total (ψ).

$$q = q_m \approx \frac{H_{ef}}{t_d + t_r} \quad (3.23)$$

$$H \approx \psi H_{ra} \quad (3.24)$$

donde:

t_d = Duración de la lluvia (s)

t_s = Tiempo estimado a partir del final de la lluvia hasta el final del escurrimiento, o tiempo de decaimiento del escurrimiento (s)

H_{ra} = Tirante total de lluvia (m)

El valor del coeficiente de escurrimiento total ψ puede determinarse a través del análisis estadístico de una serie de resultados de estudios de la relación lluvia-escurrimiento. La duración de la lluvia (t_d) es conocida y el valor de t_s (el tiempo de decaimiento del escurrimiento) puede ser evaluado con base en las observaciones y modelado del escurrimiento a partir del momento en que termina la precipitación hasta el final de la parte esencial del escurrimiento. Puede asumirse (y ha sido verificado por los autores del modelo) que la parte principal (aproximadamente el 95%) del volumen de escurrimiento y la carga de sedimentos son transportados de la superficie de la cuenca hasta pasados aproximadamente 15 minutos después de terminada la precipitación. Si se calcula la carga total de contaminantes lavados de la cuenca, entonces el valor del coeficiente k es constante para el escurrimiento dado. La ecuación (3.15) puede utilizarse y los cálculos pueden realizarse más fácilmente.

La ecuación (3.19) incluye solamente contaminantes lavados de superficies impermeables y parcialmente permeables. Sin embargo, es sabido que pequeñas cantidades de contaminantes son lavadas y arrastradas hacia las alcantarillas a partir de superficies permeables, debido principalmente a la erosión del suelo. Este fenómeno no fue considerado en el modelo debido a la carencia de información experimental suficiente, pero puede ser incluida posteriormente con facilidad como función de la intensidad de lluvia q_{er} .

3.4 Modelo de acumulación de contaminantes en la superficie de la cuenca

Investigaciones previas (Osuch-Pajdzin'ska 1987; Sartor et al. 1974; Shivalingaian et al. 1984) muestran que la cantidad de contaminantes en el escurrimiento se halla determinada por la cantidad de contaminantes acumulados en la superficie de la cuenca (L_0), el cual es el total de contaminantes no lavados por escurrimientos previos (L_T) y la carga de contaminantes depositados por desperdicios y basura acumulados en las calles desde el escurrimiento anterior (L_k):

$$L_0 = L_T + L_k \quad (3.25)$$

Se toma como consideración previa para el modelo que la tasa de acumulación de contaminantes en la superficie de la cuenca es constante a través del tiempo.

Como resultado de estudios más extensos sobre acumulación de contaminantes durante periodos mayores (de 2 a 4 semanas) de clima seco, la tasa de acumulación fue modificada introduciendo un factor que reduce la tasa de acumulación, el factor de viento (w). La reducción de la acumulación se ha discutido en investigaciones realizadas por Akan en 1998.

Se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\frac{dL_0}{dT} = a_1(F - F_u)\beta_1 + a_2F_u\beta_2\eta - wL_0 \quad (3.26)$$

donde:

T = Número de días de acumulación de contaminantes entre dos precipitaciones consecutivas

a_1 = Precipitación de polvo (kg/m^2 día)

a_2 = Cantidad de basura acumulada en las calles y manzanas (kg/m^2 día)

F_u = Área de calles y manzanas (m^2)

β_1 y β_2 = Parámetros de conversión de masa de partículas y masa de basura, respectivamente, en parámetros de un tipo de contaminante dado

η = Parámetro de efectividad de barrido de calles

w = Factor de viento (día^{-1}), el cual debe ser mayor a cero.

Al integrar la ecuación (3.26) para los límites de L_i a L_0 y de 0 a T , se obtiene la carga acumulada en el tiempo T .

$$L_0 = \frac{a_1(F - F_u)\beta_1 + a_2F_u\beta_2\eta}{w} [1 - \exp(-wT)] + L_i \exp(-wT) \quad (3.27)$$

La carga de contaminantes (L_0) que se acumula en la superficie de la cuenca previamente a una lluvia i puede ser calculada a partir de las ecuaciones (3.13), (3.25), (3.26) y (3.27) de la manera siguiente:

$$L_{0i} = \frac{a_1(F - F_u)\beta_1 + a_2F_u\beta_2\eta}{w} [1 - \exp(-wT_i)] + L_{0(i-1)} \exp(-kH_{d(i-1)}) \exp(-wT_i) \quad (3.28)$$

donde:

T_i = Número de días entre las precipitaciones ($i-1$) e i

3.5 Modelo de transporte de agua de lluvia y contaminantes en una red de alcantarillado

El cálculo de las gráficas de escurrimiento y de contaminantes para cualquier punto en la red de alcantarillado pluvial requiere la solución de complejas ecuaciones de Saint Venant para flujo variable en la red con el modelado simultáneo del transporte de masa de contaminantes (Chen et al. 1971; Heeps et al. 1970; Schadstoffe 1992; Programa STORM 1974; Koussis et al. 1983; Koussis 1983; Lyn 1987; Van Rijn 1986; Woloszyn 1979, 1982). Intentos de simulación, no mejoraron sustancialmente el cálculo de las gráficas de escurrimiento y de contaminantes y ocasionalmente produjeron resultados que diferían mucho de los resultados obtenidos en estudios de campo (Weinmann y Laurenson 1972; Toyokuni y Watanabe 1986; Schadstoffe 1992).

El modelo de transporte de agua de lluvia y contaminantes presentado se basa en la velocidad variable del agua en las alcantarillas y el tiempo de concentración (una variante del modelo de las ondas cinemáticas). En el caso del transporte de contaminantes, la sedimentación en el fondo de las alcantarillas, el lavado, y los cambios en la composición de la descarga no son tomados en cuenta debido al trazado geométrico favorable de la red de alcantarillado pluvial en la cuenca estudiada y a los relativamente cortos tiempos de flujo de agua en dicha red. El modelado matemático de dichos fenómenos requiere el conocimiento de las características de sedimentación precisas de los contaminantes transportados, lo cual puede representar una nueva etapa de estudios.

El modelo de transporte se presenta en la Figura 3.3. La cuenca se divide en subcuencas de dimensiones $f = \Delta l \times \Delta b$, donde $\Delta b = v_b \tau$; $\Delta l = v_k \tau$; v_b y v_k son velocidades de flujo en tramos de alcantarillado, tanto en colectores como en ramificaciones, respectivamente (m/s); y τ es una unidad arbitraria de tiempo (s). Los números (j) para algunas subcuencas han sido marcados en la Fig. 3.3. Se hallan referidos al punto de descarga (B) y son equivalentes al número de unidades de tiempo requerido para transportar el agua de lluvia de una subcuenca al punto de salida B. Para determinar la malla, la velocidad estándar del agua en los tramos colectores se considera como un resultado de una intensidad efectiva de escurrimiento en la superficie estable y de largos periodos de tiempo con un valor de $q_v = 2.0$ lt/s ha. Por lo cual la velocidad del movimiento del agua en las ramificaciones fue considerada de 1.0 m/s.

La velocidad del agua de lluvia en la red de alcantarillado cambia durante el escurrimiento de acuerdo con la tasa actual de flujo y las características hidráulicas de la red. Este cambio ha sido introducido en el modelo como un parámetro auxiliar p_q .

$$p_q = \frac{Q_i}{F n q_v} \quad (3.29)$$

El valor de Q_t/F_{rt} es la intensidad efectiva de escurrimiento promedio actual para la superficie F_{rt} , es decir, la superficie impermeable endurecida o la superficie parcialmente permeable de la cuenca a partir de la cual el agua de lluvia es descargada hacia el punto dado de la red en el tiempo t . La corrección para las velocidades estándar que se aplica a v_b y v_k para obtener las velocidades corregidas v_b' y v_k' fue introducido como una variable de p_q .

$$\frac{v_b'}{v_b} = \frac{v_k'}{v_k} = p_q^{0.33} \quad (3.30)$$

Valores grandes de p_q causan un incremento en la velocidad del transporte del agua de lluvia.

El número de subcuencas (j) en relación a un punto dado de cálculo en la red de alcantarillado se determina por la siguiente ecuación (Fig 3.3):

$$j = \frac{t_p}{\tau} \quad (3.31)$$

donde:

t_p = Tiempo requerido por el agua de desecho para cubrir la distancia desde la subcuenca hasta el punto en análisis.

La tasa de flujo (Q_t) en el tiempo t a partir del inicio de la lluvia puede ser calculado considerando todas las áreas de las subcuencas (f_j) con la ecuación

$$Q_t = \sum_{j=1}^{m+t/\tau} f_j [P_j q^{t-f_j(m-j+1)} + U_j q^{t-f_j(2(m-j+1))} + (1-P_j-U_j) q^{t-f_j(3(m-j+1))}] \quad (32)$$

donde:

m = Número superior de subcuencas a partir de las cuales el escurrimiento se presenta en el punto de análisis en el tiempo t .

De la misma manera, la carga de contaminantes en el flujo se puede calcular con la fórmula

$$G_i = \sum_{j=1}^m f_i [P_j + U_j] \mu_{(m-j+1)} = Q_i C_i \quad (3.33)$$

Los valores de q_{ef} y μ_L se calculan con la ecuación (3.4), (3.10) y (3.12) como los promedios en los respectivos periodos unitarios de tiempo τ a partir de $t = 0$ (inicio de la lluvia) hasta que la intensidad efectiva de escurrimiento q_{ef} se vuelve menor a 0.01 lt/s ha después de terminada la lluvia.

El modelo de transporte que se presenta no toma en consideración las diferencias en la velocidad del agua en sitios particulares de la red en un momento dado. Esta consideración no representa errores significativos para redes pequeñas. El modelo de transporte no considera separadamente la retención en la red, la cual es típica de las ecuaciones de Saint-Venant. La calibración de los coeficientes de las ecuaciones (3.2) y (3.3) permite al calculista considerar la retención en la red de manera similar a la retención de líquido en la cuenca, considerando a la red y a la cuenca como un solo sistema, y que la retención tanto en la red como en tierra ocurren aproximadamente al mismo tiempo. Este algoritmo fue usado para calcular las gráficas de escurrimiento y de contaminantes de una lluvia en una cuenca con un área de 300 ha y los resultados obtenidos correspondían en buena medida con las mediciones realizadas. Los resultados de la verificación del modelo, la determinación de los parámetros constantes y el análisis de sensibilidad del modelo se presentan en el siguiente capítulo. El modelo obtiene resultados precisos para un amplio espectro de intensidades de lluvia (desde lluvias ligeras hasta tormentas torrenciales) y para cuencas de unos pocos cientos de hectáreas.

