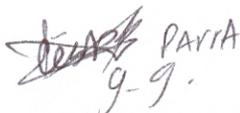


Instituto Tecnológico de Sonora
P r e s e n t e.

El que suscribe **César Guadalupe González Parra**, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: **“SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE REJILLA DE BOCA-TORMENTA DE LA CALLE VICENTE GUERRERO ESQ. CON CALIFORNIA EN CIUDAD OBREGÓN, SONORA, PARA LA DETERMINACIÓN DE SU CAPACIDAD DE CAPTACIÓN”**, en lo sucesivo “LA OBRA”, misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de **Ingeniero Civil** en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante “EL INSTITUTO”, para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.



Handwritten signature of César Guadalupe González Parra, with the name "PARRA" written in capital letters to the right of the signature. Below the signature, the number "9-9" is written.

César Guadalupe González Parra
(Nombre y firma del autor)

Instituto Tecnológico de Sonora
P r e s e n t e.

El que suscribe Juan Jaime García Gámez, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: **“SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE REJILLA DE BOCA-TORMENTA DE LA CALLE VICENTE GUERRERO ESQ. CON CALIFORNIA EN CIUDAD OBREGÓN, SONORA, PARA LA DETERMINACIÓN DE SU CAPACIDAD DE CAPTACIÓN”**, en lo sucesivo “LA OBRA”, misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de Ingeniero Civil en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante “EL INSTITUTO”, para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.



Juan Jaime García Gámez,
(Nombre y firma del autor)



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

**SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE REJILLA DE BOCA TORMENTAS DE
LA CALLE VICENTE GUERRERO ESQUINA CON CALIFORNIA EN
CD. OBREGÓN, SONORA PARA LA DETERMINACIÓN DE SU
CAPACIDAD DE CAPTACIÓN**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

Presenta

**César Guadalupe González Parra
Juan Jaime García Gámez**

Ciudad Obregón, Sonora Marzo 2013

DEDICATORIAS:

Dedico este trabajo primero a mi madre, a la mujer que me dio la vida, a quien admiro cada día, quien me ha dado amor en cada uno de los días de mi vida, a la persona que mas quiero, que da todo por mi, que la persona que e llegado a ser es gracias a ella, me criaste, me educaste, tu lo eres todo para mi madre.

A mi padre, quien toda su vida es un ejemplo a seguir, un luchador inalcanzable, gran ser humano, bondadoso, que siempre cuida a los suyos y que siempre que se le necesita, el siempre a estado allí, dispuesto a dar su mano, a quien no tengo palabras para agradecer todo lo que me a dado, no puedo reprocharte nada porque literalmente me has dado todo, nunca me ha faltado nada, tu que no tuviste un padre como yo, y aun así resultaste ser el mejor padre, trabajador y responsable toda tu vida, siempre de la manera correcta, espero algún día ser la mitad del ser humano que eres tu.

A mi hermano mayor Aarón Arturo González Parra, quien desde el día que nació ha estado a mi lado, y que a pesar de las grandes diferencias que hemos tenido a lo largo de toda nuestra vida, por no decir que me hiciste la vida imposible, no importa, yo te quiero mucho, te admiro porque eres un luchador, que tuviste tus dificultades, pero sacaste tu educación y tu profesión adelante, me ayudaste a formar el carácter, espero tenerte muchos años mas a mi lado, eres una gran persona, me da gusto que ya estés haciendo tu propia vida y más que voy a ser tío, eso me hace muy feliz, siempre cuentas conmigo .

A mis hermanos Omar Edgardo González Parra y Oscar Eduardo González Parra, espero ser un ejemplo para ustedes, y ojala tomen las cosas buenas y no las malas, porque aunque sé que tengo muchas cosas malas, me gusta pensar que les e enseñado también cosas buenas, yo siempre los apoyare y cuidare, no importa que, si son las 4 de la mañana, las 11 de la noche, no importa, recuerden la familia es lo mas importante y lo primero siempre, busquen siempre su felicidad, nunca vayan tras cosas materiales, lo importante en esta vida es ser feliz, es lo que realmente cuenta, siempre ayuden al prójimo y no importa que es lo que hagan en esta vida, siempre den todo de si, lo mas importante es demostrarse a uno mismo de lo que somos capaces, la opinión negativa de los demás no importa mucho y si llegan a fallar en la vida, tienen que levantarse y seguir luchando, siempre prepararse, el éxito en la vida no llega por suerte, llega a base de mucho trabajo y esfuerzo, así que lo único que les pido, es que hagan eso para ustedes.

Oscar a ti te admiro, eres la persona más noble y desinteresada que he conocido, te juro que me ayudaste mucho a crecer como persona, demasiado.

En esta vida para mí solo existen dos cosas que realmente valen la pena tener, salud y felicidad, Dios me da ambas, al tener tan grandes amigos, a mi novia que tanto amo y una gran familia, soy muy feliz, por eso quiero dedicarles este trabajo.

AGRADECIMIENTOS:

Agradecer primero a Dios por todo, por darme salud y felicidad a mí y a mi familia, gracias.

Gracias a toda mi familia quienes son la parte mas importante de mi vida, en todo momento me ha apoyado, que me han inculcado valores y me han enseñado a ser una buena persona, muchas gracias.

Gracias a mi novia Miranda, por hacerme infinitamente feliz todos los días desde que estamos juntos, y porque sé que seguiré siendo feliz todos los días de mi vida siempre que este a tu lado, tu amor es lo mejor que me ha pasado, te amo cada día más y no dejare de amarte, de eso estoy seguro, eres una gran persona, además de amarte te admiro por quien eres, no dejare nunca que nada te pase, gracias por tu amor y todo lo que me das.

Gracias a mis primos: Mario Alberto Beltrán Parra, quien siempre me saca una sonrisa, quien siempre me apoya en todo momento, a mi primo José María Báez Parra, siempre me has aconsejado, me ayudaste a crecer como persona y **mejoraste mi inglés**, a mi primo Héctor Parra Campos, que desde que tengo memoria fuiste mi primer amigo, quien siempre ha estado a mi lado, gracias a ustedes a quienes considero mis hermanos, cualquier cosa estoy para apoyarlos, gracias por todo.

Gracias a mi amigo Gregorio Montoya, mi hermano de otra madre, quien desde el jardín de niños ha estado a mi lado, cuidándome, siendo una gran persona, apoyándome a todo momento, gracias hermano a ti y a toda tu familia, que también son mi familia, gracias.

Gracias a mi amigo José Juan, gracias porque desde primer semestre de la carrera has estado a mi lado, gracias por ayudarme a crecer como persona, aprendí mucho de ti, eres un gran ser humano, te admiro mucho amigo, espero conservar la amistad por muchos años más, gracias Molina.

Gracias a mis dos mejores amigas, Adriana y Bárbara me han hecho sentir como uno más de su familia, espero estar siempre a su lado, gracias por todas las experiencias vividas tanto como las buenas y las malas, por su apoyo incondicional, prometo siempre estar a su lado y cuidarlas, las quiero mucho, como la hermana que nunca tuve, gracias.

Gracias a mi amigo Fernando Guerrero 'Chapo', por los momentos vividos, me enseñaste el trabajo de equipo y siempre dar la mano a quien la necesite, gracias por todo el apoyo y ayudarme todo este tiempo, gracias amigo.

Gracias a mi gran amigo Juan Jaime García Gámez, que en tan poco tiempo considere uno de mis mejores amigos, siempre con una gran sonrisa, actitud positiva, apoyo incondicional, siempre me has apoyado, fue un honor trabajar contigo, muchas gracias amigo, eres una gran persona nunca cambies.

Agradecer a mis compañeros y amigos: Jaime Osuna, Antonio Sánchez, Betty Peñuñurí, Héctor Franco, Ramón Leyva 'Flaco', Gustavo Zavala, Julio Ibarra, Paulina Salcido, Alejandra Gardner, Carlos Olguín, Joaquín Alberto, Carlos Gustavo, Daniel Soberanes, Alfredo Urías, Eduardo Beltrán, Álvaro Valenzuela, Charlie Contreras, Luigui Bugarini, Carlos Urquidez, Gonzalo Ruelas, Juan Modesto, a todos y a cada uno de ustedes, que a lo largo de estos 4 años han sido como una familia para mi, con ustedes aprendí muchas cosas y pase grandes momentos, aquí estamos siempre, cuenten con mi apoyo, fue un gusto conocerlos a todos, les deseo mucho éxito y ojala algún día la vida nos junte como compañeros de trabajo y siempre conservemos la amistad, gracias.

Gracias al Ing. José María García Puente, de gran ayuda en la realización de este proyecto, pero además de eso, me enseñó muchas cosas, me ayudo a crecer como profesional y me enseñó a siempre compartir mis conocimientos, al menos eso tomo, ya que siempre lo hizo conmigo, es una gran persona, muchas gracias le deseo mucho éxito y felicidad en su vida, honestamente y de todo corazón.

Gracias a los Maestros: Roberto Gamboa García, Lorenzo Pinzón y Arturo Cervantes, por la realización, revisión y corrección de esta tesis, especialmente primero al maestro Gamboa, porque desde el inicio de esta tesis, siempre fue muy amable y atento y segundo al maestro Pinzón, su materia fue una de las tres que por poco repruebo, sufrí mucho, pero aprendí más. Además a todos mis maestros de la carrera de ingeniería civil por haberme enseñado muchas cosas a lo largo de mi carrera de estudiante de ingeniería civil (Islas, Héctor Abel, Vivian, Arévalo, Ayala, Herrera, Dago, Germán), muchas gracias a todos.

Agradecimientos

Cuando un sueño se hace realidad, no siempre se le atribuye al empeño que pongamos en realizarlo. Detrás de cada sueño siempre hay personas que nos apoyan y que creen en nosotros. Son seres especiales que nos animan a seguir adelante en nuestros proyectos brindándonos, de diferentes maneras, su solidaridad, por lo que agradezco:

A dios Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por vida y salud, además de fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi madre y a mi padre por su cariño, amor y apoyo en todo momento durante toda mi vida y seguir aquí a mi lado, además a mis hermanos, Orlando y Alberto por su apoyo y cariño durante toda mi camino profesional.

A mi tia Leticia, a mi primo Luis, a mi primo Fernando por apoyarme y estar conmigo en todo momento.

A toda mi familia en general por su apoyo en general y su fe.

A mi amigo y compañero César González por ayudarme durante la carrera y formar parte de este logro, por ser paciente y dedicado, comprensible y amable, además por siempre estar pendiente como solo un gran amigo lo haría.

Al Ing. Jose Maria García Puente por ayudarme a crecer como ingeniero por todo su tiempo, amistad y apoyo, además por ser quien nos ayudó a realizar este proyecto.

Al Maestro Ingeniero Roberto Gamboa García por ser un gran maestro y apoyarnos durante la carrera y además por apoyarnos durante la realización de este proyecto.

A mis maestros en general por ayudarme durante la carrera.

A mis amigos más cercanos por estar para apoyarme, por estar en los buenos, en los malos y en todos los momentos: Luis Mario, Manlio Eduardo, Alberto, Elías Borbón, Cesar Leyva además de mis amigos que conocí durante la carrera: Modesto Zazueta, Hector franco, Gustavo Zavala, Fernando Guerrero, Ivan Gutiérrez, Antonio Sánchez, Antonio Estrada, Oryza Díaz, Adriana Carlos, Paulina Salcido, Daniel Soberanes, Servando Flores, Eduardo Beltrán, Juan Carlos Beltrán, Bárbara Muñoz.

Dedicatorios

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres y Hermanos por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mi madre Elda.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Alberto.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mi hermano Orlando.

Por ser un gran ejemplo para mí, por estudiar ingeniería civil y por siempre apoyarme y ayudarme.

A mi hermano Alberto.

Por ser otro gran ejemplo a seguir, por su apoyo y cariño, por estar siempre pendiente de todo.

A mi familia por estar en todo momento como familia reunidos ver que este logro no es solo de uno, sino de toda la familia ya que entre lo bueno de todos se crea algo mejor y un buen ejemplo.

“Si caminas sólo, llegarás más rápido; Sí caminas acompañado, llegarás más lejos”

RESUMEN

A raíz del desarrollo urbano producido en las ciudades y la alteración de la morfología en las cuencas, se ha generado un impacto en los efectos de periodos de lluvia sobre las cuencas urbanas dando así como resultado una nueva disciplina llamada hidrología urbana.

Se han construido drenajes pluviales, los cuales son conductos enterrados bajo las calles que conforman la ciudad, para así evitar inundaciones y permitir el desarrollo de las actividades socio-económicas, para lo cual se han encontrado elementos capaces de captar la escorrentía generada por estos episodios de lluvia e introducirlas en la red y retirándolas de las calles.

El presente documento busca aportar parte a la solución de los problemas de inundación generados por las lluvias en la calle Vicente Guerrero de Ciudad Obregón Sonora.

El principal objetivo de llevar a cabo esta investigación está enfocando en el primer paso de la captación pluvial (las rejillas de boca-tormenta), buscando el comparar dos diferentes tipos de rejilla, para ver cuál presenta mejor capacidad de captación y ver si esto ayuda a la solución del problema.

Proyectando una simulación hidráulica de la rejilla de boca-tormenta existente en sitio (Perfil I) y la de la proyectada o alterna (rejilla tipo Irving), se compara la eficiencia hidráulica de las dos rejillas, para ver cuál es más apta y conveniente para el alcantarillado pluvial, siendo el sitio de estudio la Calle Guerrero intersección con la calle California.

Uno de los métodos empleados es el de la comisión nacional del agua que simula las rejillas o sumideros como un orificio y calcula el gasto captado del área de abertura, además otro de los métodos es el de la Circular de Ingeniería Hidráulica (*HEC* No.22) en el cual el funcionamiento de la rejilla depende de las características geométricas de la rejilla y del tirante hidráulico, ya que puede funcionar como vertedor u orificio.

Mediante el software *EPA SWMM 5.0*, utilizado para simular hidrología urbana, se simuló un modelo característico de la zona de estudio tomando en cuenta la zona o cuenca de estudio, los tiempos de lluvia, las características de calle, además del funcionamiento de la rejilla.

Realizando una comparativa entre la rejilla de “tipo I” y la “rejilla Irving” se evaluó mediante la comparativa entre la eficiencia de cada una de ellas, tomando como referencia los resultados obtenidos mediante cada método aplicado y así determinar cuál rejilla es la óptima y el porqué de su funcionamiento.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivo	3
1.5 Delimitaciones.....	4
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Conceptos básicos.....	5
2.1.1 Descripción del ciclo hidrológico urbano.....	6
2.1.2 Aspectos hidrológicos de la urbanización	6
2.2 Aspectos de hidrología.....	7
2.2.1 Cuenca	7
2.2.1. Precipitación	8
2.2.2. Análisis de registros de la precipitación	10
2.2.3 Escurrimiento e hidrogramas	10
2.2.4 Modelos de lluvia en zonas urbanas.....	11
2.2.5 Curvas intensidad de la lluvia-duración-periodo de retorno (i-d-tr)	12
2.3 Tipos de sistema de Alcantarillado.....	14
2.3.1 Estructuras de Captación.....	14
2.3.2 Sumideros o Coladeras Pluviales	15
2.4. Periodo de retorno de diseño.....	18
2.4.1. Criterio del coeficiente de escurrimiento	20
2.5. Recomendaciones para el análisis del alcantarillado pluvial.....	21
2.6. Estimación de gastos pluviales (método racional)	22
2.7. Drenaje pluvial de caminos	24
2.7.1. Flujo en cunetas.....	24
2.7.2.- Tópicos asociados al flujo de agua en calles.....	26
2.8. Método CONAGUA	26

2.9. EPA SWMM	28
2.9.1. Modelo conceptual del sistema de drenaje.....	28
2.9.1.4. ENTORNO GRÁFICO DE EPA SWMM 5.0.....	36
2.9.2. CAPTACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL. MODELACIÓN MEDIANTE SWMM 5.0.....	39
2.10. Método U.S URBAN DRAINAGE DESIGN MANUAL	44
III. METODOLOGÍA	47
3.1. Zona de estudio	47
3.1.1. Gasto de la calle	47
3.2. Intensidad de lluvia	48
3.3. Método CONAGUA.....	49
3.3.1. Formula de Izzard.....	49
3.4. Método de la Circular de Ingeniería Hidráulica (HEC) No. 22.....	50
3.5. EPA SWMM	52
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1. Zona de estudio	59
4.1.1. Tipos de rejilla.....	62
4.1.2. Sección de la calle	63
4.2. Intensidad de lluvia	63
4.3. Gasto de la calle	65
4.4. Método CONAGUA.....	66
4.4.1. Formula de Izzard.....	66
4.5. Método de la Circular de Ingeniería Hidráulica (HEC) #22	69
4.6. EPA SWMM	72
IV. CONCLUSION.....	90
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	95
ANEXO I. Curva i-d-Tr para un periodo de retorno de 5 años (Oviáchic, 1995)	96
ANEXO II. Área de abertura óptima de rejilla.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Registro de intensidades máximas (mm/h) (CONAGUA 2007)	13
Tabla 2. Valores del Coeficiente de Ecurrimiento (CONAGUA, 2007)	21
Tabla 3. Periodos de retorno para diseño de estructuras.....	48
Tabla 4. Coeficientes de rugosidad de Manning	50
Tabla 5. Coeficientes "n" de Manning	53
Tabla 6. Valores de almacenamiento	53
Tabla 7. Rugosidad de conductos	55
Tabla 8. Valores del coeficiente k.....	58
Tabla 9. Configuración de la calle	60
Tabla 10. Áreas de rejilla para la calle	62
Tabla 11. Comparación de rejillas del gasto captado (método CONAGUA)	68
Tabla 12. Comparación de rejillas del gasto captado (método HEC No. 22)	71
Tabla 13. Características de la cuenca	73
Tabla 14. Características de la lluvia.....	74
Tabla 15. Características de la calle (1)	74
Tabla 16. Características de la calle (2)	75
Tabla 17. Características geométricas de la rejilla de perfil I	79
Tabla 18. Características geométricas de la rejilla Irving	79
Tabla 19. Tabla de caracterización hidráulica de rejilla (perfil I).....	82
Tabla 20. Tabla de caracterización hidráulica de rejilla (tipo Irving)	83
Tabla 21. Características del vertedor.....	85
Tabla 22. Coeficiente de descarga	85
Tabla 23. Resultados de la simulación.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.-Calle Guerrero frente al IMSS	2
Figura 2.- Vista calle Guerrero	2
Figura 3. Representación esquemática de una cuenca (CONAGUA, 2007)	8
Figura 4. Registro de pluviógrafo	9
Figura 5. Puntos característicos de un hidrograma (CONAGUA, 2007).....	11
Figura 6. Tipos de sumideros o coladeras pluviales (ASCE, 1992).....	15
Figura 7. Representación gráfica del método racional (CONAGUA, 2007).....	23
Figura 8. Sección transversal de una cuneta típica en una calle.....	25
Figura 9. Otras secciones transversales de cunetas.....	25
Figura 10. Modelo conceptual del sistema de drenaje	29
Figura 11. Esquema representativo de los objetos visuales	31
Figura 12. Tipos de conductos	35
Figura 13. Interfaz gráfica de SWMM 5.0.....	36
Figura 14. Barra de herramientas.....	37
Figura 15. Tabla de eficiencia hidráulica de un imbornal	42
Figura 16. Relación caudal de paso/ caudal captado.....	43
Figura 17. Representación para determinar el tirante en coladeras con depresión ..	46
Figura 18. Cuenca.....	61
Figura 19. Rejilla de perfil I (rejilla <i>in situ</i>).....	62
Figura 20. Rejilla tipo Irving (rejilla propuesta)	62
Figura 21. Sección transversal calle V. Guerrero.....	63
Figura 22. Sección transversal de la calle V. Guerrero de la rejilla	63
Figura 23. Perfil transversal de la calle	76
Figura 24. Sección longitudinal de la calle	77
Figura 25. Perfil longitudinal de la calle, mostrando el gasto máximo	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Grafica 1. Gasto vs tirante (método CONAGUA)	69
Grafica 2. Gasto vs tirante (método HEC No. 22)	72
Grafica 3. Curvas gasto vs tirante	88
Grafica 4. Curva tirante vs tiempo	89
Grafica 5. Gasto vs tirante.....	91
Grafica 6. Eficiencia de ambas rejillas.....	92

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La calle Vicente Guerrero en Ciudad Obregón, Sonora, ha sufrido de inundaciones durante años al momento de presentar lluvias moderadas a fuertes. Esto sucede debido a que la calle Guerrero funciona como corriente principal de 6 sub-cuencas ubicadas a su alrededor.

La región ha tenido promedios que oscilan entre los 80 y 100 mm de lluvia máxima diaria. Aun así, el día con mayor precipitación registrada en la zona de Ciudad Obregón ha sido de 189 mm el día 10 de Septiembre de 1961. En tiempos más recientes la última lluvia que puso en problemas a la población fue la del 15 de octubre del año 2009. Dicha lluvia presentó un máximo acumulado de 110 mm en 24 horas.

El H. Ayuntamiento de Cajeme en el año 2004 construyó un sistema de drenaje pluvial para la evacuación de estas aguas. Aunque el desalojo del agua de lluvia ha mejorado sustancialmente en estas condiciones, aún bajo lluvias de gran intensidad se producen encharcamientos.

En la **Figura 1** y **Figura 2** se muestra la gravedad del problema que sufre esta calle.



Figura 1.-Calle Guerrero frente al IMSS



Figura 2.- Vista calle Guerrero

1.2 Planteamiento del problema

La calle Vicente Guerrero, en su intersección con la calle California, sufre de inundaciones cuando se presentan lluvias tormentosas de mediana a alta densidad, lo cual ocasiona daños a los locales comerciales aledaños a la calle y priva a la comunidad de acceso a algunos servicios, y no sólo esto, sino que también daña las instalaciones de los diferentes establecimientos que están por la calle. Buscando la solución en las rejillas que conforman una parte de las estructuras de captación (boca-tormenta), donde se hará un estudio de distintos modelos y simulaciones para determinar el modelo óptimo de rejilla con una mayor captación.

1.3 Justificación

En el presente proyecto se busca ayudar a solucionar las inundaciones de la calle Vicente Guerrero mediante el análisis de la capacidad de captación que tienen las rejillas de las estructuras de captación (boca-tormenta), con el propósito de hacer un cambio a rejillas que tengan una mayor área efectiva que genere una mayor captación de las aguas, esto beneficiaría tanto a los peatones, los vehículos que transitan, los servicios disponibles y los locales comerciales, disminuyendo o atenuando el problema que suelen generar las inundaciones.

1.4 Objetivo

El objetivo es analizar la rejilla que conforma una parte de las estructuras de captación (boca-tormenta) por diferentes métodos de estudio y utilizando *software* que permita hacer simulaciones para así determinar el modelo más apto de rejilla, mejorando la captación de escurrimientos que entran al sistema de alcantarillado pluvial y disminuyendo el problema de las inundaciones.

1.5 Delimitaciones

- Este análisis se limita a la calle V. Guerrero intersección con California.
- Se respetaran las dimensiones de las rejillas ya establecidas en el sitio, como lo son el ancho y el largo de éstas.
- Se debe cumplir con los requerimientos establecidos en el manual de CNA del 2007.
- Se emplea especificaciones del manual d diseño de drenaje urbano de la Circular de Ingeniería Hidráulica (*HEC*) No. 22.
- Se empleará el uso de software para la simulación hidráulica como lo es:
- EPA SWMM (U.S. Environmental Protection Agency “*EPA*”)

II. MARCO TEÓRICO

Para la mejor comprensión de la problemática de las inundaciones debido a la poca capacidad de captación de las bocas de tormenta, se explican algunos conceptos básicos para la mejor comprensión de este trabajo, que permitan entender el porqué de esta investigación, para empezar se definen los conceptos principales que engloban este trabajo.