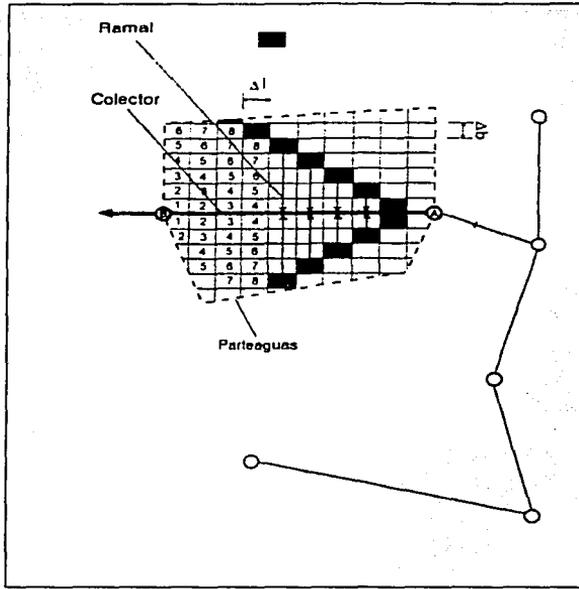


Figura 3.3 Modelo para el transporte de agua de lluvia en una red de alcantarillado.

CAPÍTULO 4

CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO

Este capítulo presenta los resultados de calibración y verificación de los modelos matemáticos para el cálculo de los diagramas de gasto y de contaminantes de las descargas pluviales en zonas urbanas. La calibración de los parámetros del modelo se basa en los resultados obtenidos en estudios de campo para una cuenca combinada, con zonas industriales y residenciales, con una superficie de aproximadamente 300 ha. El error relativo fue calculado comparando las predicciones del modelo con los resultados de los estudios de campo. Se estudió la sensibilidad del modelo a los cambios de parámetros en particular y se encontró que varios de los parámetro afectan decisivamente los resultados finales obtenidos. También fue probada la posibilidad de utilizar el modelo para otras cuencas con diferentes parámetros óptimos.

4.1 Alcance del modelo y métodos de calibración y verificación

Los modelos matemáticos para el cálculo de las gráficas de escurrimiento y de contaminantes presentados en el capítulo anterior fueron verificados a través de estudios de campo. La calibración y verificación de los modelos se basaron en una comparación entre las predicciones de cada modelo y las mediciones efectuadas en campo, para una lluvia dada, de intensidad y volumen de escurrimiento, contaminantes arrastrados y lavados. El cálculo de los parámetros del modelo se hizo considerando minimizar el error relativo. El análisis de sensibilidad posterior se realizó para determinar la influencia de los diferentes parámetros en las predicciones del modelo.

Los estudios de campo se realizaron entre 1987 y 1991 en la cuenca de Dabrowa Przemyslowa en Łódz, Polonia. La cuenca cubre principalmente un área industrial pero también incluye un pequeño número de casas y de áreas verdes. Las características de la cuenca se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Estructura de la cuenca estudiada en Lodz

Tipo de terreno (1)	Área (ha)			
	Total (2)	Impermeable (3)	Parcialmente permeable (4)	Permeable (5)
Industrial	156	83	40	33
Residencial	14	5	2	7
Total	170	88	42	40

La red de alcantarillado pluvial, construida en los años 1970's, colecta el agua de lluvia y la dirige hacia una presa de regulación. La red de alcantarillado de 13.5 km de longitud está construida principalmente con tuberías de concreto de sección transversal circular (con diámetros desde 0.3 m hasta 1.75 m y pendientes entre 1.0% a 31.5%). El tramo final de la red tiene una sección transversal rectangular (2.60 m de ancho por 1.60 m de altura). El trazo de la red se presenta en la Figura 4.1.

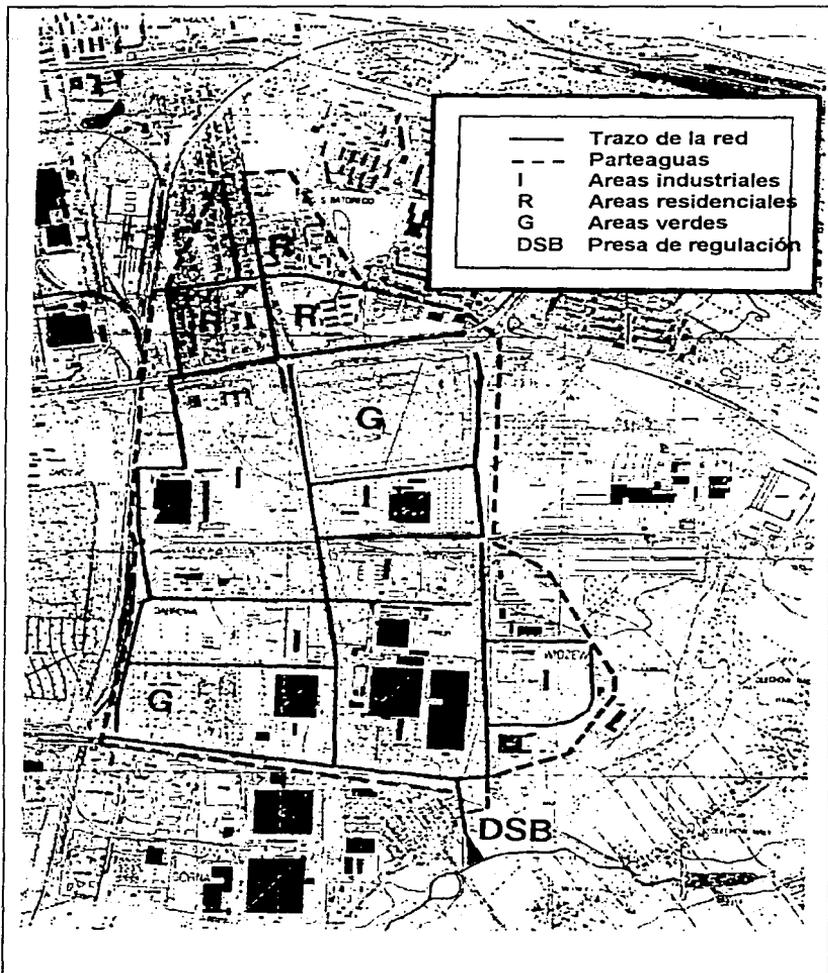


Figura 4.1. Trazo de la cuenca investigada y la red de alcantarillado pluvial

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

Localización y descripción de la cuenca estudiada

La cuenca se localiza en las afueras de la ciudad y tiene un área de 300 ha; sin embargo, solamente 170 ha son atendidas por la red de alcantarillado pluvial. Las restantes 130 ha corresponden a zonas no desarrolladas, y el agua de lluvia de esta área no entra a la red de alcantarillado. La cuenca se halla en un terreno casi plano y forma un rectángulo, con su lado mayor en dirección norte-sur. La pendiente natural del terreno es aproximadamente de 30m de desnivel sobre una distancia de 3.2 km. La elevación promedio es de 220 m.s.n.m. El límite de la cuenca al sur es un pequeño río, el cual sirve como cuerpo receptor del agua de lluvia. Las 170 ha de la cuenca se hallan densamente cubiertas por edificaciones propias de las industrias, tales como bodegas, plantas textiles y tecnológicas y fábricas de concreto precolado. La superficie de la cuenca en su mayoría se encuentra endurecida por cubiertas de concreto y asfalto. La superficie de los tejados drena a través de canales, directamente hacia la red de alcantarillado pluvial. El suelo consiste principalmente de arena y arena arcillosa. Aproximadamente un 10% del área se sostiene áreas verdes (cubierta por árboles y arbustos).

Estudios de campo

Los estudios de campo incluyeron mediciones pluviométricas (el registro continuo del tirante de lluvia respecto al tiempo), mediciones limnigráficas (registros del tirante del agua en el segmento final de la red), y mediciones de la calidad del agua en la descarga. Las mediciones pluviométricas se realizaron utilizando un medidor localizado en un lugar próximo a la descarga del tramo principal hacia la presa de retención. Algunas lluvias, que no cubrieron el área total de la cuenca estudiada y durante las cuales la intensidad de precipitación (dentro del área cubierta) pudo también ser espacialmente variable, no fueron tomadas en cuenta en los cálculos subsecuentes, debido a que tales fenómenos proporcionaron datos poco aceptables desde el punto de vista estadístico. Por lo tanto, las mediciones de la tasa de flujo fueron realizadas en el último tramo de la red (anterior a la presa de retención), de manera que dichas mediciones fueran datos representativos de la intensidad de escurrimiento de la cuenca entera. La tasa de escurrimiento se calculó utilizando la fórmula de Chezy, con base en el nivel de agua medido en la alcantarilla con un limnógrafo de flotador localizado en un pozo lateral excavado con dicho propósito.

La siguiente fórmula, obtenida por Blaszczyk (1983) se utilizó para calcular el coeficiente C de la Formula de Chezy:

$$C_{ch} = -17.72 \log \frac{R}{0.165k} \quad (4.1)$$

donde:

R = Radio hidráulico (m)

k_r = Rugosidad de las paredes de las alcantarillas

La ecuación 4.1 fue obtenida al investigar las condiciones hidráulicas en la red de alcantarillado y es correcta cuando el número de Reynolds es mayor a 5×10^5 y el tirante en el interior de las tuberías es menor a 0.8 veces su diámetro. El valor de la rugosidad de las paredes de las alcantarillas fue $k_r = 2.0 \times 10^{-3}$ m.

La condición calculada para flujo estable (Q_{st}) fue subsecuentemente corregida por una conversión aproximada en una condición de flujo inestable, utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = Q_{st} \sqrt{1 - \frac{dh}{dt} \frac{1}{ic_v}} \quad (4.2)$$

donde:

i_k = Pendiente de la alcantarilla

c_v = Velocidad cinemática de la onda (m/s)

Q = Intensidad de flujo (gasto) en condiciones inestables (m^3/s)

Q_{st} = Intensidad de flujo (gasto) en condiciones estables (m^3/s)

h = Tirante del agua (m)

t = Tiempo (s)

Esta fórmula proviene de la simplificación del conjunto de ecuaciones de Saint-Venant para el modelo de analogía de difusión (Weinmann y Laurenson, 1979). El valor de la velocidad cinemática de la onda se consideró como $c_v = 1.5v$, proporcional a la velocidad calculada con la fórmula de Chezy correspondiente al gasto Q_{st} . Esta corrección del gasto es significativa para la preparación de los hidrogramas para lluvias torrenciales, donde el flujo en las alcantarillas cambia rápidamente.

A partir del punto de descarga de la red de alcantarillado se hicieron manualmente los muestreos para determinar la calidad del agua. La pendiente del último tramo (a partir del cual se descarga) es considerable (7%), por lo cual se asegura un mezclado homogéneo a pesar de su tirante poco profundo. Las frecuencias con que se realizaron los muestreos, dependiendo de la tasa de flujo, fueron entre cinco minutos para lluvias torrenciales y entre 15 y 30 minutos para lluvias de menor intensidad y larga duración (más de 4 horas).

La cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) se adoptó como la medida básica de calidad del agua. La calibración y verificación del modelo para el lavado de contaminantes de la cuenca se basó en este parámetro. La concentración de otros contaminantes (DQO, DBO₅) fue calculada para la cuenca en estudio con base en su correlación con los SST. Dicha correlación fue establecida a través de estudios cualitativos. Las ecuaciones 4.3 y 4.4, obtenidas a partir de casi 70 muestras con un coeficiente de correlación de 0.85, permitieron la simulación de la concentración de contaminantes, expresada en términos de la DQO y la DBO₅.

$$C_{DQO} = 2.08C^{0.66} + 70 \quad (4.3)$$

$$C_{DBO_5} = 2.82C_{DQO}^{0.49} \quad (4.4)$$

Donde el primer término a la derecha de la ecuación (4.3) se determinó para ajustar al valor particular de DQO, mientras que el término independiente representa el valor medio de DQO disuelto. Este valor varió aleatoriamente de un escurrimiento a otro, desde 40 hasta 130 gramos de O₂ por dm³. Sin embargo, la DQO disuelto fue menos dependiente en la fase de escurrimiento. A pesar de que ambas ecuaciones (4.3) y (4.4) se hallan simplificadas (el modelo que se presenta no toma en consideración un submodelo de contaminación disuelta), es posible obtener resultados coherentes para concentraciones de DQO y DBO₅ para cuencas similares a la cuenca estudiada.

El conjunto de resultados que se muestran a continuación fueron obtenidos con base en los estudios de campo siguientes: pluviógrafos desde 1989 a 1992, hidrógrafos desde 1989 a 1992, medición de contaminantes desde 1989 a 1991, y mediciones ocasionales de pluviógrafo, hidrógrafo y contaminantes desde 1987 a 1988 (realizados por M. Zawilski 1991-1994 en reportes anuales no publicados, Lodz Politechnic). Los hidrógrafos y mediciones de contaminantes de mayor precisión fueron utilizados para calcular el volumen total de escurrimiento y cargas de SST.

Se calibraron los parámetros que fueron decisivos para modelar el escurrimiento y lavado de contaminantes. La calibración se realizó comparando las mediciones de campo con los resultados de la simulación del modelo. Dichos parámetros fueron estimados inicialmente con base en datos de fuentes secundarias y subsecuentemente ajustados minimizando el error estándar entre los valores medidos y calculados. Otros parámetros del modelo fueron ajustados con base en la literatura, estudios de laboratorio e información local. La base de los modelos del parámetro se presenta en la Tabla 4.2

La cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) se adoptó como la medida básica de calidad del agua. La calibración y verificación del modelo para el lavado de contaminantes de la cuenca se basó en este parámetro. La concentración de otros contaminantes (DQO, DBO₅) fue calculada para la cuenca en estudio con base en su correlación con los SST. Dicha correlación fue establecida a través de estudios cualitativos. Las ecuaciones 4.3 y 4.4, obtenidas a partir de casi 70 muestras con un coeficiente de correlación de 0.85, permitieron la simulación de la concentración de contaminantes, expresada en términos de la DQO y la DBO₅.

$$C_{DQO} = 2.08C^{0.66} + 70 \quad (4.3)$$

$$C_{DBO_5} = 2.82C_{DQO}^{0.49} \quad (4.4)$$

Donde el primer término a la derecha de la ecuación (4.3) se determinó para ajustar al valor particular de DQO, mientras que el término independiente representa el valor medio de DQO disuelto. Este valor varió aleatoriamente de un escurrimiento a otro, desde 40 hasta 130 gramos de O₂ por dm³. Sin embargo, la DQO disuelto fue menos dependiente en la fase de escurrimiento. A pesar de que ambas ecuaciones (4.3) y (4.4) se hallan simplificadas (el modelo que se presenta no toma en consideración un submodelo de contaminación disuelta), es posible obtener resultados coherentes para concentraciones de DQO y DBO₅ para cuencas similares a la cuenca estudiada.

El conjunto de resultados que se muestran a continuación fueron obtenidos con base en los estudios de campo siguientes: pluviógrafos desde 1989 a 1992, hidrógrafos desde 1989 a 1992, medición de contaminantes desde 1989 a 1991, y mediciones ocasionales de pluviógrafo, hidrógrafo y contaminantes desde 1987 a 1988 (realizados por M. Zawilski 1991-1994 en reportes anuales no publicados, Lodz Politechnic). Los hidrógrafos y mediciones de contaminantes de mayor precisión fueron utilizados para calcular el volumen total de escurrimiento y cargas de SST.

Se calibraron los parámetros que fueron decisivos para modelar el escurrimiento y lavado de contaminantes. La calibración se realizó comparando las mediciones de campo con los resultados de la simulación del modelo. Dichos parámetros fueron estimados inicialmente con base en datos de fuentes secundarias y subsecuentemente ajustados minimizando el error estándar entre los valores medidos y calculados. Otros parámetros del modelo fueron ajustados con base en la literatura, estudios de laboratorio e información local. La base de los modelos del parámetro se presenta en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Método de determinación de los parámetros del modelo

Parámetro (1)	Método o base para la determinación del valor del parámetro (2)
λ	Estudios realizados y calibración del modelo para cuencas específicas
n	Valor obtenido en la literatura para un tipo dado de superficie de la cuenca
q_p	Mediciones pluviométricas: intensidad para una lluvia de larga duración sin que se presente escurrimiento
h_a	Mediciones pluviométricas: tirante de lluvia sin que se presente escurrimiento
h_o	Estudios y calibración del modelo
h_n	Estudios y calibración del modelo
q_{cp}, q_{ck}, ζ	Valores obtenidos en la literatura de acuerdo al tipo de suelo, parcialmente calibrado
a, b, c, d, k_{min}	Estudios y calibración del modelo
β_1, β_2	Estudios de laboratorio sobre polvo y basura
a_1	Mediciones de caída de polvo en el área de la cuenca
a_2, η	Literatura e información locales
T	Escogido arbitrariamente con base en la literatura local
w	Calibración del modelo

Los parámetros q_p y h_a (intensidad de evaporación y tirante de humedad inicial, respectivamente) se basaron en los registros pluviométricos para dicha cuenca. Estos parámetros son dependientes, en gran parte, de las condiciones meteorológicas previas y durante la lluvia, así como del tipo de superficie. Los valores de ambos parámetros se emplean únicamente en condiciones de verano, donde las lluvias se presentan después de un largo periodo de clima seco.

El parámetro q_p está calibrado con base en lluvias de baja intensidad que ocasionan un escurrimiento superficial no observable a pesar de su larga duración y el cual presenta un tirante total de lluvia de al menos 1 mm. En tal caso la superficie resulta completamente humedecida y la intensidad media de precipitación es menor al valor de q_p . Si cualquier escurrimiento es observado, la intensidad de lluvia es mayor a q_p .

El parámetro h_a está calibrado para lluvias de tirante total bajo, pero con una intensidad relativamente alta. En tal caso la intensidad de evaporación q_p es insignificante y el tirante total de precipitación es menor al valor de h_a . Si cualquier escurrimiento es observado, el tirante total de precipitación es mayor que el valor de h_a .

El coeficiente n de la ecuación de Manning depende de la rugosidad de la cuenca abarcando valores desde 0.009 para superficies excepcionalmente lisas hasta

valores de 0.05 para superficies muy rugosas, de piedra y cubiertas de vegetación. Para realizar un análisis general del escurrimiento en toda la cuenca es necesario un valor promedio. En este estudio el valor promedio obtenido para el coeficiente n en toda la cuenca se consideró como $n = 0.01$ para el caso de superficies impermeables (tejados o asfalto liso), $n = 0.02$ para el caso de superficies parcialmente permeables (concreto desigual o pavimento) y $n = 0.04$ para el caso de superficies permeables. No hubo consideraciones respecto al tipo de flujo presente (laminar o turbulento) o a la influencia de la velocidad del flujo en la pérdida de energía.

El valor de λ (la longitud real de flujo superficial a lo largo del área de la subcuenca dentro de la cuenca urbana) depende de la densidad de alcantarillas pluviales instaladas y, en cierto grado, del tamaño de la propia subcuenca (Stephenson, 1989). Su valor es de varias decenas de metros y puede establecerse a través de la calibración del modelo.

Los parámetros de las tasas de decaimiento e infiltración (q_{cp} , q_{ck} , ζ) de la ecuación de Horton dependen en gran parte de dos propiedades del suelo, su contenido de agua y la vegetación existente. Estos parámetros han sido objeto de numerosos estudios. En este caso se verificó información de fuentes secundarias referentes a precipitaciones de tirantes excepcionalmente grandes que ocurrieron después de un largo periodo de estiaje. En estas condiciones el escurrimiento total es significativamente mayor a los valores calculados de escurrimiento para superficies impermeables y parcialmente permeables. Esta diferencia, de alrededor de un 20% se da aparentemente en la parte descendente del hidrograma, cerca del final del escurrimiento, el cual puede explicarse debido a que la capacidad de absorción del suelo se satura. No fue posible realizar una calibración más precisa de los parámetros de la ecuación de Horton debido a los pocos datos disponibles sobre este aspecto.

El valor de la caída de polvo (a_1) fue calibrado con base en mediciones de campo; dicho valor de la caída de polvo debería ser ajustado para cada cuenca individualmente. Mensualmente en toda Polonia se realizan mediciones de caída de polvo. La red de puestos de medición es bastante densa, lo suficiente para establecer el monto de contaminantes recolectados en la superficie de la cuenca en forma de polvo. En la cuenca estudiada hubo siete puntos de medición. En el transcurso de la investigación la caída de polvo fue entre 0.2 y 0.6 g/m²-día; los valores máximos se presentaron de febrero a abril. La variabilidad de la caída de polvo durante el periodo de observación se incorporó al modelo.