2.1 Conceptos básicos

El escurrimiento que originan las tormentas en las áreas urbanas, tiene impacto en la población porque debido a su movimiento y almacenamiento temporal, daña las propiedades públicas y privadas, además de alterar o suspender las actividades económicas comunes, el escurrimiento genera la acumulación de agua y al no tener la boca-tormenta la suficiente capacidad de captación, se presentan las inundaciones.

Las obras ingenieriles que se usan para coleccionar, transportar y eliminar las aguas de tormenta en ciudades, son bastante costosas y frecuentemente su construcción origina la suspensión de todos los servicios en zonas grandes de la ciudad. Los sistemas de drenaje urbano pueden considerarse constituidos por dos componentes, diferentes conceptualmente. El drenaje primario o inicial está diseñado para evitar la interrupción de las actividades normales y económicas de la población durante las tormentas frecuentes. Está constituido por drenaje de las calles hacia sus costados junto a las banquetas, hasta llegar a una alcantarilla que conduce tal escurrimiento al colector o alcantarillado que está enterrado en el centro de esa calle o de las más cercanas.

El otro componente incluye al sistema que transporta el escurrimiento que originan las tormentas severas y por ello ha sido denominado drenaje mayor. De manera general, el agua de tormentas que se acumula y transporta en el alcantarillado, se descarga en una salida que la conduce al sistema mayor. Esta salida en muchos sistemas son cauces naturales que han sido destinados y/o modificados para tal función.

2.1.1 Descripción del ciclo hidrológico urbano

Uno de los conceptos fundamentales de la hidrología y del manejo de recursos hidráulicos, es el ciclo hidrológico, también denominado ciclo del agua. Existen diversas definiciones para el ciclo hidrológico, pero generalmente es entendido como un modelo conceptual que describe el almacenamiento y circulación del agua entre la biósfera, atmósfera, litósfera e hidrósfera. El agua puede ser almacenada en los océanos, lagos, atmósfera, ríos, suelos, glaciares, nevados y acuíferos. La circulación entre estos depósitos o almacenamientos es causada por procesos como: evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración, percolación y escurrimiento, los cuales son denominados componentes del ciclo hidrológico.

Los efectos combinados de la urbanización, la industrialización y el crecimiento poblacional alteran el paisaje natural y la respuesta hidrológica de las cuencas. Aunque muchos elementos del medio ambiente son afectados por las actividades humanas, la estructura principal y las interrelaciones de los componentes principales del ciclo hidrológico permanecen sin alteración; sin embargo éste es modificado de manera notable por el abastecimiento de agua potable, el drenaje y la recolección y manejo de las aguas residuales, de manera que el ciclo hidrológico urbano, es mucho más complejo debido a diversas influencias e intervenciones que en él ocurren. En el ciclo hidrológico urbano existen dos fuentes principales de agua: el abastecimiento de agua potable municipal y la precipitación (CONAGUA, 2007).

2.1.2 Aspectos hidrológicos de la urbanización

Durante una tormenta, la precipitación cae sobre el terreno en cantidades que varían notablemente en magnitud e intensidad. La parte de la precipitación que no es interceptada por la vegetación, al llegar al suelo se infiltra o comienza a escurrir. La

lluvia que se infiltra es una pérdida de escurrimiento, aunque después puede aparecer como descarga o drenaje de los suelos. El flujo sobre el terreno llega a los riachuelos y estos posteriormente forman los cauces secundarios los cuales finalmente definen el colector principal de la cuenca.

Ya sea sobre el terreno o bien en los cauces, el agua para fluir debe tener un tirante o lámina y entonces por consecuencia, una parte del escurrimiento es almacenado temporalmente en la cuenca. Este almacenamiento natural tiene un efecto de atenuación del escurrimiento, es decir que reduce la magnitud del flujo de respuesta de la cuenca. Entre más vegetación tiene la cuenca, más atenuación ocurre en el flujo sobre terreno y en los cauces.

¿Qué sucede cuando una cuenca es urbanizada? Una gran parte de su superficie que tenía vegetación o suelo natural se vuelve impermeable, debido a la construcción de casas (techos y patios), calles, banquetas y estacionamientos. Los efectos de esta impermeabilización son varios, por ejemplo, la lluvia ya no se infiltra y por lo tanto el volumen de escurrimiento se incrementa.

2.2 Aspectos de hidrología

Se llama Hidrología a la rama de la Hidráulica encargada del estudio de los procesos de circulación, ocurrencia y distribución del agua sobre la superficie terrestre, así como su interacción con el medio ambiente, los principales conceptos de hidrología usados en este documento son los siguientes.

2.2.1 Cuenca

Una cuenca es la unidad básica en un estudio Hidrológico y se define como aquella área de terreno donde el agua de lluvia que cae sobre su superficie y que no se infiltra, es conducida hasta un punto de salida (cuenca abierta) o de almacenamiento (cuenca cerrada). Es importante remarcar que el tamaño de una cuenca depende de la ubicación del punto de salida.

Dentro de la cuenca se considera la existencia de una corriente principal y de tributarios, que son afluentes de la primera. Por otra parte, el parte-aguas es el límite de la cuenca, de modo que los puntos de mayor elevación topográfica señalan la zona hacia donde escurren las gotas (**Figura 3**).

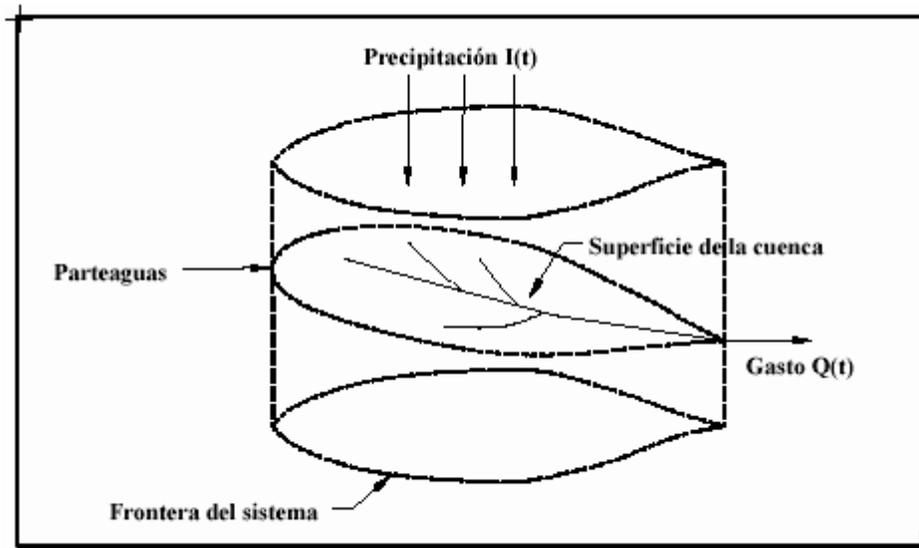


Figura 3. Representación esquemática de una cuenca (CONAGUA, 2007)

Finalmente, se le llama sistema hidrológico al conjunto formado por la cuenca, las características locales del terreno (topografía, tipo de suelo, vegetación, etc.), las corrientes (subterráneas y superficiales) y todos aquellos factores que tienen influencia sobre la cantidad de agua existente en la cuenca (la precipitación, el clima, etc.). De lo anterior se desprende que no existen dos cuencas iguales, aunque para efectos de cuantificación del escurrimiento dos cuencas cercanas pudieran ser consideradas similares hidrológicamente. Por otra parte, se le denomina Drenaje a la forma de desalojo del agua en una cuenca (CONAGUA, 2007)

2.2.1. Precipitación

Se llama precipitación a aquellos procesos mediante los cuales el agua cae de la atmósfera a la superficie de la tierra, en forma de lluvia (precipitación pluvial), nieve o granizo. En nuestro país, la primera es la que genera los mayores escurrimientos superficiales.

La magnitud de los escurrimientos superficiales está ligada proporcionalmente a la magnitud de la precipitación pluvial. Por este motivo, los estudios de drenaje parten

del estudio de la precipitación para estimar los gastos de diseño que permiten dimensionar las obras de drenaje.

La medición de la precipitación se ha llevado a cabo, principalmente, con aparatos climatológicos conocidos como pluviómetros y pluviógrafos. Ambos se basan en la medición de una lámina de lluvia en milímetros (mm), la cual se interpreta como la altura del nivel del agua que se acumularía sobre el terreno sin infiltrarse o evaporarse sobre un área unitaria. La diferencia entre los dispositivos de medición consiste en que el primero mide la precipitación acumulada entre un cierto intervalo de tiempo de lectura (usualmente de 24 h), y el segundo registra en una gráfica (pluviograma) la altura de lluvia acumulada de acuerdo al tiempo (**Figura 4**), esto último resulta más útil para el ingeniero encargado de diseñar las obras de drenaje.

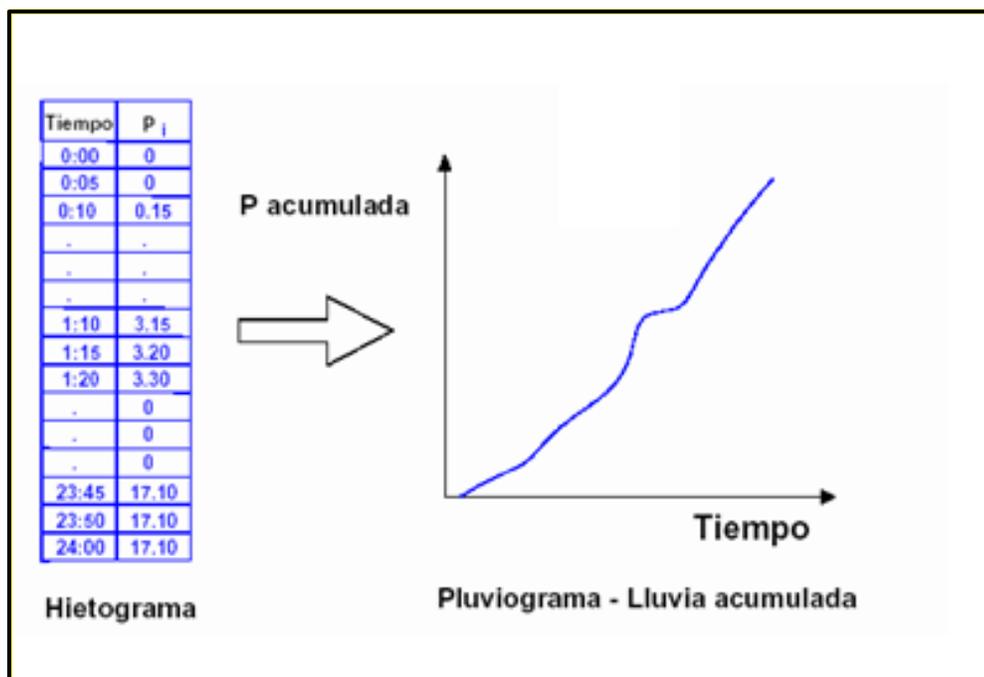


Figura 4. Registro de pluviógrafo

La ventaja de usar los registros de los pluviógrafos con respecto a los de los pluviómetros radica en que se pueden calcular intensidades máximas de lluvia para duraciones predeterminadas, que posteriormente pueden ser transformadas a gastos de diseño para estructuras de drenaje.

2.2.2. Análisis de registros de la precipitación

El tamaño de la cuenca en estudio indica de cuántas estaciones climatológicas deben obtenerse registros de precipitación. Se recomienda emplear todas las estaciones que se ubiquen dentro de la zona de estudio y aquellas que se encuentren cerca del parte-aguas. A continuación se presentan varios métodos para determinar las características principales de una tormenta sobre una zona de interés.

2.2.3 Escurrimiento e hidrogramas

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que fluye sobre la superficie del terreno natural, y que conforme pasa el tiempo, se integra a las corrientes para ser conducida hacia ríos, lagos y en la mayoría de las ocasiones hasta el mar.

Un hidrograma (**figura 5**), es la variación del gasto (en cierta sección transversal de un cauce) en función del tiempo. Al medir el volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de un cauce por unidad de tiempo, podrían obtenerse una serie de valores máximos (“picos”), que son ocasionados por una tormenta en particular. Cabe destacar que el área comprendida bajo la curva del hidrograma es el volumen de escurrimiento. La forma del hidrograma mencionado varía dependiendo de una serie de características, tanto de la cuenca donde llueve, como de la propia lluvia. Entre dichas características conviene citar para la cuenca: forma, tamaño, topografía, tipo de suelo y permeabilidad, vegetación existente, etc. En el caso de la lluvia, la magnitud y distribución de la misma tanto sobre el área de la cuenca como a través del tiempo.

Los sistemas de alcantarillado utilizan diversos métodos, con los cuales es posible proponer un hidrograma de diseño, aunque en ocasiones sólo interesa determinar el gasto máximo para el diseño de una estructura, esto para controlar y conducir los escurrimientos superficiales que genera el agua de la lluvia.

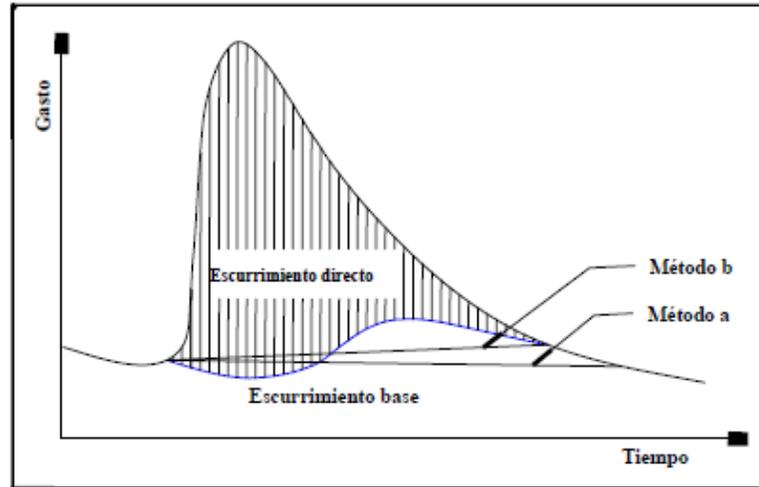


Figura 5. Puntos característicos de un hidrograma (CONAGUA, 2007)

Los hidrogramas utilizados usualmente para el diseño de redes de alcantarillado poseen tiempos base desde 10 minutos hasta algunas horas, dependiendo del tamaño de la cuenca y de la duración de la lluvia. La duración considerada para una lluvia de diseño es usualmente corta ya que las lluvias de corta duración y alta intensidad generan hidrogramas con tiempos base cortos y picos grandes, más adecuados para el diseño de redes de alcantarillado.

Los hidrogramas que se utilizan en el diseño de redes de alcantarillado pluvial, se obtienen a partir de relaciones lluvia - escurrimiento, las cuales se han deducido al analizar registros simultáneos de precipitación y escurrimiento (CONAGUA, 2007).

2.2.4 Modelos de lluvia en zonas urbanas

Para estimar el gasto producido por una lluvia sobre una cuenca, existen diferentes métodos, los cuales se clasifican en:

a) Métodos directos o empíricos.- Consideran que el escurrimiento provocado por una tormenta es función, principalmente, de las características físicas de la cuenca; ejemplo de estos métodos, son: el racional y gráfico alemán.

b) Métodos hidrológicos.- Consideran que existe una relación funcional, generalmente lineal, entre la distribución de la lluvia en el tiempo y el hidrograma a la

salida de la cuenca. Dicha relación funcional se basa en principios hidrológicos y puede calibrarse con registros simultáneos de lluvias y escurrimientos en la cuenca que se estudia, sin considerar explícitamente sus características físicas. Ejemplo de estos métodos es el *Road Research Laboratory* y el del hidrograma unitario.

c) Métodos hidráulicos.- Estiman el hidrograma en las diferentes partes de la cuenca en estudio mediante las ecuaciones de conservación de la masa y la cantidad de movimiento con diversos grados de simplificación, considerando explícitamente las características físicas de la cuenca. Ejemplo de este método es el de Chicago.

2.2.5 Curvas intensidad de la lluvia-duración-periodo de retorno (i-d-tr)

Los valores de lluvia que se miden en una estación son de tipo puntual y permiten conocer la variación de la misma con respecto al tiempo. Al realizar el análisis de la información también se puede determinar el período de retorno que tiene cada una de las lluvias registradas. El proceso de cálculo de las curvas *i-d-Tr* es el siguiente:

- a) Se define una duración.
- b) De cada tormenta registrada se obtiene la máxima intensidad de la lluvia para la duración definida en el inciso a).
- c) Se obtiene, para cada año de registro, el máximo de los valores obtenidos en el punto b).
- d) Se regresa al primer punto tantas veces como duraciones se definieron.
- e) Con los valores obtenidos en los primeros cuatro pasos se forma una tabla, tal como la que se muestra en la **Tabla 1**.

Estación: _____

FECHA	M I N U T O S									
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120

Tabla 1. Registro de intensidades máximas (mm/h) (CONAGUA 2007)

Finalmente se ha encontrado que la fórmula que relaciona simultáneamente las tres variables, es de la forma

$$i = \frac{k T r^m}{(d + c)^n}$$

Donde

- i* intensidad de precipitación (mm/h).
- T* período de retorno (años).
- d* duración (minutos).
- k, m, n, c* parámetros que se calculan a partir de los datos, mediante un análisis de correlación lineal múltiple.

La desventaja al utilizar estas curvas es que para áreas grandes, mayores de 10 kilómetros cuadrados (km²), el valor de la intensidad de lluvia permanece constante, se pueden originar errores de consideración en la determinación del caudal debido a que no se toma en cuenta la variación de la lluvia dentro del área.

Como dato adicional, cabe destacar que existen mapas de cada estado de la república donde, con base en análisis semejantes al anterior, se han dibujado las isoyetas correspondientes a diferentes duraciones y períodos de retorno (*SCT, 1990*).

2.3 Tipos de sistema de Alcantarillado

Los sistemas de alcantarillado modernos son clasificados como sanitarios cuando conducen sólo aguas residuales, pluviales cuando transportan únicamente aguas producto del escurrimiento superficial del agua de lluvia y combinados cuando llevan los dos tipos de aguas.

2.3.1 Estructuras de Captación

Consisten en bocas de tormenta, que son las estructuras que recolectan el agua que escurre sobre la superficie del terreno y la conducen al sistema de atarjeas. Se ubican a cierta distancia en las calles con el fin de interceptar el flujo superficial, especialmente aguas arriba del cruce de calles y avenidas de importancia; también se les coloca en los puntos bajos del terreno, donde pudiera acumularse el agua.

Están constituidas por una caja que funciona como desarenador donde se depositan las materias pesadas que arrastra el agua y por una coladera con su estructura de soporte que permite la entrada del agua de la superficie del terreno al sistema de la red de atarjeas mediante una tubería de PEAD a la que se le denomina albañal pluvial. La coladera evita el paso de basura, ramas y otros objetos que pudieran taponar los conductos de la red. Existen varios tipos de bocas de tormenta, a los cuales se acostumbra llamarles coladeras pluviales: las de piso, de banqueta, combinadas, longitudinales y transversales.

La selección de alguna de ellas o de alguna de sus combinaciones depende exclusivamente de la pendiente longitudinal de las calles y del caudal por recolectar. En ocasiones, se les combina con una depresión del espesor del pavimento para hacerlas más eficientes.

2.3.2 Sumideros o Coladeras Pluviales

Las coladeras pluviales tienen como objetivo captar los escurrimientos superficiales debidos a la lluvia y conducirlos a la red de alcantarillado. El flujo de agua es proporcional al área de servicio y al tipo de superficie de dicha área según su permeabilidad. La forma de cuantificar dicho flujo es mediante relaciones lluvia – escurrimiento. Se pueden observar algunos tipos de coladeras pluviales en la **Figura 6**.

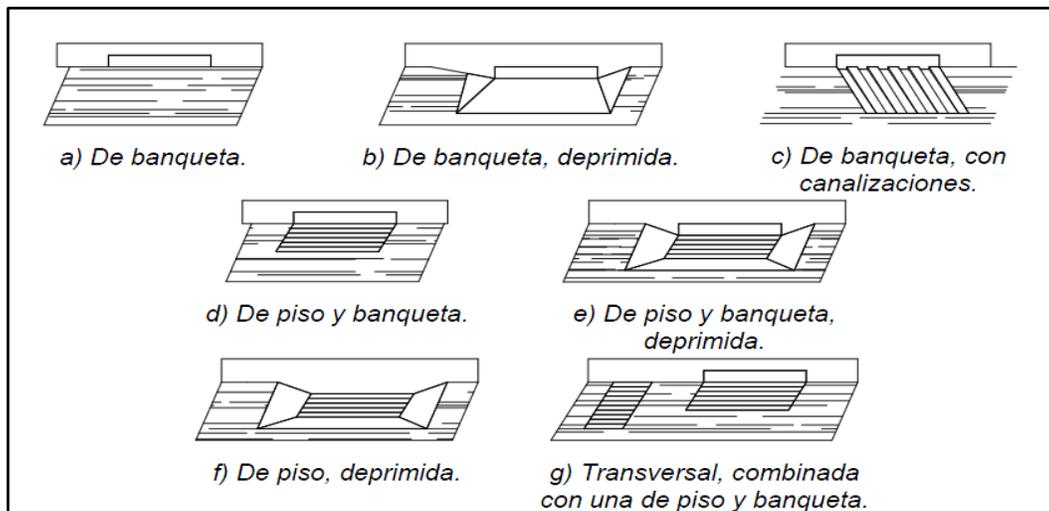


Figura 6. Tipos de sumideros o coladeras pluviales (ASCE, 1992)

2.3.2.1. Tipos de Sumideros o Coladeras Pluviales

Existen varios tipos de bocas de tormenta o coladeras pluviales. De acuerdo a su diseño y ubicación en las calles, se clasifican en coladeras de: piso, banqueteta, piso y banqueteta, longitudinales de banqueteta y transversales de piso. Los sumideros pueden ser de varios tipos y su selección está determinada por las características topográficas, el grado de eficiencia del sumidero, la importancia de la vía y la posibilidad de acumulación y arrastre de sedimentos en el sector. Dependiendo del tipo de la estructura, localización y del funcionamiento, los sumideros colectores reciben varias clasificaciones agrupadas, como sigue:

a) Sumideros de acuerdo a la estructura de la abertura o entrada

- simples laterales o de ventana
- enrejados en cunetas
- combinados o mixtos

- enrejados en calzada
- especiales

b) Sumideros de acuerdo a la localización a lo largo de las cunetas

- intermedios
- de cruces o boca calles
- de puntos bajos

c) Sumideros de acuerdo al funcionamiento

- libres
- ahogados o saturados

2.3.2.2. Ubicación de Sumideros o Coladeras Pluviales

La instalación de un tipo de coladera o de una combinación de ellas, depende de la pendiente longitudinal de las calles y del caudal por coleccionar. Las coladeras de banqueta se instalan cuando la pendiente de la acera es menor del 2%; cuando se tienen pendientes entre 2 y 5% se instalan coladeras de piso y banqueta, y para pendientes mayores del 5% se instalan únicamente coladeras de piso. Las coladeras de tipo longitudinal de banqueta y transversales se instalan cuando las pendientes son mayores del 5% y los caudales por captar son grandes.