La cantidad de basura acumulada en las calles y manzanas (a_2) y el coeficiente de eficacia de barrido (η) se basaron en mediciones realizadas en cuencas similares en Polonia, así como en datos locales, de donde se obtuvieron los valores de $a_2 = 2.0$ kg/m²-año y $\eta = 1.0$ (indicando que la frecuencia de barrido de calles fue de una vez al año). Estos parámetros deberían ser ajustados para cada cuenca analizada con base en la cantidad de basura acumulada en las calles y en la

frecuencia de barrido de las mismas. Los coeficientes para la conversión de masa de basura seca y polvo en la cantidad de sólidos suspendidos se consideraron (con base en estudios previos de Osuch-Pajdzinska, 1987) como $\beta_1 = \beta_2 = 0.45$. El periodo de acumulación de contaminantes previo a la primera lluvia analizada fue de $T = 10$ días. Después de cierta duración del periodo de estiaje, el incremento de la basura acumulada en calles y manzanas se vuelve insignificante debido a factores tales como la resuspensión, el viento, el tránsito y el barrido de caminos.

El modelo fue calibrado comparando la información obtenida por las mediciones de lluvias ocurridas en el periodo 1989 – 1991 con los cálculos de la simulación. Para calibrar la simulación de escurrimiento, se compararon las ordenadas del hidrograma con el volumen de escurrimiento. Para calibrar la simulación de los SST lavados, se utilizaron las ordenadas de las gráficas de concentración y carga de contaminantes, así como la de los SST medidos.

El error relativo de las ordenadas de las gráficas de gasto y contaminantes fue calculado de la manera siguiente:

$$\Delta y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^{(m)} - y_i^{(s)}}{y_{\max}^{(m)}} \right]^2 \cdot \frac{1}{n_m} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

donde:

$y^{(m)}$ = Valor medido

$y^{(s)}$ = Valor simulado (modelado)

n_m = Número de puntos de medición

El error relativo de la tasa pico de flujo, volumen de escurrimiento y carga de contaminantes lavados fue calculados de la manera siguiente:

$$\Delta z = \frac{z^{(m)} - z^{(s)}}{z^{(m)}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

donde:

$z^{(m)}$ = Valor medido

$z^{(s)}$ = Valor simulado

Los parámetros óptimos del modelo fueron obtenidos correspondiendo a los errores mínimos para los cinco valores característicos mencionados.

Programa de cálculo y simulación

El programa para simular las gráficas de escurrimiento y contaminantes consiste en tres bloques o partes:

- El Bloque A es la entrada de datos sobre la geometría de la cuenca y el sistema de alcantarillado pluvial y el cálculo de datos de salida para subcuencas.
- El Bloque B es el cálculo de la acumulación de contaminantes y lavado para un periodo de lluvias dado, descrito por la fecha y hora de la lluvia, su duración y su tirante total de precipitación. Los parámetros de caída de polvo y acumulación de basura se dan también como datos de entrada. Esta simulación inicial calcula el lavado de contaminantes de la cuenca considerando una intensidad de lluvia media y constante. Los cálculos suministran la carga de SST acumulados en la superficie de la cuenca previamente a cada precipitación.
- El Bloque C es la simulación del fenómeno de escurrimiento de la lluvia, el cálculo de gráficas de escurrimiento y de SST para una lluvia dada.

Para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales que modelan el flujo del agua de lluvia y la carga de contaminantes se utilizó el método de Runge-Kutta. El tiempo base para cálculos hidráulicos fue de 1 minuto para lluvias torrenciales y de 10 minutos para lluvias leves. La simulación del lavado requiere un tiempo base cuatro veces menor.

Resultados de la calibración

Los valores de los rangos de error calculados para las lluvias registradas durante el periodo 1989-1991 se presenta en las Tablas 4.3 y 4.4 así como en las Figuras 4.3 y 4.4. También se calculó el error promedio anual, el cual corresponde a la raíz cuadrada del valor promedio de los cuadrados de los errores para cada año. Los valores en las Tablas 4.3 y 4.4 fueron calculados para los parámetros calibrados del modelo de las Tablas 4.5 y 4.6. Los errores calculados sugieren una distinta correlación entre los valores del modelo y los medidos durante los estudios de campo. Generalmente, los errores mayores en el modelo de lavado de contaminantes son causados por la superposición de errores en el modelo de escurrimiento a causa de que la intensidad del escurrimiento es un dato de entrada para el modelo de SST lavados. Errores menores en el lavado de contaminantes se obtuvieron comúnmente para aquellas lluvias en las cuales el error en el cálculo de escurrimiento fue menor. Los errores son causados por diversos factores, tales como pequeñas fluctuaciones en el nivel del agua en el pozo del limnógrafo, las cuales causan errores en las lecturas del tirante de agua; un error sistemático en el cálculo de las tasas de flujo basadas en el tirante de agua dentro de las alcantarillas; una distribución desigual de la lluvia a lo largo de la cuenca; y el muestreo realizado únicamente durante eventos de escurrimiento

Tabla 4.3 Rangos de error para el escurrimiento en las alcantarillas

Año de estudio (1)	Rango de intensidades medias de lluvia medidas, q_{op} ($dm^3/s/ha$) (2)	Rango de tasas pico de flujo medidas, $Q_{máx}$ (m^3/s) (3)	Rango de tirantes de escurrimiento medidos, H_{coj} (mm) (4)	Número de mediciones (5)	Error relativo en las ordenadas del hidrograma, ΔQ (%)		Error relativo absoluto del volumen de escurrimiento, ΔV (%)		Error relativo absoluto de la tasa pico de flujo, $\Delta Q_{máx}$ (%)	
					Rango (6)	Promedio (7)	Rango (8)	Promedio (9)	Rango (10)	Promedio (11)
1989	1.0 - 18.3	0.07 - 3.71	0.16 - 3.97	12	13 - 36	24	8 - 35	24	4 - 62	37
1990	0.8 - 12.1	0.05 - 3.27	0.23 - 20.24	19	12 - 35	24	4 - 63	30	0 - 61	29
1991	1.2 - 60.5	0.07 - 4.50	0.51 - 19.90	14	10 - 49	25	0 - 35	21	3 - 61	27
1992	0.6 - 27.0	0.03 - 1.26	0.28 - 3.52	8	16 - 32	24	6 - 71	37	3 - 32	20
1989-1992 Total				53		24		28		30

Tabla 4.4 Rangos de error para el lavado de Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Año de estudio (1)	Rango de intensidades medias de lluvia medidas, q_{op} ($dm^3/s/ha$) (2)	Rango de concentraciones de contaminantes medidas, $C_{máx}$ (g/m^3) (3)	Rango de SS lavados por la lluvia, L (kg/ha) (4)	Número de mediciones (5)	Error relativo en la ordenada de la gráfica de concentraciones, ΔC (%)		Error relativo de la gráfica de carga de contaminantes, ΔG (%)		Error relativo absoluto de la carga de contaminantes lavada por la lluvia, ΔL (%)	
					Rango (6)	Promedio (7)	Rango (8)	Promedio (9)	Rango (10)	Promedio (11)
1989	1.8 - 8.3	433 - 5875	1.0 - 31.5	7	26 - 41	32	5 - 35	28	19 - 59	38
1990	1.2 - 12.1	180 - 4862	0.3 - 5.5	3	20 - 26	24	25 - 32	28	13 - 33	16
1991	1.2 - 12.4	164 - 2257	1.5 - 14.7	5	28 - 52	37	16 - 60	29	7 - 66	38
1989 - 1992 Total				15				28		35

seleccionados. Para cierta parte de los eventos de escurrimiento (cerca de un 20%), hubo un intervalo de tiempo entre los hidrogramas calculados y medidos para el modelo calibrado en observación. Sin embargo, la forma de las curvas calculadas fue similar a la de la medida. Dichos intervalos de tiempo fueron aleatorios; las gráficas calculadas fueron de eventos ocurridos pocos minutos antes o después que los eventos mostrados en las gráficas medidas. Esto pudo ser causado por errores al registrar los tiempos de lluvia y flujo en la alcantarilla o por un movimiento lento de la lluvia sobre la cuenca. Estos errores, provocados por los intervalos de tiempo transcurridos entre mediciones, influyen sobre el nivel de error en las ordenadas de las gráficas de escurrimiento y contaminantes. Cabe observar que dichos errores son realmente poco significativos para el uso práctico del modelo y no tiene influencia en tasas de flujo pico así como en el volumen de escurrimiento total y la carga de contaminantes lavados.