Si las pendientes de las calles son mayores del 3%, entonces es necesario que en las coladeras de piso y de banqueta o de piso solamente, se haga una depresión en la cuneta para obligar al agua a entrar en la coladera. Como estas depresiones son molestas al tránsito se debe procurar hacerlas lo más ligeras posible.

2.3.2.3. Especificaciones constructivas para coladeras pluviales

De acuerdo a la capacidad y tipo de alcantarilla se pueden definir las siguientes características constructivas para cada una de ellas:

a) Coladeras de banqueta. Son las de menor capacidad, por lo que el albañal de conexión con las atarjeas es de 15 cm de diámetro.

b) Coladeras de piso. Poseen mayor capacidad que las de banqueteta, sin embargo, el albañal de conexión con las atarjeas también es de 15 cm de diámetro.

c) Coladeras de piso y banqueteta. Es una combinación de las dos anteriores, por lo que posee mayor capacidad. El diámetro del albañal de conexión en este caso es de 20 cm.

d) Coladeras longitudinales de banqueteta. Se construyen de manera similar a las coladeras de banqueteta, pero su tanque decantador es mayor. Posee el ancho necesario como para albergar tres o más tramos de albañal de conexión con las atarjeas. Cuando son tres o cuatro, el diámetro de cada albañal es de 38 cm y, cuando se tienen cinco o seis tramos, el diámetro de cada albañal es de 45 cm.

e) Coladeras transversales de piso. Este tipo de coladeras se construyen como canales con rejillas o en ocasiones con varios marcos y rejillas de hierro fundido como los que se emplean en las coladeras de piso. En calles cuyo ancho es menor a 6 m, el diámetro del albañal de conexión con las atarjeas es de 61 cm de diámetro, y cuando es mayor a 6 m, se instalan albañales de 76 cm de diámetro.

También, según los materiales que se empleen en las coladeras, pueden ser de los siguientes tipos:

Tipo A Coladera de piso y banqueteta, con brocal de hierro fundido en banqueteta y rejillas de hierro fundido en banqueteta y piso.

Tipo B Coladera de piso y banqueteta, con brocal de concreto y rejillas frontal y de piso hechas de hierro fundido.

Tipo C Coladera de piso con rejilla de hierro fundido. Esta coladera es igual a las de los tipos A y B, suprimiéndoles por completo la coladera de banqueteta.

Tipo D Coladera de banqueteta, con brocal de hierro fundido o concreto y rejilla frontal de hierro fundido.

2.4. Periodo de retorno de diseño.

En el diseño de diversas obras de ingeniería, como es, por ejemplo, un sistema de alcantarillado pluvial, se manejan una serie de términos como: periodo de retorno, periodo de diseño, vida útil y periodo económico de diseño. Todos ellos son parámetros de diseño que deben tenerse en cuenta al construir una obra.

El periodo de retorno de un evento hidrológico de magnitud dada, se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual ese evento puede ser igualado o excedido una vez en promedio; se le llama periodo de retorno de diseño cuando corresponde al periodo de retorno del evento de diseño con el cual se dimensionan las diversas estructuras de una obra.

En Hidrología es común tratar con los conceptos de período de retorno y probabilidad de riesgo. El período de retorno o intervalo de recurrencia (en años) se calcula como:

$$Tr = \frac{1}{P(x)}$$

Donde $P(x)$ representa la probabilidad de ocurrencia de un evento mayor o igual a x . El período de retorno no es un intervalo fijo de ocurrencia de un evento, sino el promedio de los intervalos de recurrencia. Normalmente se prefiere trabajar con periodos de retorno en lugar de probabilidades, pues es un concepto que resulta fácil de manejar ya que tiene las mismas unidades (tiempo) que la vida útil de la obra. No debe confundirse el término anterior con el periodo de diseño, que es el intervalo de tiempo en el cual se espera que una obra alcance su nivel de saturación o insuficiencia; este periodo debe ser menor a la vida útil de la misma. Se utiliza para diseñar una obra de ingeniería con una estimación de la capacidad requerida al finalizar el periodo de diseño. Lo anterior se hace para evitar ampliaciones o

adecuaciones durante un intervalo de tiempo igual al periodo de diseño de la obra. La vida útil de una obra es el tiempo en que la obra sirve adecuadamente a los propósitos de diseño, sin tener gastos elevados de operación y mantenimiento que hagan antieconómico su uso o requiera ser eliminada por insuficiente. La vida útil de cada obra varía de acuerdo a diversos factores entre los que predominan: la importancia de la obra, la duración, resistencia y calidad de los materiales empleados en su construcción; el mantenimiento y operación adecuados; las condiciones locales y desde luego, la demanda de servicio ejercida al sistema.

Por último, el periodo económico de diseño es el periodo de retorno de un evento de diseño para el cual se tiene la mejor relación costo - beneficio. Cabe destacar que el periodo de retorno de diseño de una obra no siempre es el más económico, sino en ocasiones, el que está relacionado con el costo accesible para los usuarios.

La elección del periodo de retorno de diseño, en un sistema de alcantarillado pluvial, influye en el nivel de protección contra inundaciones y por consiguiente en la capacidad del sistema y el riesgo o probabilidad de falla de la obra. Cabe destacar que no es posible diseñar una obra de protección contra inundaciones cien por ciento segura, debido a que resultaría extremadamente costosa y por otra parte resultaría complejo definir la capacidad de la misma. De análisis económicos, se ha observado que el costo de una obra se incrementa en proporción al nivel de protección deseado hasta cierto punto, el periodo económico de diseño, después del cual, el costo de la obra crece demasiado sin tener mejoras sustanciales en el nivel de protección. Se acostumbra expresar el nivel de protección en función del periodo de retorno del evento de diseño de las obras o simplemente el periodo de retorno de diseño. El periodo económico de diseño resulta difícil de determinar debido a que depende de factores difíciles de cuantificar como son: el costo de la obra; los daños, perjuicios e inconvenientes que puedan tenerse al presentarse una falla, el costo de mantenimiento y, particularmente, el riesgo de pérdida de vidas humanas (CONAGUA, 2007)

2.4.1. Criterio del coeficiente de escurrimiento

En éste se supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de la precipitación, de tal manera que el volumen escurrido V_{ed} es igual al producto del volumen llovido V_{ll} por un coeficiente C_e llamado “coeficiente de escurrimiento”.

Por lo tanto, el coeficiente de escurrimiento se determina con:

$$C_e = \frac{V_{ed}}{V_{ll}}$$

Donde:

V_{ed} volumen de escurrimiento directo (m^3).

V_{ll} volumen llovido (m^3), igual al producto del área de la cuenca por la altura de lluvia.

C_e coeficiente de escurrimiento (adimensional).

El coeficiente de escurrimiento se puede conocer haciendo mediciones en la cuenca o relacionando los valores que aparecen en la **Tabla 2**.

TIPO DE AREA DRENADA	COEFICIENTE. DE ESCURRIMIENTO	
	MÍNIMO	MÁXIMO
Zonas Comerciales:		
Zona Comercial	0.75	0.95
Zonas mercantiles	0.70	0.90
Vecindarios	0.50	0.70
Zonas Residenciales:		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares, espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares, compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
Zonas Industriales:		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios y Parques		
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril y terrenos sin construir	0.20	0.40
Zonas Suburbanas	0.10	0.30
Calles:		
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.80	0.95
Adoquinadas o empedradas, junteadas con cemento	0.70	0.85
Adoquín sin juntear	0.50	0.70
Terracerías	0.25	0.60
Estacionamientos		
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas:		
Suelos arenosos planos (pendientes ≤ 0.02)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 ó más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 ó menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 ó más)	0.25	0.35

Tabla 2. Valores del Coeficiente de Ecurrimiento (CONAGUA, 2007)

2.5. Recomendaciones para el análisis del alcantarillado pluvial

La simulación de las partes principales de un sistema de drenaje pluvial, debe realizarse con métodos con los que se considere que proporcionen los mejores resultados, simulando de la manera más apegada, el carácter dinámico de la evolución de la onda de la avenida en el sistema de drenaje.

La selección del método adecuado para el análisis del sistema de atarjeas es un problema más complejo, cuya solución depende de las características específicas del sistema que se esté estudiando.

Para dar selección del método adecuado para el análisis del sistema de atarjeas se puede iniciar con un diseño a nivel de esquemas de proyectos o anteproyectos, en los que sólo se requiere tener una primera idea de la magnitud de los gastos máximos que se manejarán. Además utilizar la fórmula racional, dado que su sencillez permite obtener resultados aproximados, considerando solamente las características principales de la cuenca en estudio, como el tipo de suelo, longitud y pendiente del colector y comportamiento de la lluvia.

2.6. Estimación de gastos pluviales (método racional)

Es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia-escorrentamiento, representada en la **figura 7**, su origen se remonta a 1851 o 1889; debido a su sencillez es uno de los más utilizados. Está basado en considerar que, sobre el área estudiada se tiene una lluvia uniforme durante un cierto tiempo, de manera que el escurrimiento en la cuenca se establezca y se tenga un gasto constante en la descarga. Este método permite determinar el gasto máximo provocado por una tormenta, suponiendo que esto se alcanza cuando la intensidad de lluvia es aproximadamente constante durante una cierta duración, que se considera es igual al tiempo de concentración de la cuenca. La fórmula racional se plantea como:

$$Q_p = 0.278CiA$$

Donde:

- Q_p gasto de pico (m^3/s).
- C coeficiente de escurrimiento.
- i intensidad media de la lluvia (mm/h).
- A área de la cuenca (km^2).
- 0.278 factor de conversión de unidades.

El tiempo de concentración para un punto dado, se define como el tiempo que tarda una gota de agua en viajar desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de ésta. Se calcula mediante:

$$T_c = T_{cs} + T_t$$

Donde:

T_c tiempo de concentración.

T_{cs} tiempo de concentración sobre la superficie.

T_t tiempo de traslado a través de los colectores.

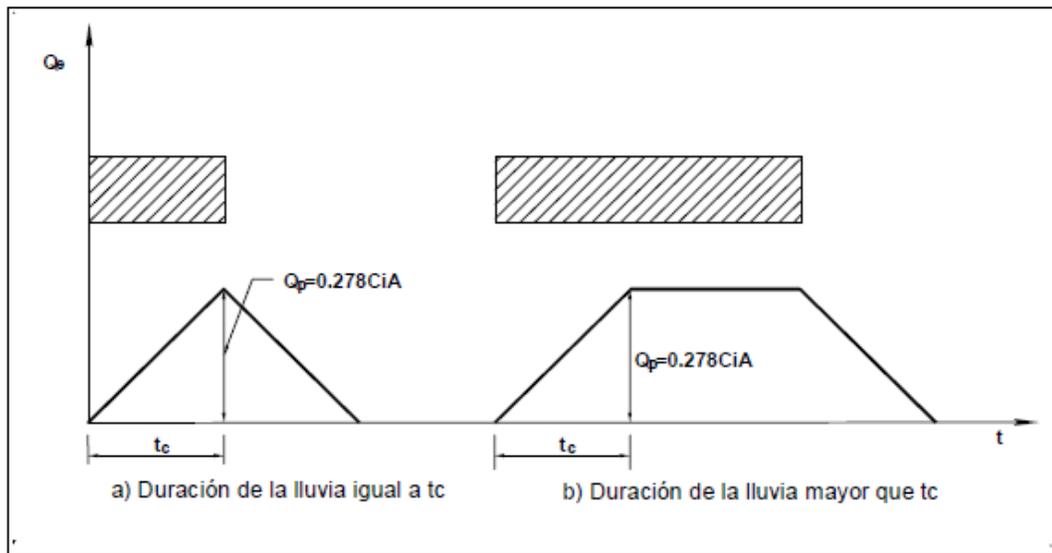


Figura 7. Representación gráfica del método racional (CONAGUA, 2007)

Para estimar el tiempo de concentración a través de la superficie, se utiliza la fórmula propuesta por Kirpich, que se define como:

$$T_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Donde:

T_{cs} tiempo de concentración sobre la superficie (h).

L longitud del cauce principal (m).

S pendiente media del cauce principal (decimal).

Algunos autores proponen otras fórmulas para calcular el tiempo de concentración a través de la superficie. Para calcular la pendiente media del cauce principal existen también varios criterios; la selección del más adecuado depende de la precisión de los datos de que se disponga sobre el perfil del cauce principal.

2.7. Drenaje pluvial de caminos

Las estructuras de captación y conducción empleadas en el diseño y construcción de alcantarillados pluviales se desarrollaron a partir del mejoramiento del drenaje pluvial en caminos. Por ello, conviene tratar desde el punto de vista hidráulico algunas de las estructuras originales utilizadas en el drenaje en caminos.

El drenaje en caminos se compone de estructuras superficiales y subterráneas, que se clasifican según la posición que tienen con respecto al eje del camino. Así, se tienen estructuras de drenaje longitudinal y transversal.

El drenaje longitudinal tiene un trazo paralelo al eje del camino y tiene como objetivo captar los escurrimientos que fluyen hacia o desde el camino en forma transversal al mismo. Entre las estructuras que forman este tipo de drenaje se encuentran: cunetas, contra cunetas, bordillos y canales de encauzamiento.

El drenaje transversal por su parte, da cauce al agua que cae sobre la corona del camino, así como a aquellas corrientes naturales que cruzan de un lado a otro del mismo. En este tipo de estructuras se encuentran: alcantarillas (tubos, cajones y bóvedas), lavaderos, vados, sifones invertidos, puentes y el propio bombeo de la corona.

Varias de las estructuras mencionadas anteriormente son utilizadas, en menor o mayor grado, para dar drenaje a caminos urbanos, rurales y semiurbanos, así como en autopistas y carreteras.

Las estructuras de drenaje en caminos que conviene analizar desde el punto de vista hidráulico, son las cunetas y las alcantarillas, tratando además las coladeras pluviales cuyo uso es común como estructuras de captación en calles y avenidas.

2.7.1. Flujo en cunetas

Las cunetas son pequeños canales cuyo trazo es paralelo al eje del camino. Se ubican a los lados del camino y permiten captar y conducir el agua que fluye sobre el camino hacia las orillas del mismo (debido al bombeo o ligera pendiente que existe

desde el centro y hacia los lados del camino). En la **Figura 8** se muestra una sección transversal (con escala vertical exagerada) de una cuneta típica, mostrada a partir del centro de la calle (eje de la calle). En la **figura 9** se muestran otras secciones.

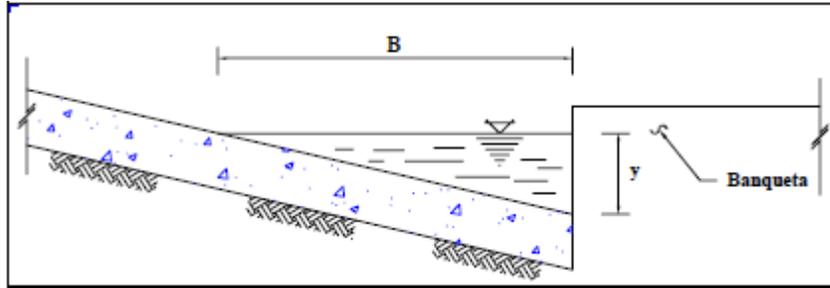


Figura 8. Sección transversal de una cuneta típica en una calle

Para calcular la capacidad de conducción de una cuneta se aplican las ecuaciones de flujo uniforme en canales. De esta forma, dada una geometría de la cuneta, se puede hacer una relación. En las relaciones se anotan las velocidades esperadas del flujo (V_i), así como los gastos máximos correspondientes (Q_i); esto se hace de acuerdo a la geometría definida por el área transversal del flujo, A , el tirante máximo permisible ($y_{m\acute{a}x}$) y varias posibles pendientes de la calle (S_i). El mismo análisis se puede aplicar a cunetas con otro tipo de sección transversal.

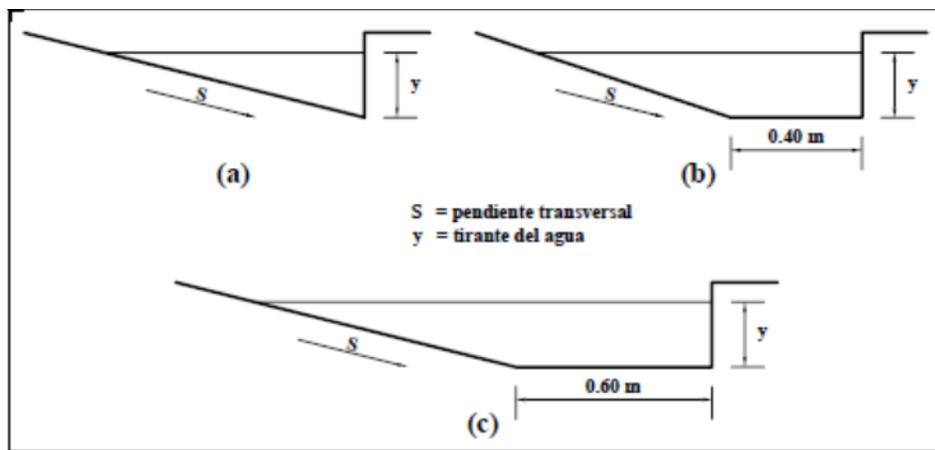


Figura 9. Otras secciones transversales de cunetas

2.7.2.- Tópicos asociados al flujo de agua en calles

De manera global el drenaje urbano está constituido por dos tipos de estructura: las de localización y las de transferencia. Las primeras corresponden a los lugares donde el agua es detenida y sufre cambios debido a procesos generados por el hombre, por ejemplo, los estanques de regulación, los sistemas de distribución, las plantas de tratamiento y las plantas de bombeo. Las estructuras de transferencia conectan a las anteriores y están constituidas por zanjas y canales de drenaje, alcantarillado y calles. El sistema de drenaje es alimentado por la lluvia y el agua procedente de otras fuentes, la cual llega a través canales y/o tuberías. El cuerpo de agua receptor de sus descargas puede ser un río, un lago o el océano. En particular el sistema de alcantarillado pluvial está constituido por una red de tuberías enterradas, que incluyen obras de captación de las aguas de tormenta y de transporte de sus descargas hasta el cuerpo de agua receptor.

Esto significa que el diseño de los sistemas de alcantarillado implica dar solución a los siguientes cuatro sub-problemas: (1) estimar los gastos por evacuar, (2) introducir tales gastos a la red de tuberías, (3) diseñar dicha red de tuberías y (4) verter los gastos en un cuerpo de agua receptor. El primero es un problema hidrológico, mientras que el tercero y cuarto son hidráulicos, al segundo problema, comúnmente se le presta poca atención y por ello el agua llega a fluir de manera descontrolada por la calle y a otras superficies de la ciudad, aun cuando existe un colector pluvial en ella o cercano a tales áreas.

Durante el proceso de diseño de la red de alcantarillado se acepta la hipótesis de que la lluvia de diseño se transforma en escurrimiento, el cual entra a la red en la misma zona donde se genera. Bajo tal hipótesis se define una serie de sub-cuencas hidrológicas, cuyos límites el escurrimiento superficial no rebasará, cuando lo anterior no se cumple el diseño hidrológico e hidráulico es erróneo (CONAGUA, 2007)

2.8. Método CONAGUA

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México, es el organismo encargado de administrar y preservar las aguas nacionales. Entre una de sus publicaciones está

el Manual de Alcantarillado Pluvial el cual forma parte del manual de Agua Potable y Alcantarillado. En el cual se pretende cubrir los principales aspectos relacionados con el alcantarillado pluvial.

En el manual se especifica como analizar la capacidad de la coladera considerando que ella funcionará cómo un orificio, por lo que empleando la fórmula de orificios se puede estimar el gasto que puede fluir a través de las aberturas como:

$$Q = 1000 \times C_d \times A \times \sqrt{2gb}$$

Donde:

- Q Capacidad de la coladera (l/s).
- C_d Coeficiente de descarga, se recomienda $C_d = 0.60$.
- A Área neta de entrada a la coladera (m^2).
- g Aceleración de la gravedad [m/s^2].
- b Tirante del agua sobre la coladera [m].

Es conveniente aplicar un factor de reducción, por obstrucción de basura, que puede ser de 2; por lo que la capacidad de la coladera se multiplica por 0.50. Para determinar un área de abertura óptima véase **Anexo II**.

El tipo de coladera es usualmente estándar ya que tiene dimensiones prefijas y no es posible dimensionar cada coladera según su gasto de diseño y su uso implica en la colocación de tantas coladeras como sea necesario para captar el gasto de diseño o cubrir el área de aportación y la capacidad de la coladera es directamente proporcional al tirante de agua sobre la misma.

En la ecuación se observa que la capacidad de la coladera es directamente proporcional al tirante de agua sobre la misma, por lo que para aumentar su confiabilidad en ocasiones se hacen arreglos al pavimento, considerando pendientes transversales y longitudinales a la calle.

2.9. EPA SWMM

El modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM (*Storm Water Management Model*) de la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (USEPA, U.S. Environmental Protection Agency), es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico-hidráulico de un sistema de drenaje urbano, tanto en términos de cantidad de agua como en la calidad de la misma. Este modelo lleva más de treinta años de uso en los Estados Unidos y se ha difundido por todo el mundo, siendo una herramienta de cálculo reconocida a nivel mundial.

El programa EPA SWMM 5.0 es un software desarrollado principalmente para el estudio, diseño y análisis de sistemas de drenaje urbanos. Este programa simula la formación de escorrentía y cargas contaminantes sobre sub-cuencas. Luego, estos flujos son transportados a través de la red de drenaje del medio urbano en estudio. Para lograr un manejo eficiente de SWMM 5.0 es necesario comprender cómo considera un sistema de drenaje, los elementos que participan de este sistema, y las relaciones entre los diferentes elementos del sistema de drenaje.

SWMM 5.0 no es un programa del que se vayan a extraer resultados inmediatos. Para ello es necesario recorrer un camino previo, desde la recogida del máximo de información de la cuenca y de la red a analizar, perfiles longitudinales de los colectores, cotas del terreno (tapas), definir los datos de lluvia a utilizar, definir las estructuras de captación existentes o las necesarias y finalmente, como un eslabón más de la cadena de trabajo, realizar los cálculos hidrológicos o hidráulicos.

2.9.1. Modelo conceptual del sistema de drenaje

SWMM 5.0 considera el sistema de drenaje como una colección de elementos y flujos diversos (objetos) dentro de módulos o capas. Cada una de estas capas representa en forma general diversos procesos hidrológicos o hidráulicos tal como la precipitación o el flujo de aguas pluviales a través de alcantarillas. La **Figura 10** muestra el esquema del modelo conceptual de sistema de drenaje que utiliza SWMM 5.0.

En el esquema de la **figura 10**, la capa inicial es la *Atmosférica*, en la cual se genera la precipitación que cae sobre la capa de *Terreno*. Este proceso de precipitación es representado en SWMM 5.0 mediante objetos tipo *Rain Gage* (pluviómetro).

Siguiendo el proceso hidrológico, la capa de *Terreno* recibe la precipitación proveniente de la capa *Atmosférica* en forma de lluvia o nieve. En este módulo de *Terreno* se producen dos procesos hidrológicos: las pérdidas de precipitación, y la escorrentía superficial. Dentro del primer proceso, humidificación superficial, una parte del volumen precipitado se mantiene dentro del módulo de *Terreno*, y otra fracción se envía como flujo hacia el módulo de *Aguas Subterráneas*. En el segundo proceso (escorrentía superficial), se envía flujo y cargas contaminantes hacia la capa de *Transporte*. Ambos procesos son representados en la capa de *Terreno* mediante objetos tipo *Subcatchment* (área captadora o sub-cuenca).

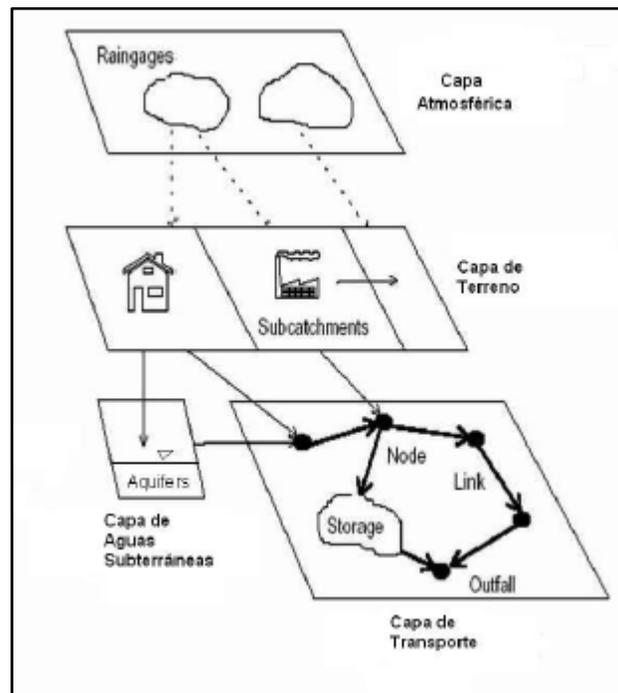


Figura 10. Modelo conceptual del sistema de drenaje

Es importante destacar el hecho de que no necesariamente todas las capas podrían estar en un modelo particular construido con SWMM 5.0. Por ejemplo, se podría

analizar sólo la capa de *Transporte* utilizando como entrada algunos hidrogramas definidos por el usuario.

2.9.1.1. Elementos del sistema de drenaje y su representación con EPA SWMM 5.0

EPA SWMM 5.0 representa los diversos elementos del sistema (conductos, pozos, depósitos, etc.) y los procesos hidrológicos-hidráulicos que ocurren en el sistema (precipitación, infiltración, etc.) mediante *Objetos*. SWMM 5.0 considera dos tipos de objetos:

- Visuales, los cuales pueden ser visualizados por el usuario en el área de trabajo de SWMM 5.0. En general los objetos visuales representan elementos físicos del sistema de drenaje o procesos hidrológicos dentro de éste.
- No Visuales, los cuales no se encuentran en el área de trabajo del programa. Estos objetos describen características y procesos adicionales dentro del sistema de drenaje.

A continuación se presentan los objetos de más uso al momento de realizar un modelo con EPA SWMM 5.0. Las totalidades de estos, tanto visuales como no visuales, pueden ser consultados en el manual de usuario de EPA SWMM 5.0.

2.9.1.2. Objetos Visuales

La **figura 11** muestra cómo se puede disponer de los objetos visuales de tal forma que representen un sistema de drenaje.

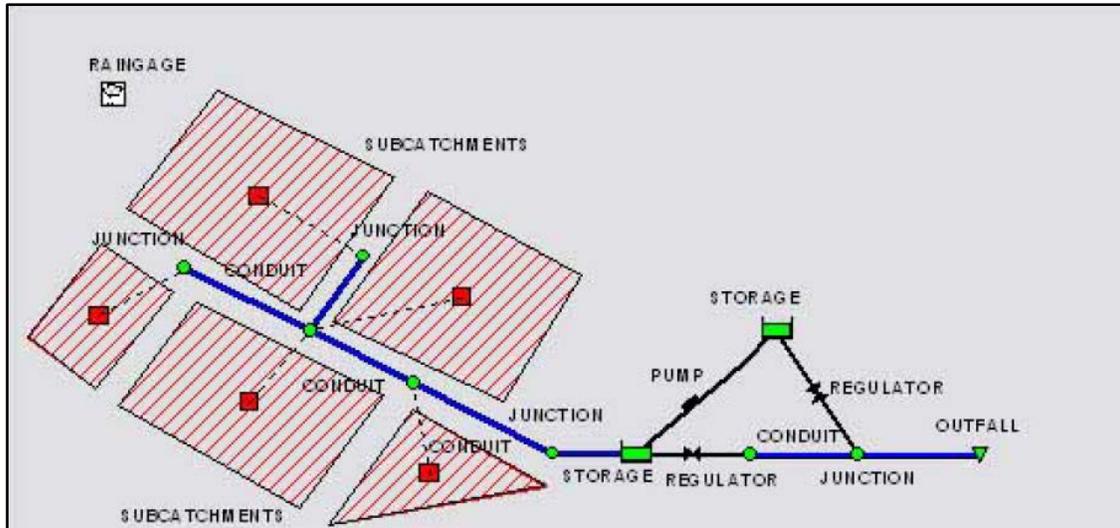


Figura 11. Esquema representativo de los objetos visuales

El objeto que representa a la precipitación es el *Rain Gage*. Este objeto proporciona la precipitación sobre una o más sub-cuencas, y es uno de los dos objetos imprescindibles para representar el proceso de escorrentía superficial sobre el área de drenaje. La información de precipitación puede ser suministrada por el usuario a través de una serie temporal definida por éste, o se puede utilizar un archivo externo de datos de precipitación.

El otro objeto necesario para modelar la escorrentía superficial es el *Subcatchment*, denominado como sub-cuenca. Este objeto representa la unidad o porción hidrológica básica de superficie de terreno cuyas características topográficas e hidrológicas-hidráulicas dirigen la escorrentía hacia un único punto de salida de la sub-cuenca. Es muy importante destacar que es el usuario responsable de discretizar el área de drenaje en sub-cuencas lo más homogéneas posibles en términos de pendientes y rugosidades superficiales, e identificar los puntos de salida para cada sub-cuenca. En SWMM 5.0 los puntos de salida de las sub-cuencas pueden ser objetos tipo *Node* pertenecientes a la red de drenaje, u otras sub-cuencas. Cada objeto tipo sub-cuenca requiere de datos tales como, por ejemplo, el área en planta y el ancho de ésta, el *Rain Gage* asociado a ella, la pendiente media que posee, entre otros.

Un objeto tipo *Subcatchment* puede contener una porción de área impermeable y otra permeable. Para cada una de estas áreas se requiere sus magnitudes como porcentaje del área del *Subcatchment*, y sus respectivas rugosidades. Por otro lado, en cada objeto de sub-cuenca se pueden considerar otros procesos hidrológicos tales como la infiltración de la precipitación hacia la zona no saturada del subsuelo; la acumulación y la fusión de la nieve caída; el flujo de aguas subterráneas entre un acuífero y un nodo del sistema de drenaje; y la acumulación y transporte de contaminantes sobre cada sub-cuenca.

En relación a la red de drenaje (**figura 11**), ésta se representa en SWMM 5.0 por dos tipos genéricos de objetos: objetos tipo *Node* (nodo) y tipo *Link* (conector). Dentro de la primera clase existen diversos tipos de nodos:

- *Junction* (unión), cuya función en el esquema de SWMM 5.0 es la de unir dos o más objetos conectores. Este tipo de objeto puede representar los pozos de un sistema de alcantarillado, el cruce de calles, la unión de dos o más canales de drenaje, o algún nodo de conexión. La información básica que se debe suministrar a una unión en SWMM 5.0 corresponde a su cota de fondo y a su altura hasta la superficie de terreno, parámetros que son mostrados en la **figura 11**.

- *Outfall* (descarga), que dentro del esquema de SWMM 5.0 corresponde a nodos terminales de la red, donde se definen las condiciones de contorno aguas abajo cuando se utiliza el método de la Onda Dinámica para propagar el flujo en la red. Dichas condiciones de contorno pueden ser del tipo calado crítico o calado normal del conducto que conecta con el *Outfall*, elevación fija de la lámina de agua en el nodo, tabla de mareas del tipo elevación de la lámina de agua versus hora del día, o una serie temporal entre la elevación de la lámina de agua y el tiempo. Un nodo de descarga sólo puede tener un conducto que lo conecta, y requiere como principales datos la cota de fondo y el tipo de condición de contorno a emplear.

- *Conduit* (conducto), que corresponde a los conductos que transportan el flujo a través de la red. Este tipo de objeto representa a las tuberías, alcantarillas o canales por los cuales el agua se mueve desde un nodo a otro. Este objeto se caracteriza en SWMM 5.0 por su longitud, la identificación de sus nodos inicial y final, su sección transversal, y su coeficiente de rugosidad, entre otros parámetros. En relación a la sección transversal de un conducto, SWMM 5.0 permite al usuario elegir entre 21 formas predefinidas por el programa (**figura 12**), además de incorporar secciones transversales naturales e irregulares definidas por el usuario.

Los objetos *Time Series* (series de tiempo o series temporales) describen cómo varían con el tiempo ciertas propiedades de un determinado objeto, por ejemplo la precipitación de un *Rain Gage*, la temperatura en un *Subcatchment*, o el hidrograma de entrada de flujos externos en un *Node*, entre otros. Finalmente, los objetos *Time Patterns* (patrones temporales) permiten que los flujos de aguas residuales que se producen en “tiempo seco” (tiempo sin precipitaciones) puedan variar mensualmente, diariamente, semanalmente o en forma horaria, según una forma definida por el usuario (*FLUMEN, 2007*)

2.9.1.3. Métodos de cálculo

SWMM 5.0 es un programa hidrológico-hidráulico cuyas rutinas de cálculo se desarrollan sobre los principios de Conservación de la Masa y Conservación de la Cantidad de Movimiento para calcular caudales, calados, velocidades, concentraciones, y otras variables de interés, sobre intervalos de tiempo discretos. Procesos tales como la escorrentía superficial, infiltración, propagación del flujo en la red, y el transporte de contaminantes, son simulados usando estos principios.

La escorrentía superficial que se produce en cada *Subcatchment* es calculada por SWMM 5.0 asumiendo que cada sub-cuenca se comporta como un depósito no lineal. El modelo de depósito no lineal es un modelo “agregado” que aplica la

ecuación de Conservación de la Masa y una ecuación tipo Onda Cinemática para calcular el caudal de escorrentía superficial a la salida de cada sub-cuenca. En este modelo de depósito se requieren parámetros tales como el área en planta y el ancho característico de la sub-cuenca, así como la rugosidad superficial de ella, entre otros parámetros. Además, la infiltración que podría producirse en cada *Subcatchment* puede ser calculada usando alguno de los tres diferentes métodos que SWMM 5.0 incorpora: método de Horton, método de Green-Ampt, y el método del Número de Curva del NRCS

- La ecuación de Horton. Este método se basa en observaciones empíricas y propone que la infiltración decrece exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta un cierto valor mínimo a lo largo del evento de lluvia.
- El método Green-Ampt. Para modelar el fenómeno de la infiltración este método asume la existencia de un frente húmedo brusco (*sharp wetting front*) en el suelo que separa el suelo con un determinado contenido inicial de humedad del suelo completamente saturado de la parte superior.
- El método del Número de Curva. Este método es una aproximación adoptada a partir del denominado número de Curva de NRCS (SCS) para estimar la escorrentía. Se asume así que la capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse en una tabla de Números de Curva tabulados. Durante un evento de lluvia esta capacidad se representa como una función de la lluvia acumulada y de la capacidad de infiltración restante.

EPA SWMM 5.0 permite elegir entre tres diferentes metodologías de cálculo del flujo en la red de drenaje. La primera, denominada como *Steady Flow Routing*, consiste en asumir que en cada intervalo de tiempo de cálculo las condiciones del flujo no cambian; es decir, se tiene flujo permanente. La segunda metodología es denominada como *Kinematic Wave* (onda cinemática), y en ésta se considera la variabilidad temporal del flujo.

Este método resuelve la ecuación de Conservación de la Masa y una aproximación de la ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento. El tercero de estos métodos consiste en la resolución de las ecuaciones completas de Saint Venant (Conservación de la Masa y Cantidad de Movimiento), denominado como método de la Onda Dinámica (*Dynamic Wave*). Este método es el físicamente más correcto, aunque demanda un mayor tiempo de proceso computacional.

Name	Parameters	Shape	Name	Parameters	Shape
Circular	Depth		Filled Circular	Depth, Filled Depth	
Rectangular - Closed	Depth, Width		Rectangular - Open	Depth, Width	
Trapezoidal	Depth, Base Width, Side Slopes		Triangular	Depth, Top Width	
Horizontal Ellipse	Depth, Max. Width		Vertical Ellipse	Depth, Max. Width	
Arch	Depth, Max. Width		Parabolic	Depth, Top Width	
Power	Depth, Top Width, Exponent		Rectangular-Triangular	Depth, Top Width, Triangle Height	
Rectangular-Round	Depth, Top Width, Bottom Radius		Modified Baskethandle	Depth, Top Width	
Egg	Depth		Horseshoe	Depth	
Gothic	Depth		Catenary	Depth	
Semi-Elliptical	Depth		Baskethandle	Depth	
Semi-Circular	Depth				

Figura 12. Tipos de conductos

2.9.1.4. ENTORNO GRÁFICO DE EPA SWMM 5.0

La interfaz de SWMM 5.0 permite al usuario crear una representación esquemática del sistema de drenaje usando los objetos visuales. Además permite la edición de las propiedades de éstos usando nuevas ventanas que son abiertas tan sólo haciendo doble clic sobre el objeto.

La interfaz gráfica de SWMM 5.0 está constituida por los siguientes elementos: un menú principal (*Main Menu*), diferentes barras de herramientas (*Toolbars*), una barra de estado (*Status Bar*), un panel de navegación (*Browser Panel*), una ventana del mapa del área de estudio (*Study Area Map*), y ventanas de edición de propiedades (*Property Editor*). La **figura 13** muestra una vista de la pantalla principal de trabajo de EPA SWMM 5.0, en donde se destacan los elementos antes mencionados.

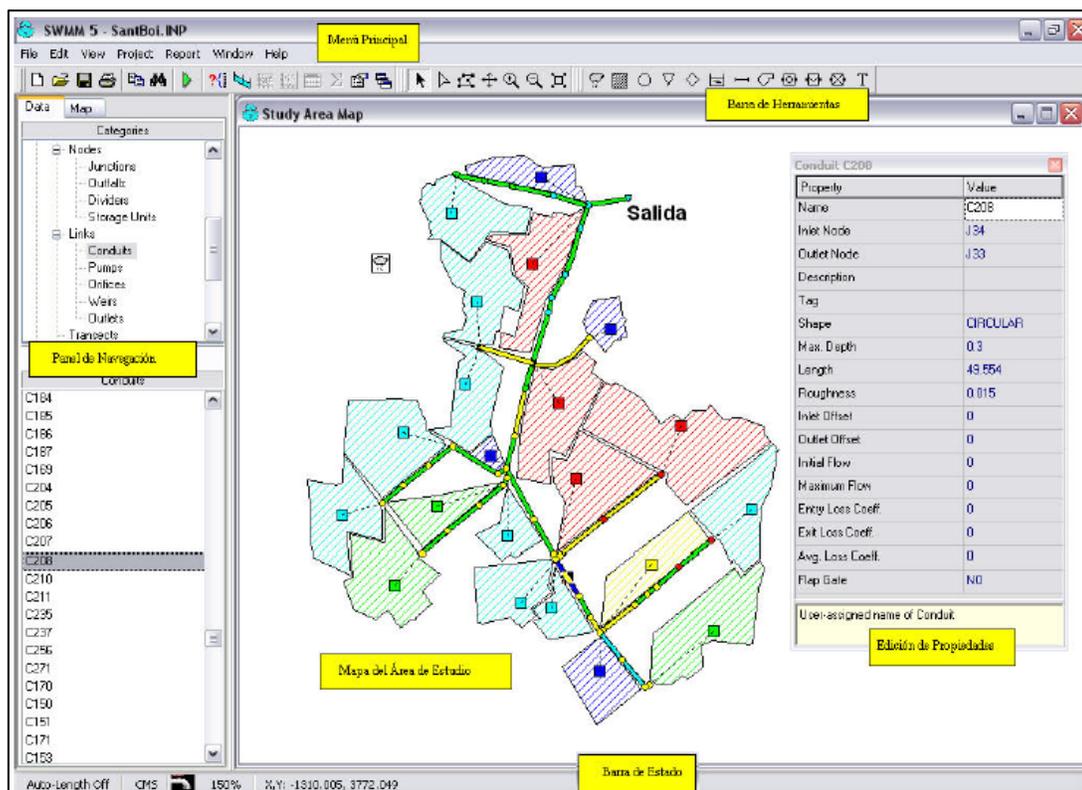


Figura 13. Interfaz gráfica de SWMM 5.0

El menú principal contiene una serie de opciones para controlar el programa. Dentro de estas opciones destacan la opción *View*, *Project* y *Report*. En la primera se

encuentran comandos para el manejo de fondos (*Backdrops*) tipo mapas, dibujos de CAD o imágenes de SIG, que pueden ser colocados detrás de los objetos visuales de SWMM 5.0 con el objetivo de referenciar visualmente los objetos a la imagen. En la opción *Project* se encuentran los comandos relacionados con el proyecto que se está analizando, tales como *Details* el cual muestra una lista de todos los datos que el código de cálculo de SWMM 5.0 utiliza, o *Calibration Data* el cual registra archivos conteniendo datos medidos de algún parámetro para usar en un proceso de calibración. Dentro de los parámetros medidos se tienen el caudal dentro de un conducto, la escorrentía superficial en una sub-cuenca, o el calado en algún nodo de la red de drenaje, entre otros. La opción *Report* del menú principal proporciona una serie de opciones para presentar los resultados de las simulaciones: *Graph*, muestra los resultados en forma de gráficos; *Table*, muestra los resultados en tablas; y *status*, muestra un informe del estado de la más reciente simulación realizada.

La barra de herramientas (*Toolbars*) contiene un conjunto de diferentes botones de acceso rápido para ser usados en operaciones de creación de un proyecto SWMM 5.0. Estos botones pueden ser agrupados en cuatro categorías de barras de herramientas: estándar (*Standar Toolbar*), de mapa (*Map Toolbar*), de objetos (*Object Toolbar*), y de animación (*Animation Toolbar*). La **figura 14** muestra la barra de herramienta de objetos.



Figura 14. Barra de herramientas

Cada uno de los botones contenidos en la figura anterior representa un elemento físico del proyecto que se desarrolla en SWMM 5.0, a saber:

1.  representa un objeto *Rain Gage*
2.  representa un objeto *Subcatchment*
3.  representa un objeto *Junction*

4.  representa un objeto *Outfall*
5.  representa un objeto *Divider*
6.  representa un objeto *Storage Unit*
7.  representa un objeto *Conduit*
8.  representa un objeto *Pump*
9.  representa un objeto *Orifice*
10.  representa un objeto *Weir*
11.  representa un objeto *Outlet*
12. **T** representa a un objeto *Label* el cual representa una etiqueta de texto que puede ser agregada en el mapa del área de estudio

El panel de navegación, que se ubica al costado izquierdo dentro de la pantalla principal de SWMM 5.0, contiene dos fichas que pueden ser activadas por separado. Una de ella es la ficha *Data*, bajo la cual se despliegan las diversas categorías de objetos disponibles en un proyecto de SWMM 5.0, y los nombres de los objetos individuales pertenecientes a la categoría actualmente seleccionada. Bajo la otra ficha, llamada *Map*, se encuentran propiedades que pueden ser activadas en el mapa del área de estudio cuando se ha realizado una simulación. Estas propiedades permiten destacar variables de algunos objetos en periodos de tiempo elegidos por el usuario.

El mapa del área de estudio es la mayor ventana dentro de la interfaz gráfica de EPA SWMM 5.0. En esta ventana es donde se construye el esquema del sistema de drenaje que va a ser estudiado y donde se puede colocar una imagen de fondo (*Backdrop*) a modo de referencia. Por otro lado, la barra de estado (*Status bar*) indica algunas propiedades del programa tales como el tipo de unidades de medición de simulación efectuado: simulación realizada, simulación no disponible, o simulación invalidada.

Finalmente, las ventanas de edición de propiedades (*Property Editor*) se activan cuando el usuario desea ingresar, o editar algunos valores de los parámetros que posee cada objeto. El contenido de cada ventana de edición depende del tipo de objeto que se desee editar; así, una ventana de edición de un conducto presentará una mayor cantidad de casillas a ser completadas que una ventana de edición de un nodo.

2.9.2. CAPTACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL. MODELACIÓN MEDIANTE SWMM 5.0

La urbanización de una cuenca modifica su respuesta hidrológica frente a una determinada lluvia, la que conlleva la alteración de las redes de drenaje natural y un incremento de las zonas impermeables en superficie. Esta dinámica afecta a la hidrología de la cuenca en términos de incrementos del volumen de escorrentía y del caudal máximo. Asimismo es menor el tiempo que transcurre entre el inicio de la escorrentía provocada por la lluvia y el máximo caudal: disminuye el tiempo de concentración. Todo ello supone que las nuevas zonas urbanizadas pueden estar afectadas con mayor frecuencia por caudales que pueden crear problemas por inundación ¿Cuáles son las causas más frecuentes de inundaciones de zonas urbanas?

- Sistema de drenaje superficial insuficiente
- Obstrucción de los elementos de captación y de la red de drenaje
- Caudales procedentes de ríos o arroyos desbordan las llanuras de inundación ocupadas por urbanizaciones
- El agua sobresale de los pozos de alcantarillado debido a la entrada en presión de la red
- En algunos casos, algunas calles secundarias o parte de ellas se utilizan para transportar agua durante sucesos de lluvia extremos.

2.9.2.1. Las rejas de alcantarillado y su eficiencia hidráulica

Hoy en día en el mercado existen muchísimas tipologías de rejas de alcantarillado con distintas dimensiones e innumerables formas geométricas, pero el motivo de tanta diversidad no lo debemos buscar necesariamente en su funcionalidad, sino en

la estética. De hecho, debido a la ausencia de normativas específicas que regulen el diseño de una rejilla en base a su capacidad hidráulica, se deciden diseños nuevos atendiendo a sus dimensiones, formas, integración en el mobiliario urbano, etc. Los suministradores y fabricantes proporcionan numerosos datos sobre su comportamiento estructural pero raramente lo hacen sobre su capacidad de captar caudales. La capacidad hidráulica de una rejilla de alcantarillado se mide a través de su eficiencia E (o rendimiento) que se define como:

$$E = \frac{Q_{capt}}{Q_{calle}}$$

Donde Q_{capt} es el caudal captado por la rejilla y Q_{calle} es el caudal de paso por la calle.

2.9.2.2. Estudio de un sistema de drenaje superficial a través de SWMM 5.0

El estudio de un sistema de captación de una calle a través del modelo SWMM 5.0 se puede elaborar utilizando dos aproximaciones distintas para la simulación de la propagación del flujo en las cunetas:

- Onda cinemática (*Kinematic Wave, WV*)
- Onda dinámica (*Dynamic Wave, DW*)

La elección de una u otra aproximación hace que se comporte de una manera distinta la representación de los elementos de captación. En el primer caso las rejillas se pueden representar a través de nodos *dividers*, mientras en el segundo, a través de *link* adimensionales llamados *outlets*. En ambos casos se necesita un buen nivel de información para una discretización detallada de la cuenca urbana.

2.9.2.3. Escala de estudio de detalle

Durante el estudio de una red de drenaje a través de un modelo hidrológico-hidráulico, como SWMM 5.0, lo habitual es considerar que toda la escorrentía producida por un evento de lluvia en una sub-cuenca se introduzca en la red a través del pozo más cercano.