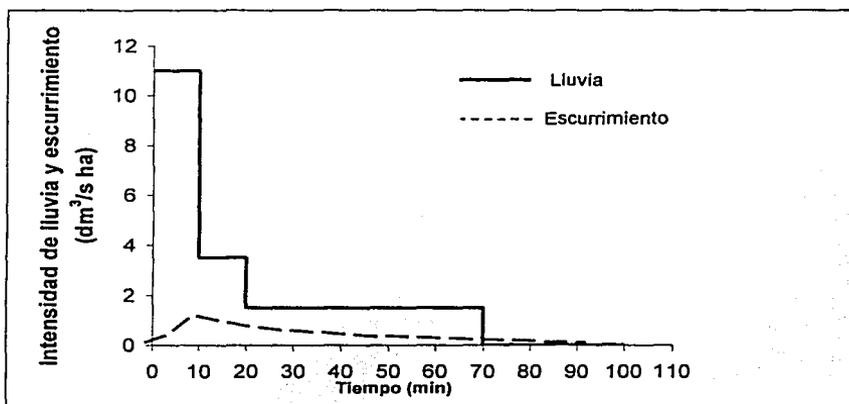


Fig. 4.2a

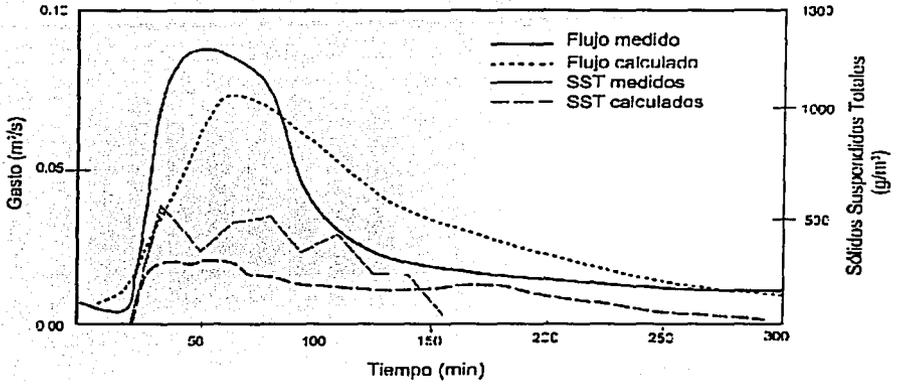


Fig 4.2b

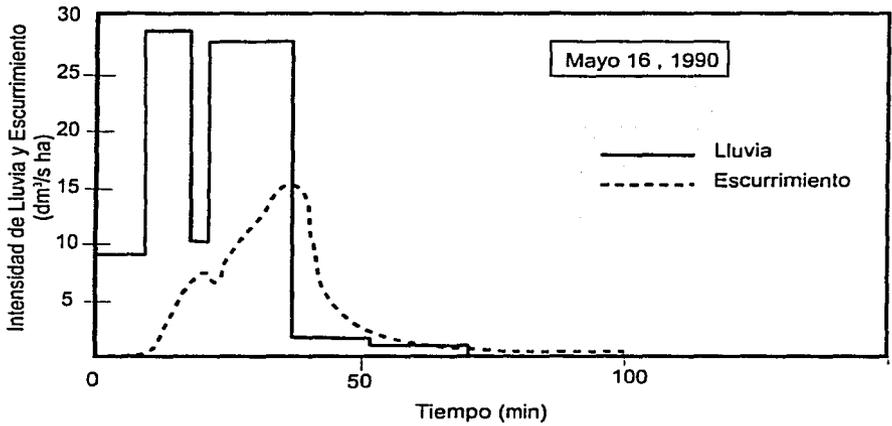


Fig 4.2c

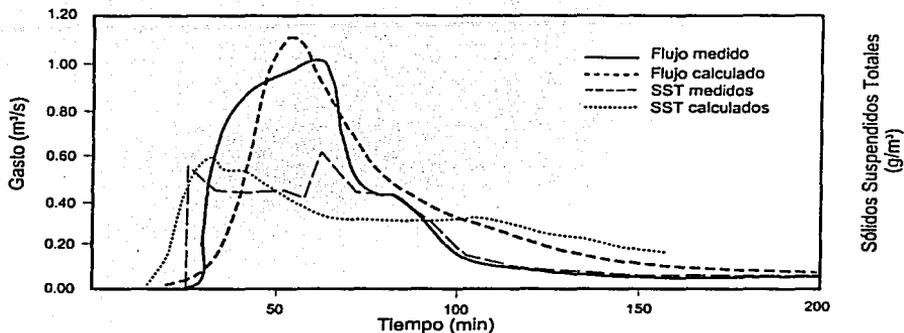
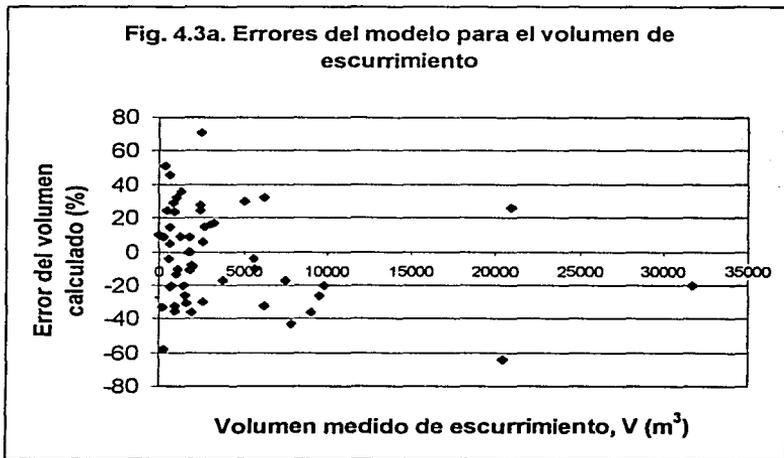


Fig 4.2d

Fig 4.2 Dos ejemplos del modelado: (a) y (c) de gasto de agua de lluvia y ; (b) y (d) de concentración de SST. Las figuras (a) y (b) son para una lluvia registrada el 8 de Agosto de 1989 y las figuras (c) y (d) son para una lluvia registrada el 16 de Mayo de 1990.



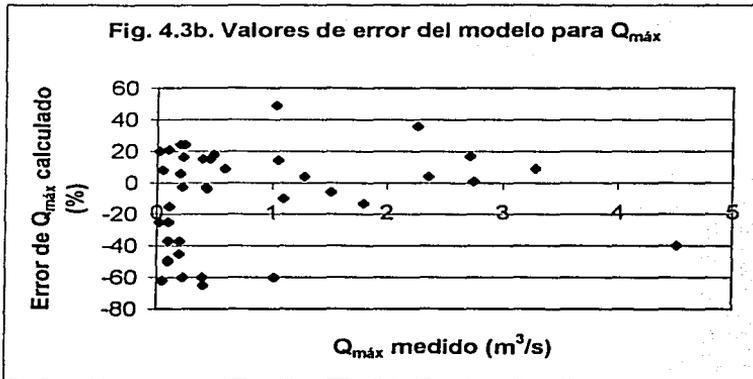


Fig. 4.4a. Valores de error del modelo para SST lavados

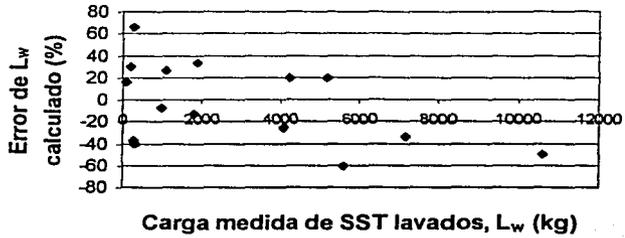
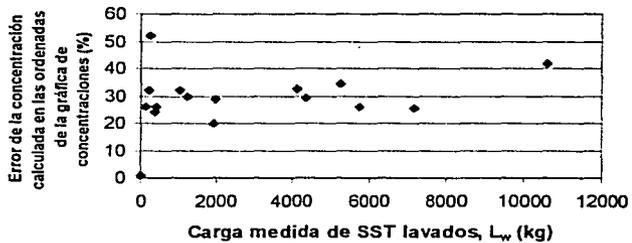


Fig. 4.4b. Valores de error del modelo para la concentración total de SST



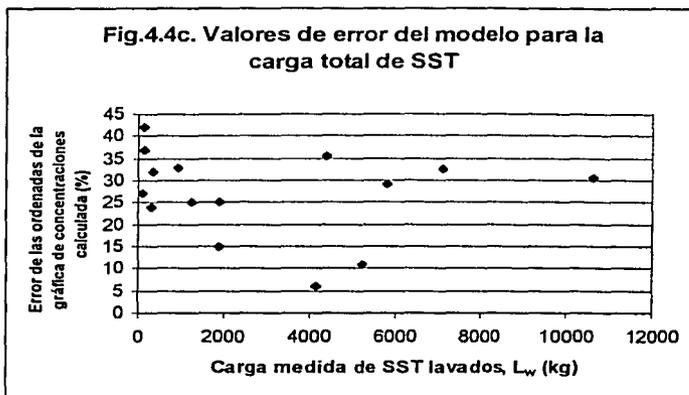


Figura 4.4 Valores de error del modelo: (a) para carga lavada de SST; (b) para las ordenadas de concentraciones de SST; (c) para las ordenadas de la gráfica de concentraciones totales de SST

Tabla 4.5 Valores calibrados de los parámetros empíricos para el modelo de escurrimiento de lluvia

Tipo de superficie de la cuenca (1)	Parámetro (2)	Simbología (3)	Valor (4)
Impermeable	Longitud del flujo superficial	λ_1	50 m
	Capacidad de almacenamiento en depresiones	h_{01}	0.4×10^3 m
	Tirante de humedad inicial	h_{a1}	0.1×10^3 m
	Intensidad de evaporación	q_p	$0.2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
Parcialmente permeable	Longitud del flujo superficial	λ_2	75 m
	Capacidad de almacenamiento en depresiones	h_{02}	2.0×10^3 m
	Tirante de humedad inicial	h_{a2}	0.5×10^3 m
	Tirante para el cálculo de pérdidas por infiltración	h_h	1.75×10^3 m
Permeable	Intensidad de evaporación	q_p	$0.2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
	Longitud del flujo superficial	λ	100 m
	Tasa inicial de infiltración en el suelo	q_{cp}	$250 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

Tasa final de infiltración en el suelo	q_{ck}	$5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$
Tasa de decaimiento de la infiltración	ζ	0.03 min^{-1}
Intensidad de evaporación	q_p	$0.2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$

Tabla 4.6 Parámetros empíricos calibrados para la determinación del coeficiente de la tasa de lavado de contaminantes

Parámetro (1)	Valor (2)
a	17.8×10^7 (a)
b	4.5×10^7 (b)
d	$1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
c	0.10
kmín	1.0
	10 m^{-1}

Nota: (a) se utiliza para determinar la tasa media de k para todo el escurrimiento, de acuerdo a las ecuaciones (3.19) a la (3.22). El valor (b) es para el cálculo de la tasa k para cualquier instante durante el evento de lavado de acuerdo a la ecuación (3.19)

La composición de los contaminantes en la cuenca cambia periódicamente, como en el caso de la caída de hojas o semillas, que cambia drásticamente al transcurrir las estaciones del año. No fue posible describir la influencia de dichos factores en la cantidad de contaminantes acumulados y su tasa de lavado (sin considerar algunas variaciones mensuales en la caída de polvo). Además, esta influencia era más bien pequeña en la cuenca estudiada a causa de las limitadas áreas verdes existentes y el predominio de contaminantes minerales (80-85%). Con algunas mediciones adicionales podría considerarse al coeficiente de frecuencia de barrido de calles, a_2 , como un parámetro variable con respecto al tiempo.

El modelo no considera la acumulación de contaminantes dentro de la red de alcantarillado o los cambios en la calidad del agua durante el flujo dentro de ella. Estos fenómenos fueron considerados despreciables para la cuenca en estudio debido a las grandes pendientes que se presentan (por lo cual existe muy poca acumulación), y a una gran proporción de contaminantes minerales (por lo el efecto por parte de los procesos bioquímicos es insignificante). Algunos sedimentos fueron hallados en la red de alcantarillado después de haberse presentado lluvias fuertes. El transporte y la acumulación de contaminantes pueden ser considerados después de la determinación de la estructura de los contaminantes sólidos.