Aquí se omite el estudio del sistema de drenaje superficial y se hace la hipótesis implícita que toda la lluvia caída que se transforma en escorrentía superficial, entra en la red de drenaje prácticamente en la misma zona en que cae. Definimos en base a esa hipótesis una serie de sub-cuencas hidrológicas cuyos límites están fijados en el supuesto que el agua superficial no los supera.

En realidad esta hipótesis puede no cumplirse debido a varias razones (falta de imbornales, escasa eficiencia de los elementos de captación, obstrucción de los imbornales presentes en una sub-cuenca, etc.) así que el esquema supuesto puede saltar.

2.9.2.4. Esquema de drenaje de una calle en SWMM 5.0

En este apartado se analizan unos conceptos básicos para utilizar el modelo SWMM 5.0 en el estudio de un sistema de captación en calles urbanas.

Consideremos que las superficies de los edificios (tejados, terrazas, patios internos, etc.) estén directamente conectadas a la red subterránea, los planos no conectados se podrían añadir perfectamente en la simulación. En un esquema de este tipo, las rejillas de alcantarillado constituyen los límites hidrológicos de las sub-cuencas urbanas y habrá que definir los parámetros que caracterizan estas áreas.

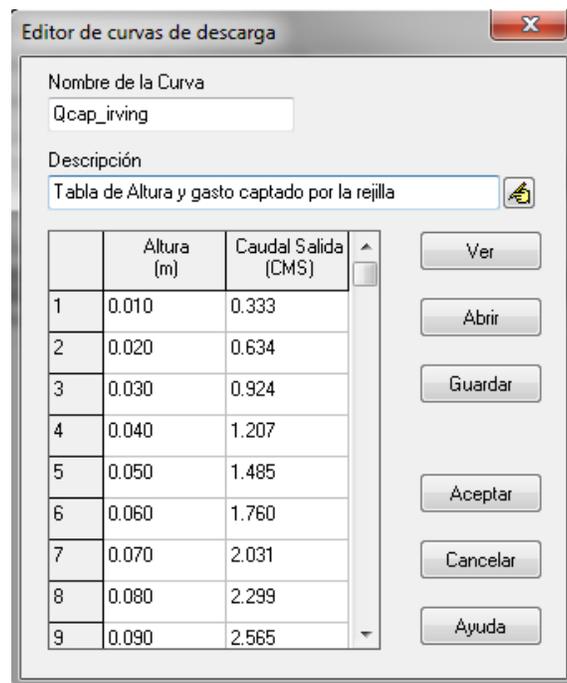
Una sub-cuenca urbana en SWMM 5.0 es tratada a través del modelo de depósito no lineal. El *input* a cada depósito será dado por las precipitaciones y los caudales procedentes de las sub-cuenca aguas arriba, mientras que el *output* de los depósitos puede expresarse a través de infiltración, evaporación y escorrentía superficial.

En el caso particular de calles con un alto grado de impermeabilidad las pérdidas por infiltración, interceptación y almacenamiento en depresión pueden despreciarse, así como las pérdidas por evaporación debido al hecho que en hidrología urbana el intervalo total de tiempo de estudio (aproximadamente 1-2 horas) es mucho más

corto que en cuencas naturales. Eso quiere decir que para un estudio de este tipo la lluvia bruta puede aproximarse a la lluvia neta.

Después de haber hecho las consideraciones anteriores pasamos a caracterizar los elementos del modelo. En particular, después de la lluvia, habrá que definir el tipo de rejilla, las sub-cuencas, y los tramos de calle donde habrá propagación de escorrentía. Para pendientes suficientemente elevadas ($>1\%$) la aproximación de la onda cinemática se puede considerar correcta y suficientemente precisa, mientras que para pendientes aproximadamente nulas habrá que utilizar la onda dinámica. Si se quiere modelar de forma conjunta las dos capas de drenaje (calle y red subterránea) la única opción posible será la de la onda dinámica.

Para caracterizar una reja considerando la aproximación de la onda dinámica hay que utilizar un *link* adimensional llamado *outlet*. Este elemento permite la circulación del flujo en los dos sentidos y se puede caracterizar a través de una tabla carga hidráulica H (*head*) (en m) / flujo captado (*outflow*) (en m^3/s). Este tipo de tabla se puede establecer a través de cálculo de la eficiencia hidráulica de un imbornal (figura 15 y Figura 16).



	Altura (m)	Caudal Salida (CMS)
1	0.010	0.333
2	0.020	0.634
3	0.030	0.924
4	0.040	1.207
5	0.050	1.485
6	0.060	1.760
7	0.070	2.031
8	0.080	2.299
9	0.090	2.565

Figura 15. Tabla de eficiencia hidráulica de un imbornal

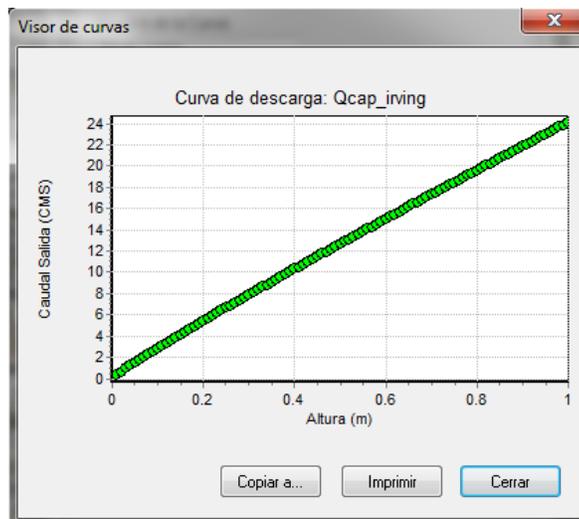


Figura 16. Relación caudal de paso/ caudal captado

Esta opción es adecuada para estudiar el drenaje de una cuenca considerando de manera conjunta la capa superficial y la subterránea (o sea las redes de drenaje superficial y de alcantarillado). En realidad para modelar este tipo de flujo (flujo dual) habría que conocer la relación de entrada del flujo en la red (ecuación de eficiencia potencial) y también la relación que regula la salida a la calle de caudales a través de imbornales o pozos cuando la red entra en carga.

A falta de mayor información se puede considerar que la salida de caudal a la calle se realiza mediante un *link* de tipo orificio (*orifice*).

Las sub-cuencas (*subcatchments*) se definen a través de los siguientes parámetros:

- Nombre de la sub-cuenca
- Pluviómetro asociado
- Salida de la sub-cuenca (es el punto de desagüe de la sub-cuenca que en nuestro caso coincide con la reja de alcantarillado)
- Área de la sub-cuenca (en hectáreas)
- Ancho de la sub-cuenca (en hectáreas)

- Ancho de la sub-cuenca (longitud características del flujo superficial, que en este caso corresponde a la distancia entre las rejas)
- Pendiente media de la cuenca (en %)
- Porcentaje de área impermeable (en este caso 100%)
- Rugosidad de Manning para las superficies impermeables
- Almacenamiento en depresiones en las superficies impermeables (en este caso 0 mm)

Para este tipo de estudios, estos son los únicos parámetros que hay que introducir para definir las sub-cuencas. Una vez definidas éstas, hay que definir los *outfalls* (elementos últimos de desagüe) y los *links*, o sea, en casos de estudios de drenaje superficial, las cunetas o las calles donde ocurre la propagación de la escorrentía superficial. SWMM 5.0 permite introducir *link* con secciones irregulares no presentes en su base de datos, así que se puede introducir exactamente la geometría de la calle y definir el tramo a través de los siguientes datos:

- Nodo inicial
- Nodo final
- Sección (en caso de ser irregular, entonces debe ser introducida por el usuario)
- Longitud (en m)
- Rugosidad de Manning
- Altura máxima (en m)

2.10. Método U.S URBAN DRAINAGE DESIGN MANUAL

La Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration) es una división del Departamento de Transporte de los Estados Unidos que se especializa en carretera y vías de transporte. Está organización presentó un manual en su segunda edición especializado en directrices para todos los aspectos de diseño de drenaje urbano. Incluye discusiones de hidrología, drenaje, flujo de canales en pavimentos, desagües pluviales, estaciones de bombeo y de control de calidad del

agua aplicado a las vías de transporte. El Manual de diseño de Drenaje Urbano, Ingeniería Hidráulica Circular N ° 22 (HEC-22), ofrece una guía completa y práctica para el diseño de sistemas de drenaje pluvial asociados a los sistemas de transporte. En el cual se especifica cómo analizar la capacidad de la coladera con depresión considerando que ella funciona como un orificio a mayor tirante de agua sobre ésta o un vertedor a menos tirante de agua sobre la misma. Para clasificar se utilizan las siguientes fórmulas:

Considerar el sumidero como un vertedor:

$$h < 1.6 \times \frac{A_g}{L + W}$$

Donde:

- h Tirante de agua sobre la coladera o sumidero (m)
- L Longitud de la coladera o sumidero (m).
- W Ancho de la coladera o sumidero (m).
- A_g Área de abertura de la coladera o sumidero (m²).

Al determinar si la coladera o sumidero trabaja como vertedor con la siguiente fórmula se determina el gasto de captación:

$$Q = C_w P d^{1.5}$$

Donde:

- Q gasto recolectado por la coladera o sumidero (m³/s)
- P perímetro de la rejilla sin tener en cuenta la parte de la cuneta (m)
- d tirante hidráulico promedio sobre la coladera (m)

Considerar el sumidero como un orificio:

$$h \geq 1.6 \times \frac{A_g}{L + W}$$

Donde:

- h Tirante de agua sobre la coladera o sumidero (m)
- L Longitud de la coladera o sumidero (m).
- W Ancho de la coladera o sumidero (m).
- A_g Área de abertura de la coladera o sumidero (m²).

Al determinar si la coladera o sumidero trabaja como orificio con la siguiente fórmula se determina el gasto de captación:

$$Q = C_o A_g \sqrt{2gd}$$

Donde:

- Q gasto recolectado por la coladera o sumidero (m³/s)
- C_o coeficiente del orificio con un valor conocido de 0.67
- A_g área de abertura de la coladera o sumidero (m²)
- g gravedad (9.81m/s²)
- d tirante hidráulico promedio sobre la coladera (m), el cálculo del valor “d” se ilustra en la **figura 17**.

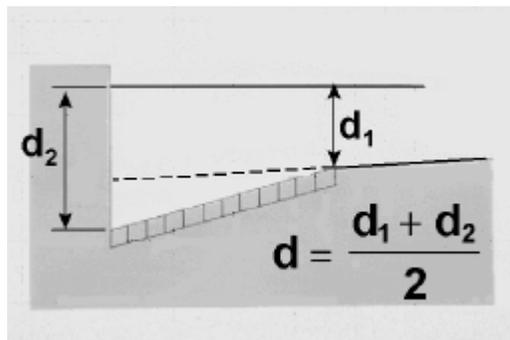


Figura 17. Representación para determinar el tirante en coladeras con depresión

Nota: al no tener una coladera con depresión se considera el valor de “d” igual al tirante sobre la coladera o sumidero.

III. METODOLOGÍA

La metodología se lleva a cabo para establecer un procedimiento fundamentado que genere posibles soluciones y propuestas a lo establecido en el planteamiento del problema, basado en los antecedentes, con fundamento en el marco teórico y utilizando en este caso dos métodos, el método de CONAGUA y el método de la Circular de Ingeniería Hidráulica (HEC) No. 22 y además del software: EPA SWMM 5.0, que apoya al procesamiento de la información, a la resolución del problema, obtención de resultados, interpretación, conclusiones y recomendaciones.

3.1. Zona de estudio

Para la realización de la investigación se delimita la cuenca que engloba la zona de estudio, se determina el área de cada una de las sub-cuencas que se encuentran en la calle V. Guerrero. Después se define la configuración topográfica de la calle, para luego determinar las pendientes de ésta. La pendiente de la calle está dada por la **Ecuación (3.1)**:

$$S = \frac{C_i - C_f}{L} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

C_i Cota inicial (m)

C_f Cota final (m)

L Longitud (m)

3.1.1. Gasto de la calle

Para determinar el gasto de la calle se utiliza la **Ecuación (3.2)**:

$$Q_o = 0.275 \times A \times i \times C \quad (3.2)$$

Donde:

- Q_o Gasto de la calle (m^3/s).
- A Área (m^2).
- i Intensidad de la lluvia (m/s).
- C Coeficiente de escurrimiento de lluvia.

Donde la variable A corresponde al área total de las cuencas que escurren a la zona de estudio.

3.2. Intensidad de lluvia

La intensidad de lluvia en mm/hr, se determina con la **Ecuación (3.3)** i-d-Tr, que fue deducida para la estación pluviométrica en la presa Oviáchic en 1995:

$$i = \frac{12.05 Tr^{0.95}}{d^{0.52}} \quad (3.3)$$

Donde Tr son los años de retorno del proyecto, que se determina por el tipo de proyecto, mediante la **Tabla 3**.

TIPO DE ESTRUCTURA	T (AÑOS)
Alcantarillas en caminos secundarios, drenajes de lluvia o contra cunetas	5 a 10
Drenaje lateral de los pavimentos, donde pueden tolerarse encharcamientos causados por lluvias de corta duración	1 a 2
Drenaje de aeropuertos	5
Drenaje urbano	2 a 10

Tabla 3. Periodos de retorno para diseño de estructuras

Fuente: Comisión Nacional del Agua 2007: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

Para la intensidad de la lluvia, se obtiene el tiempo de concentración (d) de la **Ecuación (3.4)**:

$$d = t_{cs} + 15 \text{ min} \quad (3.4)$$

Donde:

- d Tiempo de concentración.
- t_{cs} Tiempo de concentración sobre la superficie.

Los 15 min se agregan al tiempo de concentración compensando lo que tarda el agua de lluvia en trasladarse de las edificaciones a la calle.

Para estimar el tiempo de concentración a través de la superficie, se utiliza la **Ecuación (3.5)** propuesta por Kirpich:

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (3.5)$$

Donde:

t_{cs} Tiempo de concentración sobre la superficie (h).

L Longitud del cauce principal (m).

S Pendiente media del cauce principal (decimal).

3.3. Método CONAGUA

Para analizar la capacidad de la coladera, la Comisión Nacional Del Agua (MAPAS 2007) propone la fórmula siguiente **Ecuación (3.6)**:

$$Q = 1000 \times C_d \times A \times \sqrt{2gb} \quad (3.6)$$

Donde:

Q Gasto de la coladera (m^3/s).

A Área (m^2).

g Aceleración de la gravedad (m/s^2).

C_d Coeficiente de descarga.

b Tirante de agua sobre la coladera (m).

Para determinar el tirante de agua, se utiliza la fórmula de Izzard.

3.3.1. Formula de Izzard.

La **Ecuación (3.7)** publicada por el ingeniero Izzard en 1946, para determinar el gasto en cunetas:

$$Q_o = 0.375 \sqrt{I} \left(\frac{z}{n}\right) y_o^{\frac{3}{8}} \quad (3.7)$$

Despejando el valor del tirante hidráulico se obtiene la **Ecuación (3.8)**:

$$y_o = \left(\frac{Q_o}{0.375 \sqrt{I} \left(\frac{z}{n}\right)}\right)^{\frac{8}{3}} \quad (3.8)$$

Donde:

- Q_o Gasto de la calle (m³/s).
- I Pendiente longitudinal de la calle (m/m).
- z Inverso de la pendiente transversal.
- n Coeficiente de rugosidad (Manning).
- y_o Tirante hidráulico (m)

Para seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning, se usó la **Tabla 4**.

Tipo de superficie	"n"
Cuneta de hormigón con buen acabado	0,012
Revestimiento de asfalto con textura lisa	0,013
Revestimiento de asfalto con textura áspera	0,016
Revestimiento con lechada de cemento	
a) Acabado con frotachado	0,014
b) Acabado manual alisado	0,016
c) Acabado manual áspero	0,020
Revestimiento con adoquines	0,020
Cunetas con pequeñas pendientes longitudinales (hasta 2 %) sujetas a la acumulación de sedimentos, los valores "n" indicados deben ser incrementados en + 0,002 a 0,005	n

Tabla 4. Coeficientes de rugosidad de Manning

Fuente: Comisión Nacional del Agua 2007: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

3.4. Método de la Circular de Ingeniería Hidráulica (HEC) No. 22

Mediante este método se analiza el funcionamiento de la coladera, ya sea que funcione como vertedor u orificio, el cual define su funcionamiento con la **Ecuación (3.9)**:

$$h \leftrightarrow 1.6 \times \frac{A_g}{L + W} \quad (3.9)$$

Considerar el sumidero como un vertedor:

$$h < 1.6 \times \frac{A_g}{L + W}$$

Considerar el sumidero como un orificio:

$$h \geq 1.6 \times \frac{A_g}{L + W}$$

Donde:

h Tirante de agua sobre la coladera o sumidero (m)

L Longitud de la coladera o sumidero (m).

W Ancho de la coladera o sumidero (m).

A_g Área de abertura de la coladera o sumidero (m²).

Cuando la coladera funciona como orificio se utiliza la **Ecuación (3.10)** para determinar el gasto de captura o entrada:

$$Q = C_o \times A_g \times \sqrt{2gd} \quad (3.10)$$

Donde:

Q Gasto recolectado por la coladera o sumidero (m³/s).

C_o Coeficiente del orificio (adimensional).

A_g Área de abertura de la coladera o sumidero (m²).

g Aceleración de la gravedad (m/s²).

d Tirante hidráulico promedio sobre la coladera (m)

Cuando la coladera funciona como vertedero se utiliza la **Ecuación (3.11)**, fórmula para determinar el gasto de captura o entrada:

$$Q = C_w \times P \times d^{1.5} \quad (3.11)$$

Donde:

- Q Gasto recolectado por la coladera (m^3/s).
- C_o Coeficiente del vertedor (adimensional).
- P Perímetro de la rejilla sin tomar en cuenta el lado de la banqueteta (m).
- d Tirante hidráulico promedio sobre la coladera (m)

3.5. EPA SWMM

Para caracterizar una reja considerando la aproximación de la onda dinámica se utiliza un *link* adimensional llamado *outlet*. Este elemento permite la circulación del flujo en los dos sentidos y se caracteriza a través de una tabla carga hidráulica H (*head*) (en m) / flujo captado (*outflow*) (en m^3/s). Esta opción es la adecuada para estudiar el drenaje de una cuenca considerando de manera conjunta la capa superficial (o sea, las redes de drenaje superficial).

Después se deben de definir los valores que se introducen en el software, primero se dibuja la zona de estudio, empezando por las subcuencas, y después se introducen los siguientes valores:

- Área de cuenca
- Anchura característica
- Pendiente (%)
- Área impermeable (%)
- Coeficiente n de Manning para área impermeable
- Coeficiente n de Manning para área permeable
- Almacenamiento en depresión
- Longitud
- Infiltración
- Las coordenadas en “ x ” y “ y ”.

Los coeficientes “ n ” y el almacenamiento se obtienen de las **Tablas “5” y “6”**.

Superficie	n
Asfalto liso	0.011
Hormigón liso	0.012
Revestimiento de hormigón basto	0.013
Madera pulida	0.014
Ladrillo con mortero de cemento	0.014
Arcilla vitrificada	0.015
Fundición de hierro	0.015
Tuberías de metal corrugado	0.024
Superficie de escombrera	0.024
Terreno improductivo (libre de residuos)	0.05
Terreno cultivado	
Cubierta de residuos <20%	0.06
Cubierta de residuos >20%	0.17
Pasto natural	0.13
Hierba	
Corta, pradera	0.15
Densa	0.24
Hierba Bermuda	0.41
Bosque	
Con cubierta ligera de arbustos	0.40
Con cubierta densa de arbustos	0.80

Tabla 5. Coeficientes "n" de Manning

Fuente: Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0.

Superficie impermeable	1.25 - 2.5 mm
Césped y hierba	2.5 - 5 mm
Pastos y prados	5 mm
Lecho forestal	7.5 mm

Tabla 6. Valores de almacenamiento

Fuente: Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0.

Para determinar el ancho de la sub-cuenca, se utiliza la **Ecuación (3.12)**:

$$Anchura\ característica = \frac{\text{Área cuenca}}{\text{Longitud total}} \quad (3.12)$$

Para facilitar el dibujo de las sub-cuencas en la calle, se utiliza un mapa de fondo, SWMM tiene la característica de mostrar una imagen de fondo detrás del mapa, es

conveniente utilizar una imagen de la zona de estudio. Las áreas de cuenca son dibujadas como poligonos cerrados.

Despues se introduce un pluviómetro, para los datos de la lluvia, luego se definen los siguientes valores:

- Nombre del pluviómetro.
- Formato de la lluvia.
- Intervalo de tiempo.
- Origen de los datos.
- Coordenadas en “x” y “y”.
- El archivo de la lluvia

Para el cauce principal o arroyo por el que fluye el agua, se representó mediante un conducto irregular (*conduit*) con la forma de la calle, para la cual se tomaron valores representativos para así simular la sección transversal de la misma.

- Nombre
- Nudo inicial
- Nudo final
- Forma
- Longitud
- Rugosidad

La rugosidad del conducto se define en la **Tabla 7**.

Material del conducto	n
Canales revestidos	
De asfalto	0.013 - 0.017
De ladrillo	0.012 - 0.018
De hormigón	0.011 - 0.020
De escombros	0.020 - 0.035
De vegetación	0.03 - 0.04
Excavado o en zanja:	
En tierra, recto y uniforme	0.020 - 0.030
En tierra, con curvas o no uniforme	0.025 - 0.040
En roca	0.030 - 0.045
Sin mantenimiento	0.05 - 0.14
Canales o cauces naturales:	
Sección más o menos regular	0.03 - 0.07
Sección irregular con charcos	0.04 - 0.010

Tabla 7. Rugosidad de conductos

Fuente: Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0.

Para representar las intersecciones del cauce principal se utilizaron elementos de tipo conexión o nudos, que representan las calles que cruzan transversalmente el conducto, para estos se tuvieron que definir los siguientes valores:

- Nombre del nudo.
- Cota de fondo.
- Coordenadas en “x” y “y”.

Después se define la rejilla a través de un elemento de tipo outlet, y se introducen los siguientes valores

- El nudo de entrada
- El nudo de salida
- Cotas de entrada y salida
- Tabla de eficiencia de captación de una rejilla (En caso de ser tabular)
- Coeficientes A y B (En caso de ser Funcional)
- Depth: corresponde al tirante aguas arribas de la rejilla

- Head: corresponde a la diferencia de carga entre los extremos de la rejilla (la diferencia entre los niveles piezométricos en los nodos de los extremos)

La eficiencia hidráulica de la rejilla esta dada por la **Ecuación (3.13)**:

$$E = \frac{Q_{capt}}{Q_{calle}} \quad (3.13)$$

Donde:

Q_{capt} Gasto capturado por la rejilla (m³/s).

Q_{calle} Gasto de paso por la calle (m³/s).

En caso de que el ancho de la mitad de la calzada sea distinto a tres metros, la función de la eficiencia esta dada por la **Ecuación (3.14)** (Gómez y Russo, 2005):

$$E' = A \cdot \left(k \cdot \frac{Q_{calle}}{y} \right)^{-B} \quad (3.14)$$

Y el gasto capturado por la rejilla esta dado por la **Ecuación (3.15)**:

$$Q_{capt} = k \cdot Q_{calle} \cdot A \cdot \left[k \cdot \frac{Q_{calle}}{y} \right]^{-B} \quad (3.15)$$

Donde:

y Calado del flujo inmediatamente aguas arriba de la reja (mm).

k Coeficiente que depende de la configuración geométrica de la calle.