Análisis de sensibilidad del modelo

Se requirió un análisis de sensibilidad del modelo presentado se requirió para evaluar su uso y limitaciones, así como para abrir paso a investigaciones posteriores. Este análisis se basó en el cálculo de los cambios presentados en los valores básicos del modelo al variar el valor de sus parámetros. Se analizaron dos precipitaciones de intensidad constante: Lluvia 1, con una intensidad $q = 100 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ y una duración $t_d = 15 \text{ min}$ ó 0.25 h , y una Lluvia 2, con una intensidad de $q = 5 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ y una duración $t_d = 180 \text{ min}$ ó 3 h . Se utilizaron como modelos de referencia del parámetro los que se muestran en las tablas 4.5 y 4.6. El análisis de sensibilidad se muestra en las Tablas 4.7 a 4.11, en la Figura 4.5 para el lavado de SST y en las Figuras 4.6 y 4.7 para la carga de SST acumulados. El tirante de humedad inicial, h_a , tiene poco efecto en las lluvias analizadas pero puede tener influencia en lluvias de intensidad menor a $5 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$.

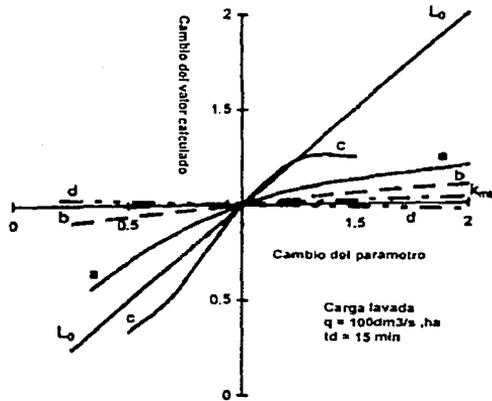


Fig. 4.5a

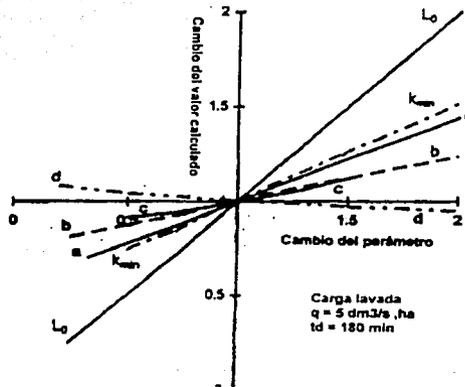


Fig. 4.5b

Fig. 4.5 Análisis de sensibilidad para la carga lavada de SST y los parámetros del modelo de lavado de contaminantes

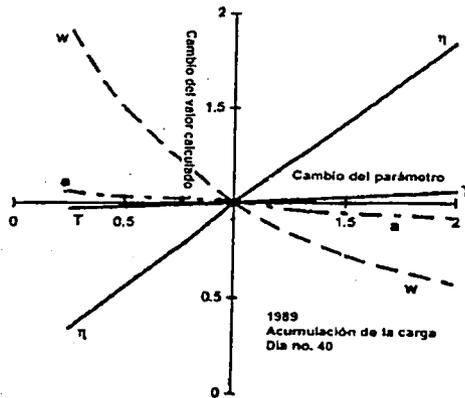


Fig. 4.6a

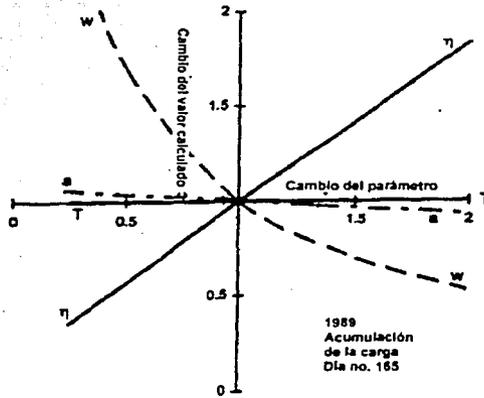


Fig. 4.6b

Fig. 4.6 Análisis de sensibilidad para la acumulación de SST en la superficie de la cuenca

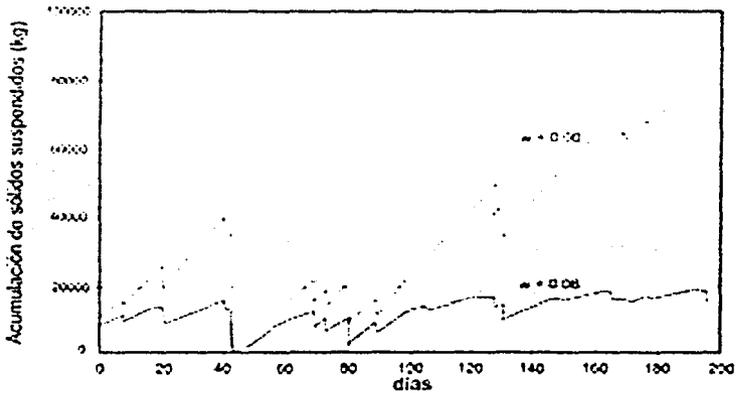


Fig. 4.7a Conducta de la acumulación de carga calculada para 1989 (del 20 de Abril al 7 de Noviembre)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

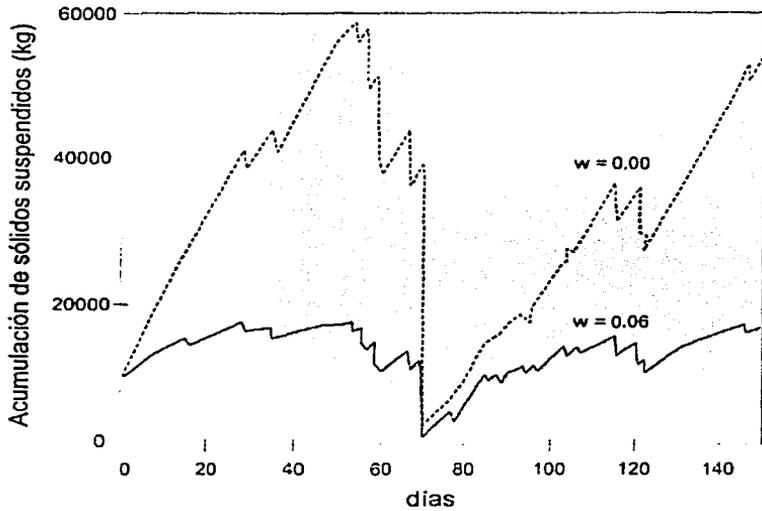


Fig. 4.7b Conducta de la acumulación de contaminantes calculada para 1991 (del 18 de Abril al 16 de Septiembre)

Tabla 4.7 Análisis de sensibilidad del modelo: Volumen de escurrimiento

Cambio del parámetro (1)	h_0 (2)	h_h (3)	α (4)
0.25	1.30	1.38	1.10
	1.29	1.17	0.86
0.50	1.16	1.17	1.06
	1.15	1.09	0.95
0.75	1.04	1.06	1.03
	1.08	1.05	0.99
1.0	1	1	1
	1	1	1
1.5	0.89	0.95	0.97
	0.87	0.93	1.01
2.0	0.81	0.89	0.94
	0.83	0.87	1.03

Tabla 4.8 Análisis de sensibilidad del modelo: Tasa pico de flujo

Cambio del parámetro (1)	h_0 (2)	h_h (3)	α (4)
0.25	1.26	1.52	1.24
	1.33	1.10	0.63
0.50	1.16	1.28	1.16
	1.20	1.08	0.85
0.75	1.10	1.12	1.08
	1.12	1.05	0.96
1.0	1	1	1
	1	1	1
1.5	0.93	0.96	1.00
	0.88	0.92	1.05
2.0	0.88	0.92	0.96
	0.79	0.85	1.07

Tabla 4.9 Análisis de sensibilidad del modelo: Carga lavada de SST

Cambio del parámetro (1)	h_0 (2)	h_h (3)	α (4)	L_0 (5)	a (6)	b (7)	c (8)	d (9)	k_{min} (10)
0.25	1.37	1.46	1.09	0.25	0.65	0.81	0.17	1.07	0.64
	1.12	1.03	0.64	0.25	0.42	0.91	0.37	1.04	0.99
0.50	1.19	1.20	1.06	0.50	0.78	0.87	0.30	1.04	0.75
	1.08	1.02	0.85	0.50	0.70	0.94	0.59	1.02	0.99
0.75	1.11	1.07	1.03	0.75	0.88	0.93	0.54	1.02	0.85
	1.06	1.01	0.95	0.75	0.93	0.97	0.83	1.01	1.00
1.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.5	0.88	0.92	0.96	1.5	1.22	1.12	2.76	0.97	1.15
	0.93	0.96	1.06	1.5	1.10	1.06	1.06	0.99	1.01
2.0	0.79	0.87	0.94	2.0	1.44	1.23	6.54	0.95	1.34
	0.87	0.92	1.08	2.0	+ 20	1.20	1.10	0.97	1.01

**Tabla 4.10 Análisis de sensibilidad del modelo:
Concentración pico de SST**

Cambio del parámetro (1)	L_0 (2)	a (3)	b (4)	c (5)	d (6)	K_{min} (7)
0.25	0.25	0.43	0.63	0.18	1.40	0.79
	0.25	0.28	0.46	0.19	1.44	0.98
0.50	0.50	0.67	0.78	0.32	1.19	0.86
	0.50	0.53	0.68	0.34	1.21	0.99
0.75	0.75	0.85	0.90	0.57	1.09	0.93
	0.75	0.88	0.85	0.59	1.11	1
1.0	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1
1.5	1.5	1.37	1.15	3.13	0.90	1.15
	1.5	1.45	1.23	2.59	0.88	1.01
2.0	2.0	1.65	1.28	5.32	0.83	1.30
	2.0	1.852	1.41	5.40	0.80	1.02

Nota: Los valores superiores están asociados con la intensidad media de lluvia (5 dm³/s·ha), los valores inferiores están asociados a una gran intensidad de lluvia (100 dm³/s·ha)

Tabla 4.11 Análisis de sensibilidad del modelo: Acumulación de SST

Cambio del parámetro (1)	T (2)	w (3)	a_k (4)	η (5)
0.25	0.97	1.91	1.06	0.34
	1.00	2.49	1.05	0.36
0.50	0.98	1.50	1.03	0.55
	1.00	1.70	1.04	0.57
0.75	1	1.26	1.01	0.77
	1.00	1.16	1.03	0.78
1.0	0	1	1	1
	1	1	1	1
1.5	1.03	0.72	0.95	1.42
	1.00	0.69	0.96	1.41
2.0	1.06	0.56	0.91	1.84
	1.00	0.52	0.93	1.83

La carga de contaminantes acumulados en la superficie antes de la lluvia tiene un impacto significativo en el valor de la carga de contaminantes lavados como se muestra en la Figura 4.5. No es difícil determinar el valor de L_0 cuando el grado de contaminación de la cuenca es analizado con precisión.