Q_{calle} Gasto de la calle.

A y B son coeficientes característicos de las rejas que se determinan a partir de las características geométricas de las rejas, **Ecuación (3.16)** y **Ecuación (3.17)**:

$$A = \frac{0.39}{A_g^{-0.35} \cdot p^{-0.13}} \cdot (n_t + 1)^{0.01} \cdot (n_l + 1)^{0.11} \cdot (n_d + 1)^{0.03} \quad (3.16)$$

$$(3.17)$$

$$B = 0.36 \cdot \frac{long}{anch}$$

Donde:

long Longitud de la reja (cm)

anch Ancho de la reja (cm).

A_g Área mínima que engloba a todos los huecos de la reja (cm²).

n_l Número de barras longitudinales de la reja

n_t Número de barras transversales de la reja

n_d Número de barras diagonales de la reja

p Coeficiente en tanto por ciento entre el área de huecos totales de la reja y A_g

$$p = 100 \cdot \frac{A_{Huecos}}{A_g} \quad (3.18)$$

El coeficiente k está dado en la **Tabla 8** de acuerdo al ancho de media calzada.

El gasto de la calle se determina a través de la **Ecuación (3.19)** de Izzard (Izzard, 1946) que modificó la de Manning hallando la siguiente formulación:

$$Q = \frac{C_f}{n \cdot I_x} \cdot y^{8/3} \cdot I_y^{1/2} \quad (3.19)$$

Donde:

n Coeficiente de rugosidad de Manning del material de la calzada

C_f 0.376 valor experimental deducido por Izzard

I_x Pendiente transversal de la calle

I_y Pendiente longitudinal de la calle

y Calado considerado junto al bordillo

En la salida o nudo final de descarga o desagüe se coloca el link llamado vertido para así simular el fin del circuito a libre descarga

- Nombre
- Coordenadas "X" y "Y"
- Cota de fondo
- Tipo o condición de descarga

Introducidos y definidos todos los parámetros, después de haber dibujado el esquema correspondiente se procede en realizar la simulación de la rejilla.

<i>Ancho de la mitad de la calzada $x = 3 m$</i>	
Para cada y	$k = 1$
<i>Ancho de la mitad de la calzada $x < 3 m$</i>	
$y \leq x \cdot I_x$	$k = 1$
$x \cdot I_x \leq y \leq 3 \cdot I_x$	$k = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot I_x}{y}\right)^2}$
$y \geq 3 \cdot I_x$	$k = \frac{1 - \left(1 - \frac{3 \cdot I_x}{y}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot I_x}{y}\right)^2}$
<i>Ancho de la mitad de la calzada $x > 3 m$</i>	
$y \leq 3 \cdot I_x$	$k = 1$
$3 \cdot I_x \leq y \leq x \cdot I_x$	$k = 1 - \left(1 - \frac{3 \cdot I_x}{y}\right)^2$
$y \geq x \cdot I_x$	$k = \frac{1 - \left(1 - \frac{3 \cdot I_x}{y}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot I_x}{y}\right)^2}$

Tabla 8. Valores del coeficiente k

Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aquí se presentan los resultados de ambos métodos de investigación (CONAGUA y HEC. No. 22) y el análisis mediante la simulación con EPA SWMM 5.0, los resultados comparativos entre ambos tipos de rejillas, la de perfil tipo I y la rejilla tipo Irving, para así llegar a las conclusiones y recomendaciones.

4.1. Zona de estudio

La cuenca que abarca el tramo de estudio está representada en la **Figura 18** La ubicación de la cuenca es en el centro de Ciudad Obregón, colindando al norte con la calle Allende, al sur con la calle 6 de abril, al oeste con la calle Jalisco y al este con la calle California.

En la **Tabla 9** se muestra la configuración de la calle, la primer columna muestra las calles que intersectan con la calle Guerrero, la segunda columna muestra las cotas que representan la altura, se muestra que avanzando las calles las cotas van disminuyendo, la tercer columna muestra los tramos de la calle Guerrero, empezando por la Jalisco hasta llegar a la calle California, y en la siguiente columna se muestra la longitud de cada uno de estos tramos, sustituyendo en la **Ecuación (3.1)** se obtiene la pendiente de la calle que es la última columna de la tabla, se realiza un promedio para la pendiente entre cada tramo:

$$S = \frac{C_i - C_f}{L} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

C_i Cota inicial (m).

C_f Cota final (m).

L Longitud (m).

Se presenta mucha variación en los tramos de la calle, siendo el valor más alto de 0.6642% en el tramo Zacatecas/Durango y siendo el más bajo de 0.0619%, se observa que la pendiente da un valor promedio a lo largo de la calle de 0.2264%.

Dentro de algunas características de la cuenca se observa que la longitud del cauce principal es de un total de 1619.401 m, al sumar las longitudes de cada uno de los tramos de la calle y el área total que abarca la cuenca es de 2304360.048 m² o 2.304 km².

Calle	Cota (m)	Tramo	Longitud (m)	Pendiente (%)
Jalisco	40.18	Jalisco / Miguel Alemán	135.14	0.2516%
Miguel Alemán	39.84	Miguel Alemán / Sinaloa	117.01	0.0769%
Sinaloa	39.75	Sinaloa / 5 de febrero	115.00	0.1478%
5 de Febrero	39.58	5 de Febrero / Sonora	110.48	0.1086%
Sonora	39.46	Sonora / Chihuahua	99.16	0.1412%
Chihuahua	39.32	Chihuahua / Veracruz	97.00	0.1134%
Veracruz	39.21	Veracruz / Puebla	97.00	0.2165%
Puebla	39.00	Puebla / Zacatecas	96.36	0.3944%
Zacatecas	38.62	Zacatecas / Durango	96.36	0.6642%
Durango	37.98	Durango / Coahuila	97.00	0.2165%
Coahuila	37.77	Coahuila / Colima	97.00	0.3505%
Colima	37.43	Colima / Tamaulipas	97.00	0.1443%
Tamaulipas	37.29	Tamaulipas / Tabasco	97.00	0.2680%
Tabasco	37.03	Tabasco / Tlaxcala	97.00	0.3299%
Tlaxcala	36.71	Tlaxcala / Nuevo León	97.00	0.0619%
Nuevo León	36.65	Nuevo León / California	73.00	0.3562%
California	36.39			

S media= 0.2264 %

Tabla 9. Configuración de la calle

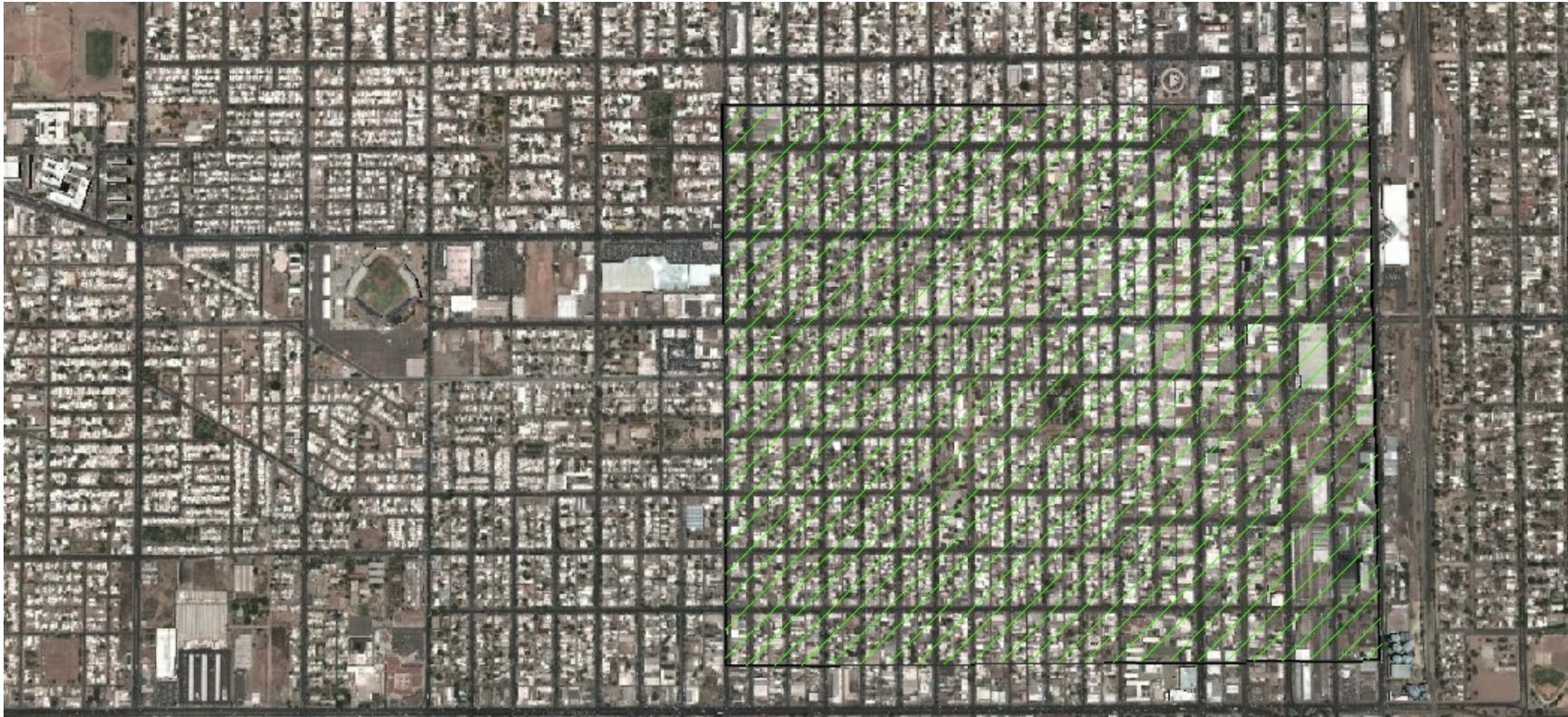


Figura 18. Cuenca

4.1.1. Tipos de rejilla

Para este estudio se toman las dimensiones actuales de longitud y ancho de la rejilla actual (perfil tipo I) en la calle Guerrero esquina con California, por lo que se simula otro tipo de rejilla (tipo Irving), en el lugar que se encuentra la rejilla existente.

- Rejilla con perfil I (Área de abertura=0.5101 m²), **figura 19**.
- Rejilla tipo Irving (Área de abertura= 1.064 m²), **figura 20**.

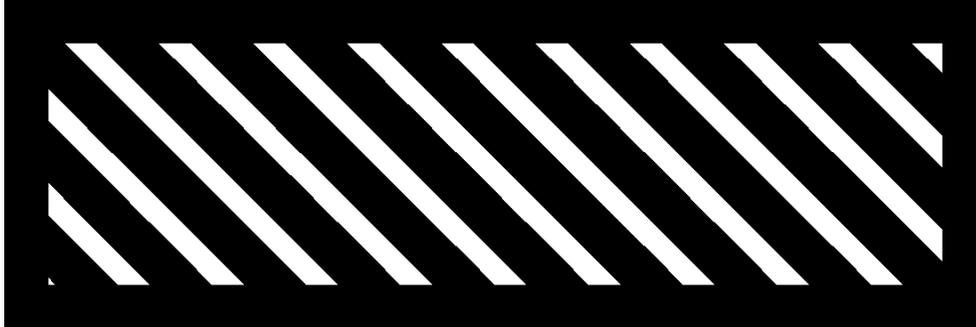


Figura 19. Rejilla de perfil I (rejilla *in situ*)

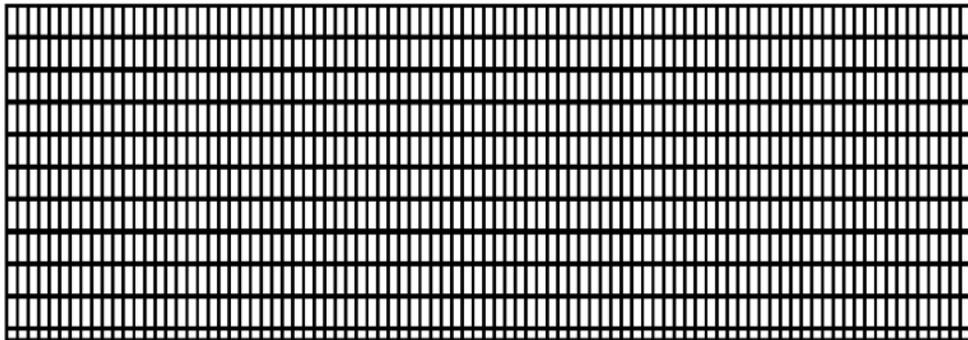


Figura 20. Rejilla tipo Irving (rejilla propuesta)

En la **Tabla 10** se muestran las características de las rejillas, en la primer columna se muestra el tipo de rejilla, en la siguiente columna se muestran los tramos que son abarcados a lo largo de la calle, la tercer columna muestra el área total de abertura que engloban los huecos que tienen la rejilla a lo largo de toda la calle, y en la última columna el área de la mitad de la calle.

Ancho de calle = 20.95 m			
Tipo de rejilla	Piezas de rejilla	Área total calle (m ²)	Área mitad de la calle (m ²)
Perfil I	9	4.5904	2.2952
Irving	9.5	9.0667	4.5333

Tabla 10. Áreas de rejilla para la calle

4.1.2. Sección de la calle

La sección transversal de la calle V. Guerrero aguas arriba de la rejilla se observa en la **figura 21**.

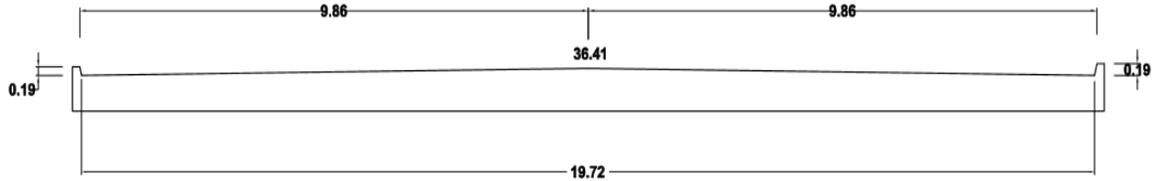


Figura 21. Sección transversal calle V. Guerrero

Características de la calle:

- Ancho: 19.72 m
- Perímetro mojado: 19.87 m

La sección transversal de la calle V. Guerrero donde se encuentra la rejilla se observa en la **figura 22**.

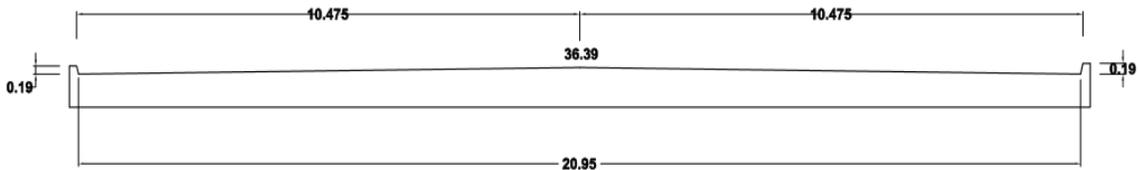


Figura 22. Sección transversal de la calle V. Guerrero de la rejilla

Características de la calle:

- Ancho: 20.95 m
- Perímetro mojado: 21.18 m

4.2. Intensidad de lluvia

Para estimar el tiempo de concentración (t_{cs}) a través de la superficie, se sustituye en la **Ecuación (3.5)**:

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (3.5)$$

Donde:

t_{cs} Tiempo de concentración sobre la superficie (h).

L Longitud del cauce principal (m).

S Pendiente media del cauce principal (decimal).

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{1619.401 \text{ m}}{\sqrt{0.002264 \text{ m/m}}} \right)^{0.77}$$

$$t_{cs} = 1.0018 \text{ hrs} \rightarrow 60.109 \text{ min}$$

Para que el agua se concentre en el sitio donde se encuentra la rejilla de boca-tormenta a lo largo de la cuenca, toma un tiempo de 60.109 min.

Para la intensidad de la lluvia se necesita obtener el tiempo de concentración (d) sustituyendo en la **Ecuación (3.4)**:

$$d = t_{cs} + 15 \text{ min} \tag{3.4}$$

Donde:

d Tiempo de concentración.

t_{cs} Tiempo de concentración sobre la superficie.

$$d = 60.109 \text{ min} + 15 \text{ min}$$

$$d = 75.109 \text{ min}$$

Los 15 min se agregan para compensar el tiempo que toma al agua de lluvia trasladarse de las edificaciones a la calle.

La intensidad de lluvia, en mm/hr, se determina sustituyendo en la **Ecuación (3.3)**:

$$i = \frac{12.05 Tr^{0.95}}{d^{0.52}} \tag{3.3}$$

Donde:

d Tiempo de concentración.

T_r Periodo de retorno.

Para este proyecto se utiliza un periodo de retorno de 5 años, obtenidos en la **Tabla 6**, sustituyendo éste y la duración, se obtiene la intensidad de lluvia:

$$i = \frac{12.05 (5 \text{ años})^{0.95}}{(75.109 \text{ min})^{0.52}}$$

$$i = 5.8836 \frac{mm}{hr} \rightarrow 1.634 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$$

4.3. Gasto de la calle

Para determinar el gasto de la calle se sustituye en la **Ecuación (3.2)**:

$$Q_o = 0.275 \times A \times i \times C \quad (3.2)$$

Donde:

Q_o Gasto de la calle (m^3/s).

A Área (km^2).

i Intensidad de la lluvia (mm/hr).

C Coeficiente de escurrimiento de lluvia.

$$Q_o = \frac{0.275 \times 2.304 \text{ km}^2 \times 5.8836 \frac{mm}{hr} \times 0.75}{2}$$

$$Q_o = 1.3979 \frac{m^3}{s}$$

El gasto de la calle es dividido en dos por el bombeo que divide la sección de la calle en dos.

4.4. Método CONAGUA

Para analizar la capacidad de gasto captado de la coladera, se sustituye en la **Ecuación (3.6)**:

$$Q = 1000 \times C_d \times A \times \sqrt{2gb} \quad (3.6)$$

Donde:

- Q Gasto de la coladera (m^3/s)
- A Área (m^2)
- g Aceleración de la gravedad (m/s^2)
- C_d Coeficiente de descarga
- b Tirante de agua sobre la coladera (m)

El tirante de agua se determina analizando la fórmula de Izzard.

4.4.1. Formula de Izzard

Para determinar el tirante hidráulico de la calle sobre la coladera se sustituye en la **Ecuación (3.8)**.

$$y_o = \left(\frac{Q_o}{0.375 \sqrt{I} \left(\frac{z}{n} \right)} \right)^{\frac{3}{8}} \quad (3.8)$$

Donde:

- Q_o Gasto de la calle (m^3/s)
- I Pendiente longitudinal de la calle (m/m)
- z Inverso de la pendiente transversal
- n Coeficiente de rugosidad (Manning)
- y_o Tirante hidráulico (m)

$$y_o = \left(\frac{1.3979 \frac{m^3}{s}}{0.375 \sqrt{0.002264} \left(\frac{50}{0.016} \right)} \right)^{\frac{3}{8}}$$

$$y_o = 0.2519 \text{ mts}$$

Entonces se sustituye en la **Ecuación (3.6)**, el área de abertura para la mitad de la calle y el tirante hidráulico obtenido de cada una de las rejillas, para obtener el gasto de captación:

Rejilla con Perfil tipo I

$$Q = 1000 \times 0.6 \times 2.2952 \text{ m}^2 \times \sqrt{2 \left(9.806 \frac{m}{s^2} \right) (0.2519 \text{ m})}$$

$$Q = 3060.88 \text{ Lts/seg} \rightarrow 3.061 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Rejilla tipo Irving

$$Q = 1000 \times 0.6 \times 4.5333 \text{ m}^2 \times \sqrt{2 \left(9.806 \frac{m}{s^2} \right) (0.2519 \text{ m})}$$

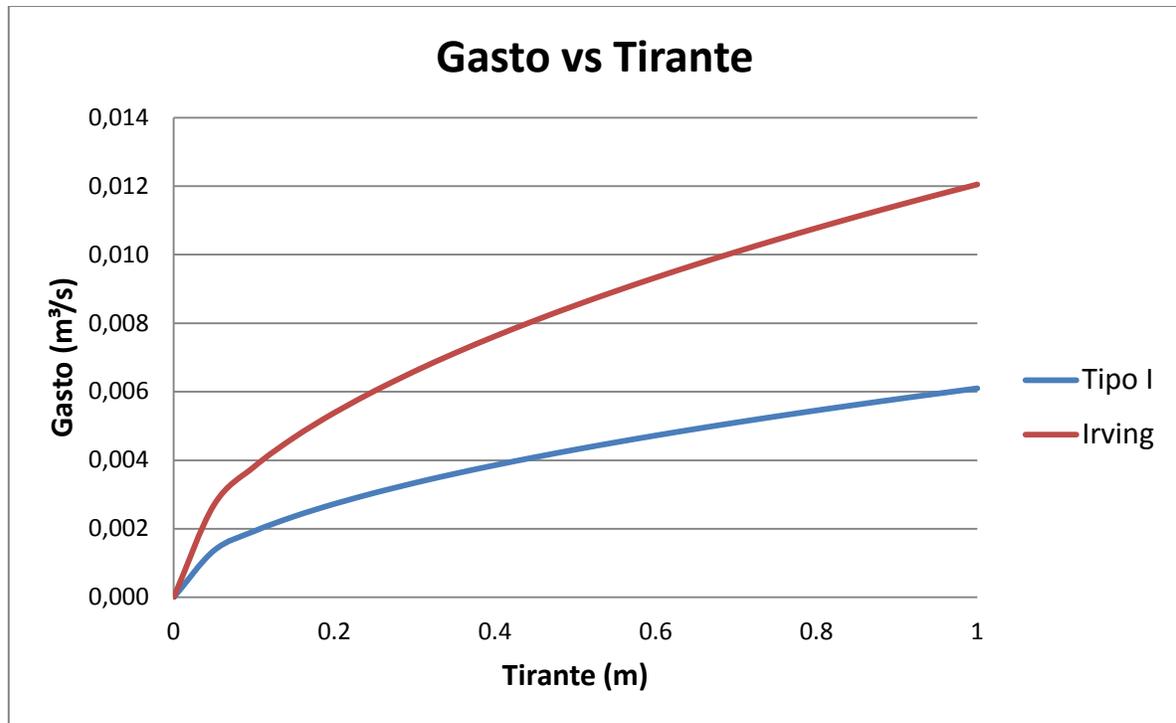
$$Q = 6045.62 \text{ Lts/seg} \rightarrow 6.046 \text{ m}^3/\text{seg}$$

En la **Tabla 11** se muestra una comparación de la simulación de ambas rejillas a diferentes tirantes por el método de CONAGUA, aumentando y observando el comportamiento hidráulico de éstas a diferente altura.

Se observa que el gasto capturado por la rejilla con perfil tipo I, es de 50.61% el gasto de la rejilla tipo Irving, teniendo ésta poco menos del doble de capacidad que la rejilla de perfil tipo I, la **Gráfica 1** muestra el gráfico que representa la comparación de ambos gastos.

Método de CONAGUA		
Tirante (m)	Perfil tipo I	Irving
	Gasto captado (m³/s)	Gasto captado (m³/s)
0.000	0.000	0.000
0.050	1.364	2.694
0.100	1.928	3.811
0.150	2.362	4.667
0.200	2.727	5.389
0.250	3.049	6.025
0.2519	3.061	6.048
0.300	3.340	6.600
0.350	3.608	7.129
0.400	3.857	7.621
0.450	4.091	8.083
0.500	4.312	8.521
0.550	4.522	8.937
0.600	4.724	9.334
0.650	4.916	9.715
0.700	5.102	10.082
0.750	5.281	10.436
0.800	5.454	10.778
0.850	5.622	11.110
0.900	5.785	11.432
0.950	5.944	11.745
1.000	6.098	12.050

Tabla 11. Comparación de rejillas del gasto captado (método CONAGUA)



Grafica 1. Gasto vs tirante (método CONAGUA)

4.5. Método de la Circular de Ingeniería Hidráulica (HEC) #22

Mediante este método se analiza el funcionamiento de la coladera ya sea que funciona como vertedor u orificio, comparando el tirante y la **Ecuación (3.9)** se determina su comportamiento.

$$h \leftrightarrow 1.6 \times \frac{A_g}{L + W} \quad (3.9)$$

Considerar el sumidero como un vertedor:

$$h < 1.6 \times \frac{A_g}{L + W}$$

Considerar el sumidero como un orificio:

$$h \geq 1.6 \times \frac{A_g}{L + W}$$

Donde:

h Tirante de agua sobre la coladera o sumidero (m)

L Longitud de la coladera o sumidero (m)

W Ancho de la coladera o sumidero (m)

A_g Área de abertura de la coladera o sumidero (m^2)

Utilizando las rejillas de perfil I en las bocas de tormenta se determina el modo de funcionamiento de ella al sustituir en la **Ecuación (3.9)**:

$$0.2519 \text{ m} \leftrightarrow 1.6 \times \frac{2.2952 \text{ m}^2}{10.475 \text{ m} + 0.76 \text{ m}}$$

$$0.2519 \text{ m} < 0.326 \text{ mts}$$

Utilizando las rejillas de tipo Irving en las bocas de tormenta se determina el modo de funcionamiento de ella al sustituir en la **Ecuación (3.9)**:

$$0.2519 \text{ m} \leftrightarrow 1.6 \times \frac{4.5333 \text{ m}^2}{10.475 \text{ m} + 0.86 \text{ m}}$$

$$0.2519 \text{ m} < 0.64 \text{ m}$$

Utilizando el tirante hidráulico de la calle, ambos tipos de rejilla se considera que trabajan como un vertedor, por lo que se determina el gasto sustituyendo en la **Ecuación (3.11)**:

$$Q = C_w \times P \times d^{1.5}$$

Donde:

Q Gasto recolectado por la coladera (m^3/s).

C_o Coeficiente del vertedor (adimensional) = 1.66.

P Perímetro de la rejilla sin tomar en cuenta el lado de la banquetta (m).

d Tirante hidráulico promedio sobre la coladera (m)

$$Q = 1.66 \times 10.475 \text{ m} \times 0.2519^{1.5}$$

$$Q = 2.1984 \text{ m}^3/\text{seg}$$

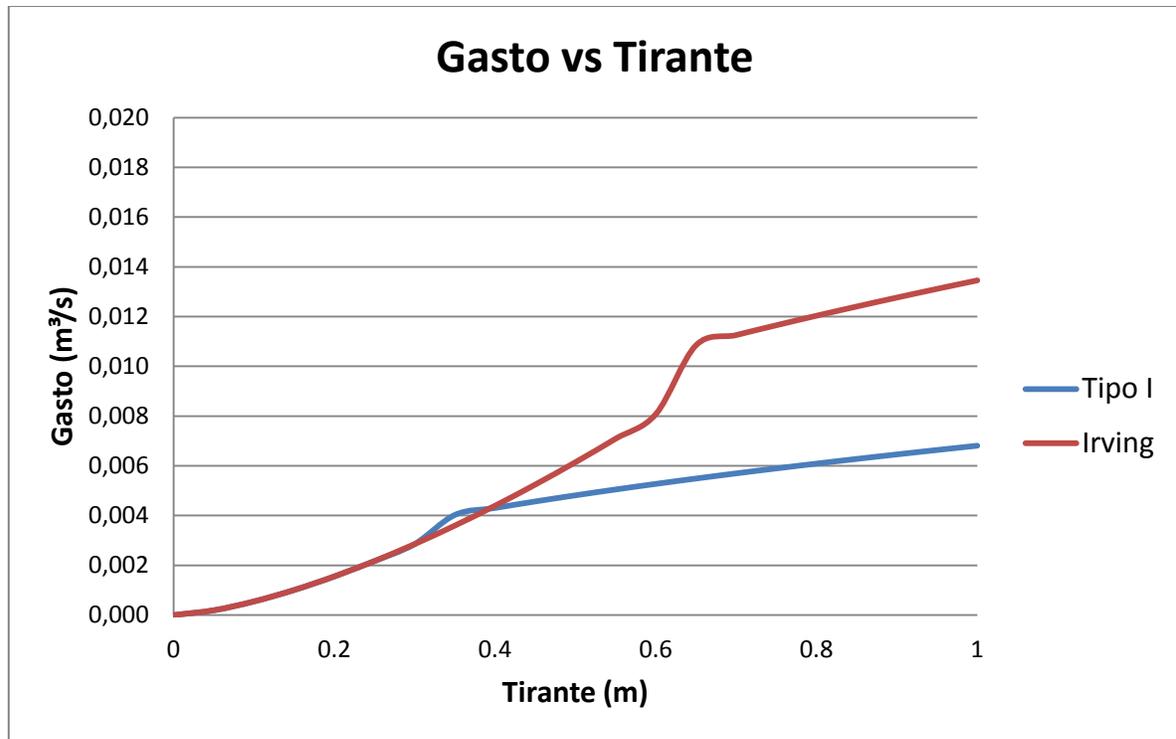
En la **Tabla 12** se muestra una comparativa de la simulación de ambas rejillas a diferentes tirantes mediante el método expuesto por la Circular de Ingeniería

Hidráulica (*HEC*) No. 22, aumentando y observando el comportamiento hidráulico de éstas a diferente altura.

Mediante este método se observa que ambas rejillas funcionan como vertedor con el tirante hidráulico obtenido con un gasto de 2.198 m³/s, con el comportamiento de las rejillas se puede ver que si se tuvieran tirantes con valores entre 35 a 60 cm, el comportamiento hidráulico de la rejilla con perfil tipo I es de un orificio y la rejilla tipo Irving sigue funcionando como un vertedor, pero de los 65 cm en adelante ambas funcionan como orificio. La **gráfica 2** muestra el gráfico que representa la comparación del comportamiento hidráulico de ambas rejillas.

Método de la Circular de Ingeniería Hidráulica (<i>HEC</i>) No. 22				
Tirante (m)	Perfil tipo I		Irving	
	Funcionamiento	Gasto (m³/s)	Funcionamiento	Gasto (m³/s)
0.000	Vertedor	0.000	Vertedor	0.000
0.050	Vertedor	0.194	Vertedor	0.194
0.100	Vertedor	0.550	Vertedor	0.550
0.150	Vertedor	1.010	Vertedor	1.010
0.200	Vertedor	1.555	Vertedor	1.555
0.250	Vertedor	2.174	Vertedor	2.174
0.2519	Vertedor	2.198	Vertedor	2.198
0.300	Vertedor	2.857	Vertedor	2.857
0.350	Orificio	4.029	Vertedor	3.601
0.400	Orificio	4.307	Vertedor	4.399
0.450	Orificio	4.568	Vertedor	5.249
0.500	Orificio	4.815	Vertedor	6.148
0.550	Orificio	5.050	Vertedor	7.093
0.600	Orificio	5.275	Vertedor	8.081
0.650	Orificio	5.490	Orificio	10.849
0.700	Orificio	5.697	Orificio	11.258
0.750	Orificio	5.897	Orificio	11.653
0.800	Orificio	6.091	Orificio	12.035
0.850	Orificio	6.278	Orificio	12.406
0.900	Orificio	6.460	Orificio	12.765
0.950	Orificio	6.637	Orificio	13.115
1.000	Orificio	6.810	Orificio	13.456

Tabla 12. Comparación de rejillas del gasto captado (método *HEC* No. 22)



Grafica 2. Gasto vs tirante (método HEC No. 22)

4.6. EPA SWMM

Al dibujar la cuenca se definen las características ingresadas al programa, los datos de la cuenca están dados en la **Tabla 13**.

Los coeficientes n de permeabilidad e impermeabilidad se determinaron de la **tabla 8** y los de almacenamiento en depresión permeable e impermeable de la **tabla 9**, el área impermeable sin almacenamiento en depresión es determinada a criterio por el usuario.

El flujo de entre sub-áreas es de manera *Outlet* ya que todas las cuencas aportan a la misma descarga, aún en este caso de solo tener una cuenca y se utiliza el modo de infiltración *Horton* ya que se propone una infiltración que decrece exponencialmente.

Área (Ha)	230.436
Anchura Característica (m)	1423
Pendiente (%)	0.234
Área Impermeable (%)	25
Coefficiente n (Impermeable)	0.011
Coefficiente n (Permeable)	0.012
Almacenamiento en Depresión (Impermeable)	0.025
Almacenamiento en Depresión (Permeable)	0.012
(%) Área Impermeable Sin Almacenamiento en Depresión	15
Flujo entre sub áreas	Outlet
Infiltración	Horton
Longitud del cauce (m)	1619.401

Tabla 13. Características de la cuenca

La pendiente fue obtenida de la **tabla 12** utilizando la **ecuación (3.1)** para determinar la pendiente de cada tramo y así obtener un promedio de ellas.

$$S = \frac{C_i - C_f}{L} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

C_i Cota inicial (m)

C_f Cota final (m)

L Longitud (m)

Sustituyendo en la **Ecuación (3.12)** se determinan la anchura de la cuenca especificada en las características de ingresadas en el programa.

$$\text{Anchura característica} = \frac{\text{Área cuenca}}{\text{Longitud total}} \quad (3.12)$$

$$\text{Anchura característica} = \frac{2304360 \text{ m}^2}{1619.401 \text{ m}}$$

$$\text{Anchura característica} = 1422.97 \text{ m}$$

Al ingresar el pluviómetro se especifican sus características como formato de lluvia *cumulative* ya que la precipitación se acumula desde el inicio de la lluvia, además de los orígenes de datos como lo es *timeseries* con intervalos de lluvia a cada 00:05 minutos, se muestra en la **Tabla 14**. La curva i-d-Tr con periodo de retorno de 5 años para la presa Oviáchic se observa en **Anexo I**.

Nombre	Lluvia
Formato de lluvia	Cumulative
Intervalo de lluvia	0:05
Origen de datos	Time series
Nombre de la Serie	Oviáchic
Unidades de lluvia	mm

Tabla 14. Características de la lluvia

Se crean nodos o conexiones en cada intersección de calle desde la calle Jalisco hasta la calle california a los cuales se les ingresan la cota correspondiente al nivel de pavimento. En la **Tabla 18** se muestran el nombre del nodo, la calle que simboliza y la cota de cruce con la calle V. Guerrero.

Nombre	Calle	Cota (m)
N-1	Jalisco	40.18
N-2	Miguel Alemán	39.84
N-3	Sinaloa	39.75
N-4	5 de Febrero	39.58
N-5	Sonora	39.46
N-6	Chihuahua	39.32
N-7	Veracruz	39.21
N-8	Puebla	39.00
N-9	Zacatecas	38.62
N-10	Durango	37.98
N-11	Coahuila	37.77
N-12	Colima	37.43
N-13	Tamaulipas	37.29
N-14	Tabasco	37.03
N-15	Tlaxcala	36.71
N-16	Nuevo León	36.65
N-17	California	36.39

Tabla 15. Características de la calle (1)

Para representar los tramos de calle se utiliza la herramienta *conduit*, se define como un conducto de forma irregular para así poder simular las características geométricas de la calle, mostrada en la **figura 23**, el perfil transversal de la calle. En la **tabla 19** se muestran las características de cada tramo de calle entre los nodos, mostrando primero el nombre de cada tramo, su tipo, el tramo, la longitud de cada uno de estos, la pendiente, y el nodo inicial y final de cada uno. Se muestra el perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca o calle (V. Guerrero) en la **figura 24**, con todas sus intersecciones desde la calle Jalisco hasta California.

Nombre	Tipo	Tramo	Longitud (m)	Pendiente (%)	Nodo Inicial	Nodo final
L-1	CONDUIT	Jalisco-Miguel Alemán	135.14	0.2516%	N-1	N-2
L-2	CONDUIT	Miguel Alemán-Sinaloa	117.01	0.0769%	N-2	N-3
L-3	CONDUIT	Sinaloa-5 de Febrero	115.00	0.1478%	N-3	N-4
L-4	CONDUIT	5 de Febrero - Sonora	110.48	0.1086%	N-4	N-5
L-5	CONDUIT	Sonora-Chihuahua	99.16	0.1412%	N-5	N-6
L-6	CONDUIT	Chihuahua-Veracruz	97.00	0.1134%	N-6	N-7
L-7	CONDUIT	Veracruz-Puebla	97.00	0.2165%	N-7	N-8
L-8	CONDUIT	Puebla-Zacatecas	96.36	0.3944%	N-8	N-9
L-9	CONDUIT	Zacatecas-Durango	96.36	0.6642%	N-9	N-10
L-10	CONDUIT	Durango-Coahuila	97.00	0.2165%	N-10	N-11
L-11	CONDUIT	Coahuila-Colima	97.00	0.3505%	N-11	N-12
L-12	CONDUIT	Colima-Tamaulipas	97.00	0.1443%	N-12	N-13
L-13	CONDUIT	Tamaulipas-Tabasco	97.00	0.2680%	N-13	N-14
L-14	CONDUIT	Tabasco-Tlaxcala	97.00	0.3299%	N-14	N-15
L-15	CONDUIT	Tlaxcala-Nuevo León	97.00	0.0619%	N-15	N-16
L-16	CONDUIT	Nuevo León-California	73.00	0.3562%	N-16	N-17

Tabla 16. Características de la calle (2)

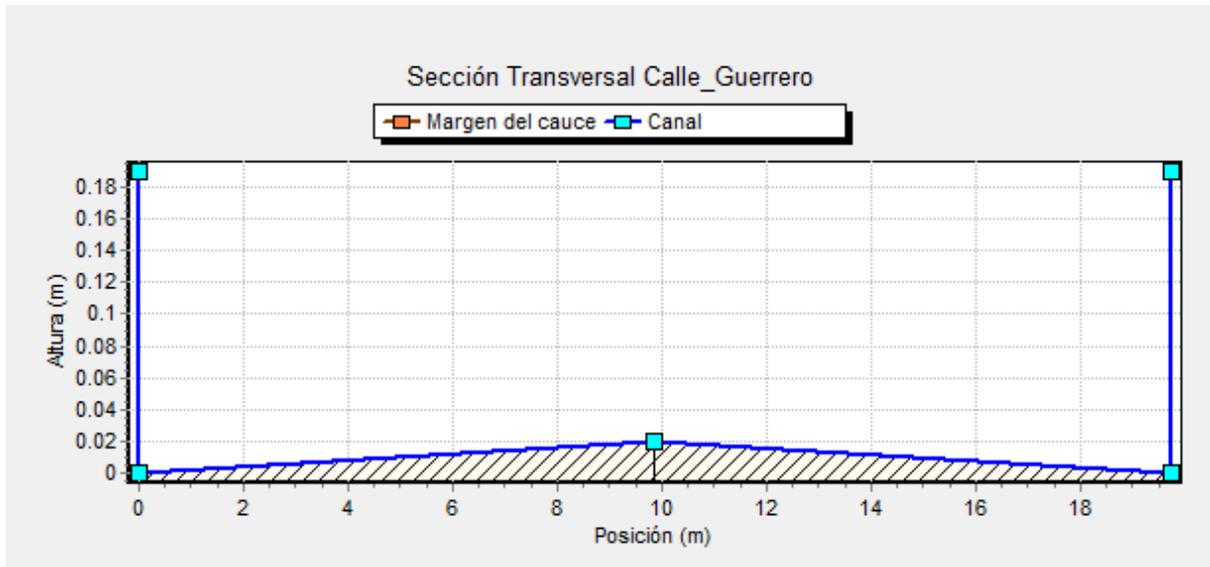
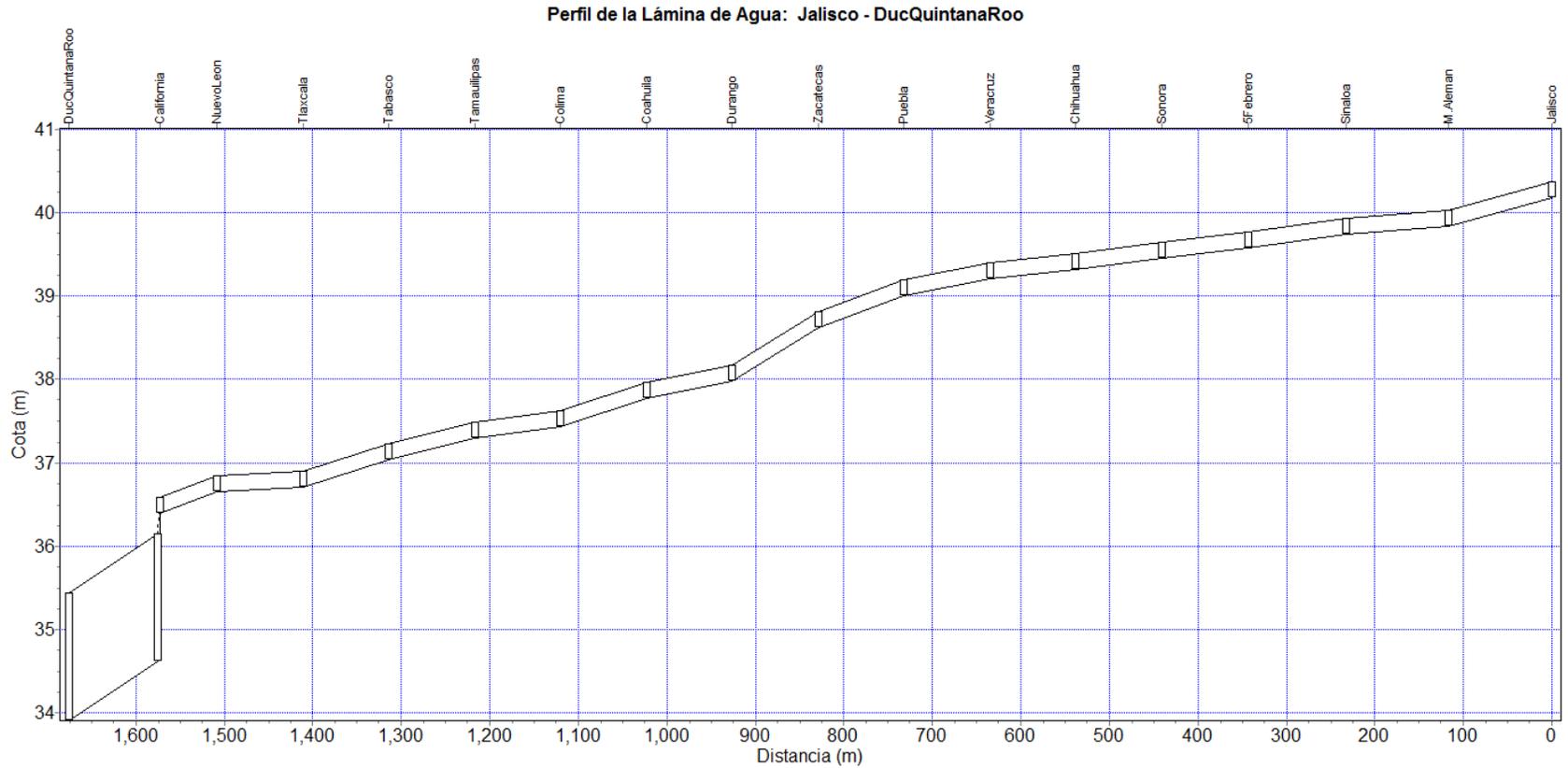


Figura 23. Perfil transversal de la calle



12/21/2012 00:05:00

Figura 24. Sección longitudinal de la calle

Para la simulación de la rejilla mediante el método funcional se determinan los coeficientes A y B de ambas rejillas al sustituir en las **Ecuaciones (3.16) y (3.17)**:

$$A = \frac{0.39}{A_g^{-0.35} \cdot p^{-0.13}} \cdot (n_t + 1)^{0.01} \cdot (n_l + 1)^{0.11} \cdot (n_d + 1)^{0.03} \quad (3.16)$$

Donde:

long Longitud de la reja (cm)

anch Ancho de la reja (cm).

A_g Área mínima que engloba a todos los huecos de la reja (cm²).

n_l Número de barras longitudinales de la reja

n_t Número de barras transversales de la reja

n_d Número de barras diagonales de la reja

p Coeficiente en tanto por ciento entre el área de huecos totales de la reja y A_g

$$B = 0.36 \cdot \frac{long}{anch} \quad (3.17)$$

Donde:

long Longitud de la reja (cm)

anch Ancho de la reja (cm).

Además se sustituye en la **Ecuación (3.18)** para determinar el porcentaje de área de huecos.

$$p = 100 \cdot \frac{A_{Huecos}}{A_g} \quad (3.18)$$

Donde:

p Coeficiente en tanto por cierto entre el área de huecos totales de la reja y A_g

A_{Huecos} Área de abertura de los huecos (cm²).

A_g Área mínima que engloba a todos los huecos de la reja (cm²).

Se sustituye en las **ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.18**, con las características geométricas de la rejilla, primero de perfil tipo I (**Tabla 17**) y después de la rejilla tipo Irving (**Tabla 18**).

Rejilla perfil I	
Longitud	220 cm
Ancho	76 cm
Área abertura	7915.22 cm ²
ag	12164.44 cm ²
Nl	0
Nt	0
Nd	8

Tabla 17. Características geométricas de la rejilla de perfil I

$$p = 100 \cdot \frac{7915.22 \text{ cm}^2}{12164.44 \text{ cm}^2}$$

$$p = 65.069 \%$$

$$A = \frac{0.39}{(12164.44 \text{ cm}^2)^{-0.35} \times (65.069)^{-0.13}} \cdot (0 + 1)^{0.01} \cdot (0 + 1)^{0.11} \cdot (8 + 1)^{0.03}$$

$$A = 19.28$$

$$B = 0.36 \times \frac{220 \text{ cm}}{76 \text{ cm}}$$

$$B = 1.04$$

Rejilla tipo Irving	
Longitud	220 cm
Ancho	76 cm
Área abertura	10640 cm ²
ag	16366 cm ²
Nl	11
Nt	91
Nd	0

Tabla 18. Características geométricas de la rejilla Irving

$$p = 100 \cdot \frac{10640 \text{ cm}^2}{16366 \text{ cm}^2}$$

$$p = 65.01 \%$$

$$A = \frac{0.39}{(16366 \text{ cm}^2)^{-0.35} x (65.01)^{-0.13}} \cdot (91 + 1)^{0.01} \cdot (11 + 1)^{0.11} \cdot (0 + 1)^{0.03}$$

$$A = 27.54$$

$$B = 0.36 x \frac{220 \text{ cm}}{76 \text{ cm}}$$

$$B = 1.04$$

Para la simulación de la rejilla mediante el método tabular se define el coeficiente k respecto a las características de la calle tomando en cuenta las limitaciones determinadas en la **Tabla 11**.