Un cambio en el valor del factor viento, w , provoca cambios significativos en la carga de contaminantes acumulados, el cual es notorio particularmente a finales del periodo de experimentación (a finales de verano y en otoño). El análisis de sensibilidad fue realizado para dos días de lluvia en 1989 (Figura 4.6). En un caso extremo, en el cual este parámetro sea significativamente bajo (menor a 0.02 por día), la carga de contaminantes acumulados simulada y el lavado pronosticado incrementan a valores mucho mayores a los observados en los estudios de campo. Este fenómeno ocurrió durante los tres años de observación (1989-1991), con solamente pequeñas diferencias entre el año 1989, más bien húmedo, y el año 1991, que fue muy seco (Figura 4.6). Se puede decir que al omitir el parámetro w se obtiene un modelo de acumulación de SST inestable.

Es posible obtener un modelo preciso de lavado de SST únicamente si se considera un coeficiente k variable con respecto a la duración de la lluvia. En la fórmula empírica (3.19) hay varios parámetros constantes que afectan considerablemente el resultado final. A pesar de que todos los parámetros han sido calibrados, pueden tener valores diferentes para cuencas con diferentes tipos de contaminantes sólidos, por ejemplo, para cuencas en zonas industriales. Por lo tanto, es interesante conocer cómo el posible cambio de un parámetro en particular puede cambiar los resultados finales del modelo (Tabla 4.7). La influencia de los parámetros c y a es especialmente importante para el caso de lluvias intensas. Para lluvias de intensidad moderada hay una influencia adicional de los parámetros b y k_{min} , a causa de que el coeficiente b es entonces menos dependiente de la intensidad de escurrimiento. Durante el modelado de gráficas de contaminantes aparece una influencia adicional del parámetro d , el cual limita los valores máximos de k . (Los valores máximos de k observados en la primera fase del escurrimiento no fueron causados por la resuspensión de sedimentos en la alcantarilla, debido a que la velocidad del agua no se incrementó de forma significativa). La influencia del parámetro c es altamente variable, su valor es decisivo para el valor del nivel de concentración máxima para el caso de lluvias intensas, pero prácticamente tiene poca importancia para el caso de lluvias de intensidad moderada donde las concentraciones son regulares a lo largo de toda la gráfica. La tasa de lavado de SST es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de escurrimiento superficial efectiva, la cual corresponde bien al valor determinado $c = 1$. El efecto en los cambios del coeficiente de la tasa de lavado de contaminantes en el resultado final se presenta en la Figura 4.8

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

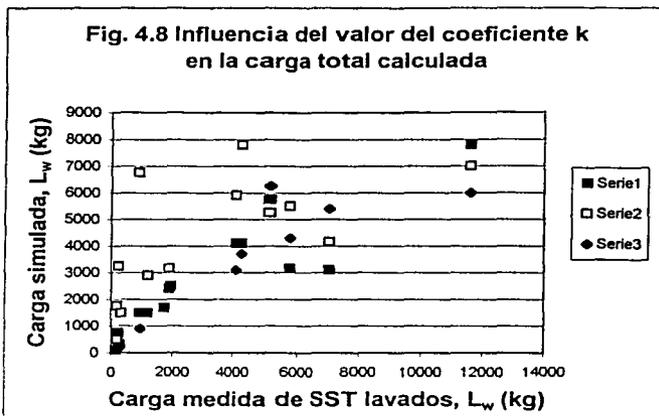


Fig. 4.8 Influencia del valor del coeficiente k de la tasa de lavado de contaminantes en la carga lavada total simulada. Serie 1, obtenida por medio de la simulación de la acumulación de contaminantes para tres años de lluvias históricas, con un coeficiente k variable. Serie 2, para el mismo caso, pero con un coeficiente $k = 181 \text{ m}^1$ constante. Serie 3, obtenida a través de la simulación individual de lluvias, con un coeficiente k variable.

Aplicación del modelo a otras cuencas

Los modelos de acumulación de contaminantes y lavado de contaminantes de una cuenca por la lluvia pueden ser usados para pronosticar la cantidad y calidad del agua de lluvia para cualquier cuenca urbana. Uno puede aplicar con facilidad el modelo a cualquier cuenca suministrando la información de entrada apropiada sobre el desarrollo y contaminación de la cuenca, su geometría, y el trazo de la red de alcantarillado pluvial.

El modelo ya calibrado fue sometido a prueba por sus autores en la cuenca de Orzycka en Warsaw (Varsovia). El Instituto de Protección al Ambiente, en su División de Varsovia, dirigieron estudios de campo en dicha cuenca en los periodos de 1977-1978 y 1988-1989. La cuenca es similar a la analizada en Lodz, con un área total aproximada de 300 ha, de las cuales 140 ha son de superficie endurecida.

Sólo algunos de los escurrimientos de lluvia registrados fueron seleccionados para esta verificación. Las mediciones de precipitación fueron realizadas utilizando tres pluviómetros localizados en diferentes puntos de la cuenca. El tirante en las alcantarillas se midió utilizando un limnógrafo y el muestreo se realizó con un

aparato automático en la descarga del tramo colector. El modelo de escurrimiento fue verificado para 23 lluvias y la simulación del lavado de contaminantes fue verificado para las siete gráficas de contaminantes mejor medidas. Los modelos de los valores constantes utilizados en el programa de cálculo de flujo de agua de lluvia y simulación del lavado de contaminantes fueron idénticos a los utilizados en la cuenca en Lodz, con la excepción de que la tasa final de infiltración en el suelo fue ajustada a $25 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, con base en el tipo de suelo. La información sobre caída de polvo, acumulación de basura y frecuencia de barrido de calles se obtuvo a partir de estudios específicamente realizados para la cuenca en estudio.

La Tabla 4.12 presenta los valores promedio del error relativo calculados con las ecuaciones 4.5 y 4.6 para el volumen total de escurrimiento, gráficas de escurrimiento y contaminantes, así como la carga total de contaminantes lavados. Los resultados muestran que generalmente la simulación del escurrimiento de lluvia produjo errores menores que los calculados para la cuenca en Lodz. Esta mayor precisión es debida posiblemente a una precisión mayor en las mediciones pluviométricas. En varios casos de intensidad de lluvia, distribuida irregularmente, el valor utilizado para las gráficas se obtuvo con una buena precisión calculando el promedio de los valores medidos en tres pluviómetros. Es de esperarse que la simulación del escurrimiento mejore al utilizar múltiples estaciones pluviométricas y los valores medidos se encuentran menos dispersos. Sin embargo, los valores promedio de las tasas pico de flujo y escurrimiento para periodos mayores de medición son similares a los obtenidos utilizando las características de lluvia obtenidas mediante una sola medición (Fuchs y Harms, 1986). Dos de las gráficas de SST mostraron errores significativos, en un rango de 100 a 200%. La causa probable de tales errores fue un error sistemático en el muestreo (muestreo de un mismo nivel de agua) o bien por la tasa de flujo variable. En el caso de los otros cinco conjuntos de datos la diferencia entre los resultados de los cálculos y las mediciones se encontró en el rango de 25 a 50%. Estos resultados demuestran la posibilidad de la aplicar el modelo a diferentes cuencas.

Tabla 4.12 Errores medios para la cuenca Orzycka, en Varsovia, calculados utilizando las ecuaciones (4.5) y (4.6)

Evento simulado (1)	Valor calculado (2)	Error relativo medio, (%) (3)
Escurrecimiento (24 lluvias)	Volumen total de escurrimiento	24
	Ordenadas de los hidrografos	19
	Tasa pico de flujo	25
Lavado de contaminantes (5 lluvias)	Carga lavada de SST	28
	Ordenadas de las gráficas de concentración de contaminantes	29
	Ordenadas de las gráficas de carga de contaminantes	25

CAPÍTULO 5

Conclusiones

De los objetivos planteados inicialmente y de acuerdo con el desarrollo del estudio presentado, se derivan las siguientes conclusiones:

- Hasta hace poco, gran parte de los estudios realizados en materia ambiental se enfocaron solamente a las fuentes de contaminación puntual, tales como las descargas de desechos industriales, sin considerar a los contaminantes provenientes de diferentes fuentes y producidos por actividades diferentes a la industria, y que con frecuencia suelen tener un mayor impacto en el ambiente que los anteriores.
- Actualmente, en México no existe ninguna referencia a este tipo de fuentes de contaminación en la legislación existente en materia ambiental.
- Las fuentes de contaminación no puntual son muy diversas, pero en general, las medidas de mitigación del impacto de dichas fuentes dependen de la cultura y la conciencia de la población, lo cual a su vez genera un mejor aprovechamiento de los recursos.
- Existen diversos modelos matemáticos que simulan los efectos de la contaminación por fuentes no puntuales que sería importante conocer con el propósito de estudiar la factibilidad de aplicarlos en nuestro país.
- El método presentado para simular la calidad del agua en un alcantarillado pluvial puede ser utilizado para cualquier cuenca con un área no mayor a 300 ha utilizando los parámetros presentados, salvo unas pocas excepciones en las cuales los parámetros deben ser obtenidos a través de pruebas de laboratorio o registros hidrológicos locales.

Apéndice 1.

Simbología (Capítulo 3)

Líteral	Descripción	Unidades
a	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	
a ₁	Caída de polvo	kg/m ² -día
a ₂	Cantidad de basura acumulada en calles y manzanas	kg/m ² -día
b	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	m
c	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	
d	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	
c _t	Concentración actual de contaminantes	g/m ³
F	Area de la cuenca	m ²
F _{ri}	Area de la superficie endurecida de la cuenca (impermeable o parcialmente permeable) a partir de la cual el escurrimiento entra a la red en el tiempo t	m ²
F _u	Area de calles y manzanas	m ²
f	Area de la subcuenca unitaria, $f = \Delta b \Delta l$	m ²
G _t	Flujo actual de contaminantes	kg/s
H	Tirante del escurrimiento	m
H _{ef}	Tirante del escurrimiento efectivo	m
H _{ef1}	Tirante del escurrimiento efectivo de una superficie impermeable	m
H _{ef2}	Tirante del escurrimiento efectivo de una superficie parcialmente permeable	m
H _{ent(t-C)}	Tirante del escurrimiento efectivo desde el tiempo t _r hasta el tiempo t ₂	m
H _{∞d}	Tirante total actual del escurrimiento en la superficie	m
H _{∞p}	Total de precipitación actual reducida por la evaporación	m
H _r	Tirante total actual del escurrimiento reducido	m
H _{ra}	Tirante total de precipitación	m
h	Tirante actual de agua fluyendo sobre la superficie	m
h _o	Tirante de humedad inicial, total de lluvia perdida en el proceso de humidificación en la superficie de la cuenca	m
h _h	Tirante empírico para el cálculo de la infiltración a través de una superficie parcialmente permeable	m
h _o	Tirante empírico de las desigualdades del terreno, o capacidad de almacenamiento de las depresiones	m
h _r	Tirante de escurrimiento retenido, o almacenamiento detenido	m
i	Número de precipitaciones consecutivas en el periodo investigado	
i _t	Pendiente del terreno	
j	Número de subcuencas	
k	Coefficiente de la tasa de lavado de contaminantes	m ⁻¹
L _u	Carga unitaria de contaminantes	g/m ²
L _o	Carga de contaminantes acumulados en la superficie de la cuenca previamente a la lluvia	kg
L _{uo}	Carga unitaria de contaminantes acumulados en la superficie de la cuenca previamente a la lluvia	g/m ²
L _k	Carga de contaminantes acumulados en la superficie de la cuenca durante los intervalos entre lluvias	kg
L _{oi}	Carga de contaminantes en la superficie de la cuenca previa a la lluvia i	kg
L _{oi(i-1)}	Carga de contaminantes en la superficie de la cuenca previa a la lluvia (i - 1)	kg
L _r	Carga de contaminantes no lavados de la cuenca	kg
L _{ut}	Carga unitaria de contaminantes no lavados de la cuenca en el tiempo t	g/m ²

L_{uw}	Carga unitaria de contaminantes lavados de la cuenca por el escurrimiento	g/m^4
$L_{uw(t_1-t_2)}$	Carga unitaria de contaminantes lavados por el escurrimiento en el intervalo transcurrido entre los tiempos t_1 y t_2	g/m^4
m	Número máximo de subcuencas, a partir de las cuales el escurrimiento entra en la red en el tiempo t	
N	Parámetro dependiente de la geometría y del tipo de superficie de la cuenca	
n	Coefficiente de rugosidad de Manning	
P	Fracción de superficie impermeable en el área analizada	
p_2	Parámetro auxiliar	
Q_t	Tasa de flujo en un perfil elegido de la red para el tiempo t	m^3/s
q	Intensidad de escurrimiento	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{ck}	Tasa final de infiltración en la tierra	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{co}	Tasa inicial de infiltración en la tierra	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{ef}	Intensidad efectiva de escurrimiento	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{ef1}	Intensidad efectiva de escurrimiento a partir de una superficie impermeable	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{ef2}	Intensidad efectiva de escurrimiento a partir de una superficie parcialmente permeable	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{ef3}	Intensidad efectiva de escurrimiento a partir de una superficie permeable	$m^3/m^2 \cdot s$
q_f	Tasa de infiltración en la tierra	$m^3/m^2 \cdot s$
q_m	Intensidad efectiva de escurrimiento media para un evento lluvia-escurrimiento	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{sd}	Intensidad de sobreflujo en la superficie	$m^3/m^2 \cdot s$
q_{op}	Tasa de precipitación	$m^3/m^2 \cdot s$
q_e	Tasa de evaporación	$m^3/m^2 \cdot s$
q_v	Intensidad de escurrimiento estable arbitraria adoptada en el modelo de transporte	$m^3/m^2 \cdot s$
S_t	Concentración media de contaminantes en el escurrimiento	g/m^3
$S_{t_1-t_2}$	Concentración media de contaminantes en el escurrimiento en el intervalo transcurrido entre los tiempos t_1 y t_2	g/m^3
T	Tiempo de acumulación de contaminantes entre lluvias	día
T_i	Intervalo de tiempo entre las lluvias ($i - 1$) e i	día
t	Tiempo transcurrido desde el inicio de la lluvia	s
t_d	Duración de la lluvia	s
t_p	Tiempo requerido por la red para cubrir parte de los residuos desde una subcuenca dada hacia el punto de análisis	s
t_s	Tiempo de decaimiento del escurrimiento	s
U	Fracción de superficie parcialmente permeable en el área de análisis	
v	Velocidad del flujo en los tramos de la red	m/s
v'	Velocidad del flujo en los tramos de la red en caso de que la tasa de flujo varíe	m/s
v_b	Velocidad del flujo en tramos laterales	m/s
v'_b	Velocidad del flujo en los tramos laterales de la red en caso de que la tasa de flujo varíe	m/s
v_k	Velocidad del flujo en el tramo colector	m/s
v'_k	Velocidad del flujo en el tramo colector de la red en caso de que la tasa de flujo varíe	m/s
W_n	Coefficiente de pérdidas debido a la infiltración	m
W_r	Coefficiente de retención de la superficie	
w	Factor de viento que reduce la acumulación de contaminantes en la cuenca	$día^{-1}$
α	Parámetro que depende de la geometría y tipo de superficie de la cuenca	
β_1	Coefficiente que describe la conversión de masa de materia en particular en un parámetro de un tipo de contaminante dado	
β_2	Coefficiente que describe la conversión de masa de basura en un parámetro de un tipo de contaminante dado	
Δb	Ancho de una subcuenca unitaria	m
Δl	Largo de una subcuenca unitaria	m

ζ	Tasa de decaimiento de la infiltración	min^{-1}
η	Parámetro de efectividad de barrido de calles	
λ	Distancia media de flujo superficial	m
μ_L	Tasa de lavado de contaminantes	$\text{g/m}^2\cdot\text{s}$
τ	Unidad arbitraria de tiempo	s
Ψ	Coefficiente de escurrimiento medio	

Apéndice 2.

Simbología (Capítulo 4)

Literal	Descripción	Unidades
a	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	
a ₁	Caída de polvo	kg/m ² ·día
a ₂	Cantidad de basura acumulada en calles y manzanas	kg/m ² ·día
b	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	m
C	Concentración de contaminantes expresada como sólidos suspendidos totales	g/m ³
c	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	
C _{DQO}	Concentración de contaminantes expresada como DQO	g/m ³
C _{DBO₅}	Concentración de contaminantes expresada como DBO ₅	g/m ³
C _{Ch}	Coefficiente de Chezy	
c _v	Velocidad cinemática de onda	m/s
d	Parámetro constante en la fórmula para el cálculo del coeficiente k	
G	Flujo de contaminantes	kg/s
h	Tirante de agua en la alcantarilla	m
h _a	Tirante de humedad inicial	m
h _h	Tirante empírico para el cálculo de la infiltración a través de una superficie parcialmente permeable	m
h ₀	Tirante empírico de las desigualdades del terreno, o capacidad de almacenamiento de las depresiones	m
i _t	Pendiente del terreno	
k	Coefficiente de la tasa de lavado de contaminantes	m ⁻¹
k _r	Rugosidad de las paredes de la alcantarilla	m
L _w	Carga total de SST lavada	kg
L ₀	Carga de contaminantes acumulados en la superficie de la cuenca previamente a la lluvia	kg
n	Coefficiente de rugosidad de Manning	
n _m	Número de puntos de medición de gasto y contaminantes	
Q	Gasto medido en la alcantarilla	m ³ /s
Q _{st}	Gasto calculado en la alcantarilla para condiciones estables de flujo	cm ³ /s
q	Intensidad de lluvia del modelo	dm ³ /s·ha
q _{ck}	Tasa final de infiltración en la tierra	m ³ /m ² ·s
q _{cd}	Tasa inicial de infiltración en la tierra	m ³ /m ² ·s
q _{oo}	Tasa de precipitación medida	dm ³ /s·ha
q _e	Tasa de evaporación	m ³ /m ² ·s
R	Radio hidráulico	m
v	Volumen de escurrimiento	m ³
T	Período de acumulación de contaminantes previo a la primera lluvia del año	días
t _d	Duración de la lluvia en el modelo	min
w	Factor de viento que reduce la acumulación de contaminantes en la cuenca	día ⁻¹
y _i ^(m)	Valor medido de la ordenada	
y _i ^(s)	Valor calculado (simulado) de la ordenada	
z _i ^(m)	Valor medido del gasto pico, volumen o concentración de contaminantes	
z _i ^(s)	Valor calculado (simulado) del gasto pico, volumen o concentración de contaminantes	
α	Parámetro que depende de la geometría, tipo de superficie y rugosidad de la cuenca	
β ₁	Coefficiente que describe la conversión de masa de materia en particular en un parámetro de un tipo de contaminante dado	

β_2	Coefficiente que describe la conversión de masa de basura en un parámetro de un tipo de contaminante dado	
Δy	Error relativo de las ordenadas de las gráficas de gasto y contaminantes	
Δz	Error relativo del gasto pico, volumen o concentración de contaminantes	
λ	Longitud media del flujo superficial	m
η	Parámetro de efectividad de barrido de calles	
ζ	Tasa de decaimiento de la infiltración	min ⁻¹

BIBLIOGRAFÍA

E. Osuch-Pajdzińska y M. Zawilski
Model for storm sewer discharge
Journal of environmental engineering, Julio de 1998

Larry W. Canter
Environmental Health Impact Assessment
Panamerican Center for Human Ecology and Health
Panamerican Health Organization
World Health Organization, 1986

Ralph C. Palange y Alfonso Zavala
Control de la contaminación del agua
Guías para la planificación y financiamiento de proyectos
Banco Mundial, Washington, D.C., 1989

I.G. Simmons
Earth, Air and Water. Resources and Environment in the late 20th Century
Ed. Edward Arnold, 1991

John G. Rav, Davis C. Wooten
Environmental Impact Analysis Handbook
Ed. Mc. Graw-Hill Book Company, 1980

Schwab, Frevert, Barnes, Edminster
Elementary Soil and Water Engineering
Ed. John Wiley & Sons, 1971

Sitios de Internet

<http://www.epa.gov>

<http://www.epa.gov/OWOW/NPS/facts>