Donde:

x Ancho de la mitad de la calzada (m)

Ix Pendiente transversal de la calle

k Coeficiente K

y Tirante hidráulico

$$x = 20.95 \text{ m} > 3 \text{ m}$$

$$x \cdot Ix = 20.95 \text{ m} x 0.02 = 0.419$$

$$3 \cdot Ix = 3 x 0.02 = 0.06$$

Entra en la segunda condición, por lo tanto el valor de k fue igual a:

$$3 \cdot Ix < y < x \cdot Ix$$

$$0.06 < 0.2512 < 0.419$$

$$\therefore k = 1 - \left(1 - \frac{3 x 0.02}{0.2512}\right)^2$$

$$k = 0.4206$$

Se realiza la tabla de cálculo para la caracterización hidráulica, sustituyendo en la **ecuación (3.19)** para determinar el gasto de la calle, la eficiencia con la **ecuación (3.13)**, el gasto captado con la **ecuación (3.15)** y realizando una división entre el

gasto de la calle y el tirante hidráulico, mostrándose los resultados de la rejilla de perfil I en la **tabla 20** y en la **tabla 21** los valores de la rejilla tipo Irving.

$$E = \frac{Q_{capt}}{Q_{calle}} \quad (3.13)$$

Donde:

Q_{capt} Gasto capturado por la rejilla (m³/s).

Q_{calle} Gasto de paso por la calle (m³/s).

$$Q_{capt} = k \cdot Q_{calle} \cdot A \cdot \left[k \cdot \frac{Q_{calle}}{y} \right]^{-B} \quad (3.15)$$

Donde:

y Calado del flujo inmediatamente aguas arriba de la reja (mm).

k Coeficiente que depende de la configuración geométrica de la calle.

Q_{calle} Gasto de la calle.

$$Q = \frac{C_f}{n \cdot I_x} \cdot y^{8/3} \cdot I_y^{1/2} \quad (3.19)$$

Donde:

n Coeficiente de rugosidad de Manning del material de la calzada

C_f 0.376 valor experimental deducido por Izzard

I_x Pendiente transversal de la calle (m)

I_y Pendiente longitudinal de la calle (m)

y Calado considerado junto al bordillo (m)

Se determina que entre las **tabla 20** y **tabla 21** se observa un tirante propuesto para así determinar el gasto de calle, la eficiencia de la rejilla y el gasto captado por ella, además de una división entre el gasto de calle sobre el tirante propuesto.

Se observa que ambas rejillas cuentan con la suficiente capacidad para desalojar el gasto de la calle, aunque la rejilla Irving tiene una mayor eficiencia así como una mayor captación en comparación con la rejilla de perfil I.

y (mm)	Q calle (LPS)	Eficiencia	Q cap. (LPS)	Q calle/y (LPS)
10	0.2595	152.545	232.017	0.03
20	1.6477	45.767	442.004	0.08
30	4.8581	22.631	644.406	0.16
40	10.4625	13.731	842.036	0.26
50	18.9698	9.320	1036.192	0.38
60	30.8470	6.790	1227.623	0.51
70	46.5305	5.195	1416.817	0.66
80	66.4328	4.120	1604.117	0.83
90	90.9472	3.358	1789.777	1.01
100	120.4507	2.796	1973.991	1.20
110	155.3066	2.370	2156.916	1.41
120	195.8662	2.037	2338.675	1.63
130	242.4702	1.773	2519.374	1.87
140	295.4501	1.559	2699.098	2.11
150	355.1290	1.383	2877.924	2.37
160	421.8221	1.236	3055.913	2.64
170	495.8381	1.113	3233.124	2.92
180	577.4789	1.007	3409.604	3.21
190	667.0407	0.917	3585.397	3.51
200	764.8144	0.839	3760.541	3.82
210	871.0857	0.771	3935.072	4.15
220	986.1354	0.711	4109.020	4.48
230	1110.2403	0.658	4282.415	4.83
240	1243.6726	0.611	4455.280	5.18
250	1386.7008	0.569	4627.641	5.55
260	1539.5897	0.532	4799.519	5.92
270	1702.6006	0.498	4970.933	6.31
280	1875.9913	0.468	5141.902	6.70
290	2060.0167	0.440	5312.443	7.10
300	2254.9284	0.415	5482.572	7.52
310	2460.9753	0.392	5652.303	7.94
320	2678.4036	0.371	5821.651	8.37
330	2907.4567	0.352	5990.627	8.81
340	3148.3755	0.334	6159.244	9.26
350	3401.3986	0.317	6327.514	9.72
360	3666.7622	0.302	6495.446	10.19
370	3944.7003	0.288	6663.052	10.66
380	4235.4446	0.275	6830.340	11.15

Tabla 19. Tabla de caracterización hidráulica de rejilla (perfil I)

y (mm)	Q calle (LPS)	Eficiencia	Q cap. (LPS)	Q calle/y (LPS)
10	0.2595	236.90	332.561	0.03
20	1.6477	71.08	633.544	0.08
30	4.8581	35.15	923.657	0.16
40	10.4625	21.32	1206.930	0.26
50	18.9698	14.47	1485.222	0.38
60	30.8470	10.54	1759.608	0.51
70	46.5305	8.07	2030.789	0.66
80	66.4328	6.40	2299.255	0.83
90	90.9472	5.21	2565.370	1.01
100	120.4507	4.34	2829.413	1.20
110	155.3066	3.68	3091.607	1.41
120	195.8662	3.16	3352.132	1.63
130	242.4702	2.75	3611.135	1.87
140	295.4501	2.42	3868.743	2.11
150	355.1290	2.15	4125.061	2.37
160	421.8221	1.92	4380.182	2.64
170	495.8381	1.73	4634.186	2.92
180	577.4789	1.56	4887.143	3.21
190	667.0407	1.42	5139.115	3.51
200	764.8144	1.30	5390.158	3.82
210	871.0857	1.20	5640.321	4.15
220	986.1354	1.10	5889.649	4.48
230	1110.2403	1.02	6138.183	4.83
240	1243.6726	0.95	6385.959	5.18
250	1386.7008	0.88	6633.012	5.55
260	1539.5897	0.83	6879.372	5.92
270	1702.6006	0.77	7125.068	6.31
280	1875.9913	0.73	7370.126	6.70
290	2060.0167	0.68	7614.571	7.10
300	2254.9284	0.64	7858.424	7.52
310	2460.9753	0.61	8101.708	7.94
320	2678.4036	0.58	8344.441	8.37
330	2907.4567	0.55	8586.643	8.81
340	3148.3755	0.52	8828.330	9.26
350	3401.3986	0.49	9069.519	9.72
360	3666.7622	0.47	9310.224	10.19
370	3944.7003	0.45	9550.461	10.66
380	4235.4446	0.43	9790.242	11.15

Tabla 20. Tabla de caracterización hidráulica de rejilla (tipo Irving)

En la **Tabla 23** se muestran los resultados de los diferentes tipos de simulaciones de la rejilla, ya sea funcional como tabular, además de la simulación de la rejilla con comportamiento de vertedor y se observa cómo el gasto de captación es igual en las simulaciones realizadas con un elemento *outlet* tanto funcional como tabular y una variación de 0.395 m³/s en el gasto del vertedor.

Al interpretar los resultados de las distintas simulaciones podemos determinar que ambas rejillas son aptas para captar el gasto de la calle con una eficiencia aceptable, por lo que al estudiar su funcionamiento se determina que la rejilla Irving es mejor ya que tiene una mayor velocidad de captación y genera menor acumulación en su superficie y por lo tanto un menor tirante hidráulico, la línea que separa el tiempo de 1:55 a 22:50, es para simplificar la tabla ya que al tiempo de 1:45, se muestra el gasto máximo durante la simulación y después va descendiendo de forma casi constante.

En la **figura 25** se muestra el perfil longitudinal de la calle mostrando el comportamiento del cauce máximo que corre por la calle. En la **gráfica 3** se determina la curva de gasto contra tirante de los resultados obtenidos de las simulaciones, observándose así el comportamiento de las rejillas y del vertedor, interpretando que la rejilla de perfil tipo I tiene mayores tirantes que la rejilla Irving considerando el mismo gasto captado, pero la Irving presenta menor acumulación del área en el sitio, al igual que el vertedor satisface con la captación del gasto de la calle, pero presenta tirantes mayores que las dos rejillas, por los dos tipo de simulación. En la **gráfica 4** se muestra la curva de tirante contra tiempo y se puede observar como la rejilla tipo Irving genera menor tirante durante el tiempo que transcurre durante la simulación, que la rejilla con perfil tipo I y el vertedor, esto porque se considera que la rejilla tipo Irving tienen una mayor velocidad para captar el agua, que si funcionase con rejilla de perfil tipo I o ya sea como un vertedor.

Para la simulación de vertedor se utilizó la herramienta *weir* a la cual se le agregaron las características especificadas en la **tabla 21**.

Tipo	Transversal
Altura	0.19
Longitud	20.95
Pendiente lateral	0
Altura de cresta	0.19
Coefficiente de descarga	1.50

Tabla 21. Características del vertedor

Se caracteriza como tipo transversal ya que se asimila como un vertedor rectangular, con un altura de 0.19 m representado el bordillo de la calle o guarnición, una longitud del ancho de calle, sin pendiente lateral, con altura de cresta correspondiente a la altura y un coeficiente de descarga obtenido de la **tabla 22**.

Coeficiente de descarga	
Vertedor transversal de pared delgada	1.84
Vertedor transversal de pared gruesa	1.38 - 1.83
Vertedor triangular	1.35 - 1.55

Tabla 22. Coeficiente de descarga

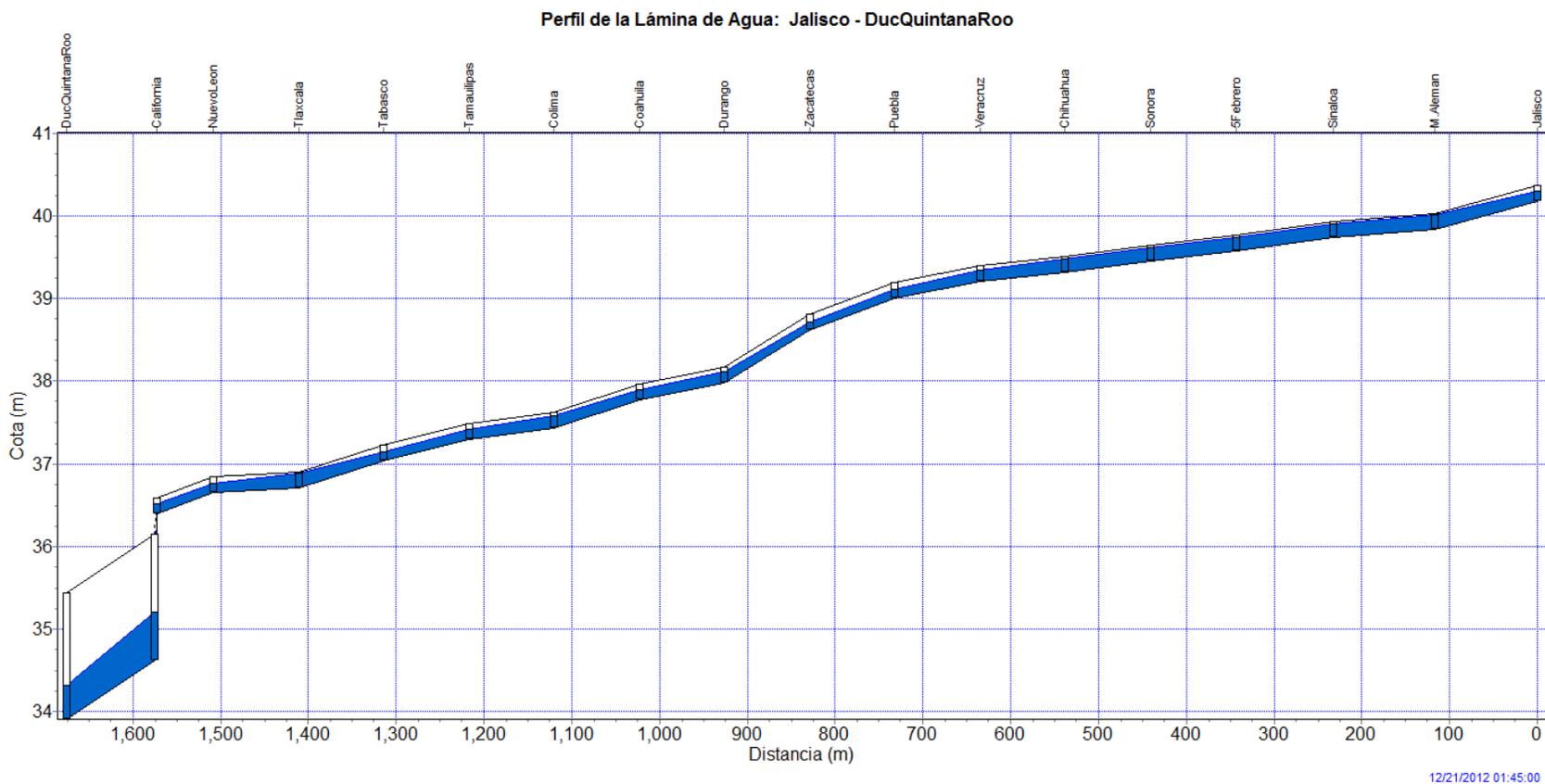
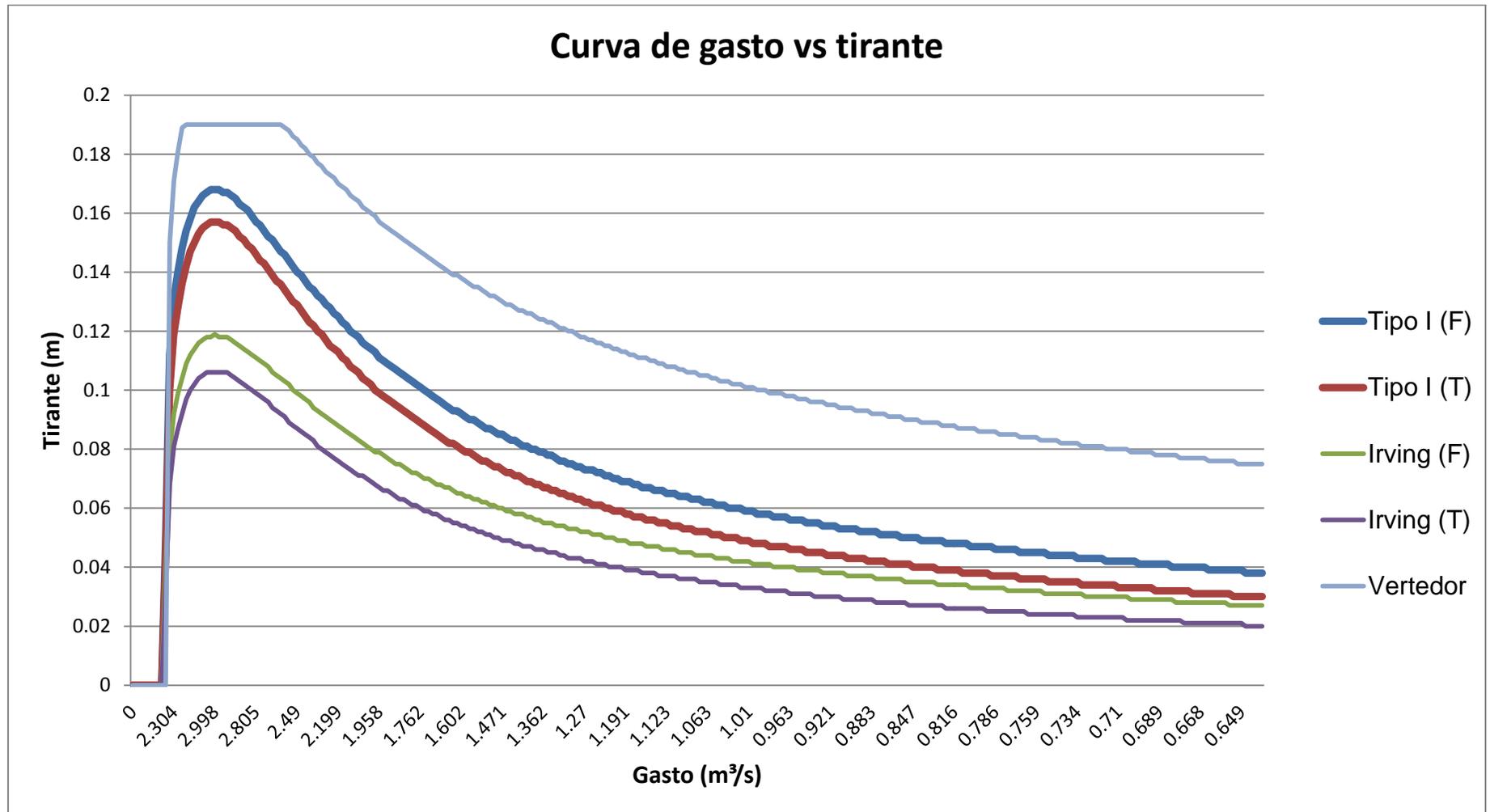


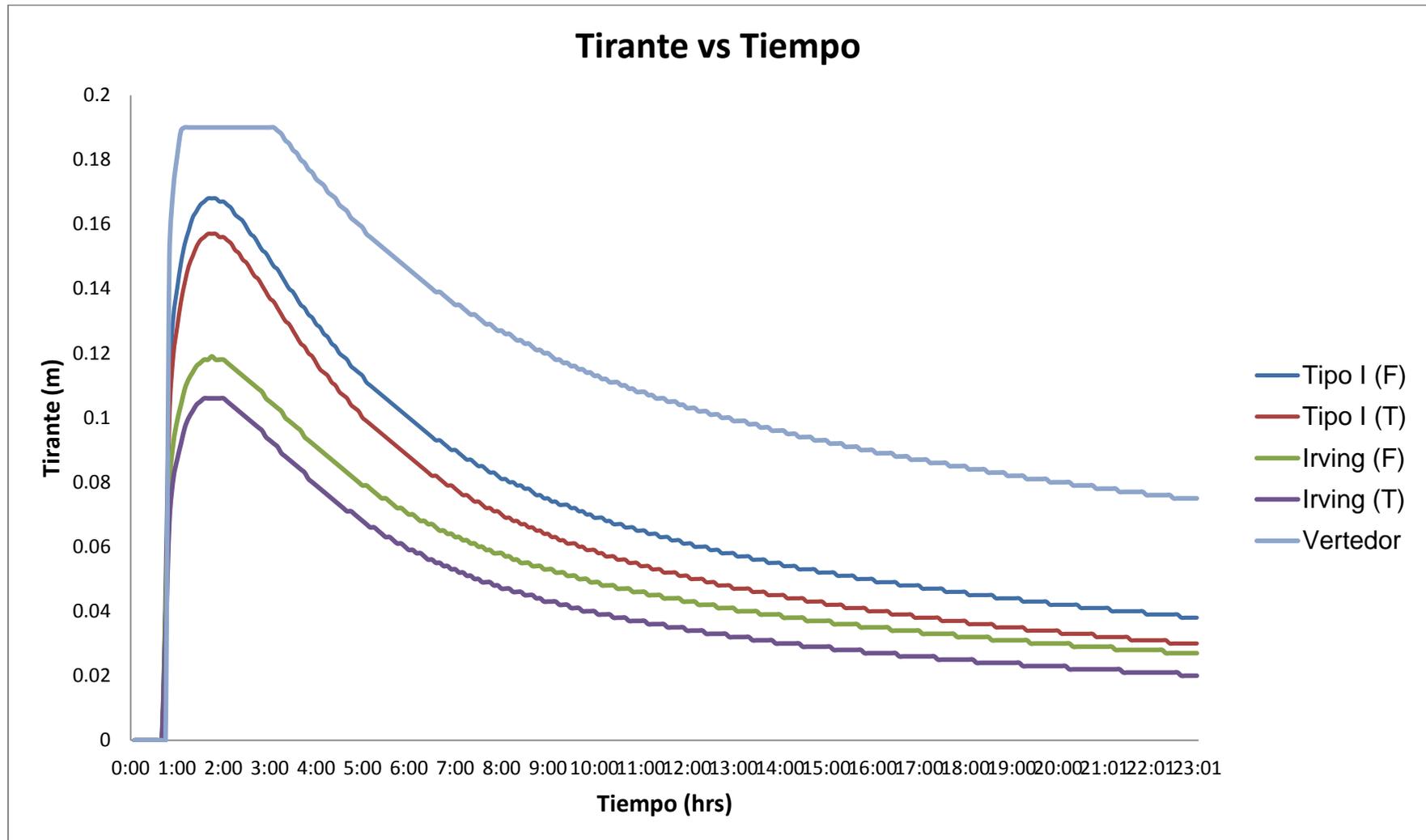
Figura 25. Perfil longitudinal de la calle, mostrando el gasto máximo

Tiempo	Outlet (Tipo I)				Outlet (Irving)				Vertedor	
	Funcional		Tabular		Funcional		Tabular		Gasto (m ³ /s)	Tirante (m)
	Gasto (m ³ /s)	Tirante (m)								
0:05	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:35	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0:45	0.759	0.048	0.775	0.042	0.885	0.039	0.851	0.032	0.000	0.000
0:50	1.968	0.112	1.968	0.100	1.967	0.079	1.971	0.068	1.831	0.150
0:55	2.304	0.131	2.306	0.119	2.311	0.092	2.312	0.081	2.217	0.171
1:00	2.479	0.140	2.480	0.128	2.488	0.099	2.489	0.087	2.426	0.181
1:05	2.620	0.148	2.620	0.136	2.626	0.104	2.627	0.092	2.579	0.189
1:10	2.730	0.154	2.730	0.142	2.735	0.109	2.736	0.097	2.603	0.190
1:15	2.815	0.158	2.815	0.147	2.819	0.112	2.820	0.100	2.603	0.190
1:20	2.879	0.162	2.879	0.150	2.882	0.114	2.882	0.102	2.603	0.190
1:25	2.926	0.164	2.926	0.153	2.928	0.116	2.928	0.104	2.603	0.190
1:30	2.959	0.166	2.959	0.155	2.961	0.117	2.961	0.105	2.603	0.190
1:35	2.981	0.167	2.981	0.156	2.982	0.118	2.982	0.106	2.603	0.190
1:40	2.993	0.168	2.994	0.157	2.994	0.118	2.994	0.106	2.603	0.190
1:45	2.998	0.168	2.998	0.157	2.998	0.119	2.998	0.106	2.603	0.190
1:50	2.996	0.168	2.996	0.157	2.995	0.118	2.995	0.106	2.603	0.190
22:50	0.644	0.038	0.644	0.030	0.644	0.027	0.643	0.020	0.643	0.075
22:55	0.642	0.038	0.642	0.030	0.642	0.027	0.642	0.020	0.641	0.075
23:00	0.640	0.038	0.640	0.030	0.640	0.027	0.640	0.020	0.640	0.075

Tabla 23. Resultados de la simulación



Grafica 3. Curvas gasto vs tirante



Grafica 4. Curva tirante vs tiempo

IV. CONCLUSION

En el presente estudio se realizó la comparativa de la captación de escurrimientos de entre dos diferentes rejillas (Perfil tipo I y tipo Irving) de bocas de tormenta, mediante la aplicación de dos métodos y una simulación hidráulica en software, se obtuvo el gasto de captación que tienen ambas rejillas y se determinó el modelo más eficiente.

Con el método utilizado por la Comisión Nacional del Agua simulando la rejilla o sumidero con función de orificio se determina que la rejilla tipo Irving tiene una eficiencia mayor con un valor de 97.60% sobre la rejilla de tipo I dando como resultado una mayor captación.

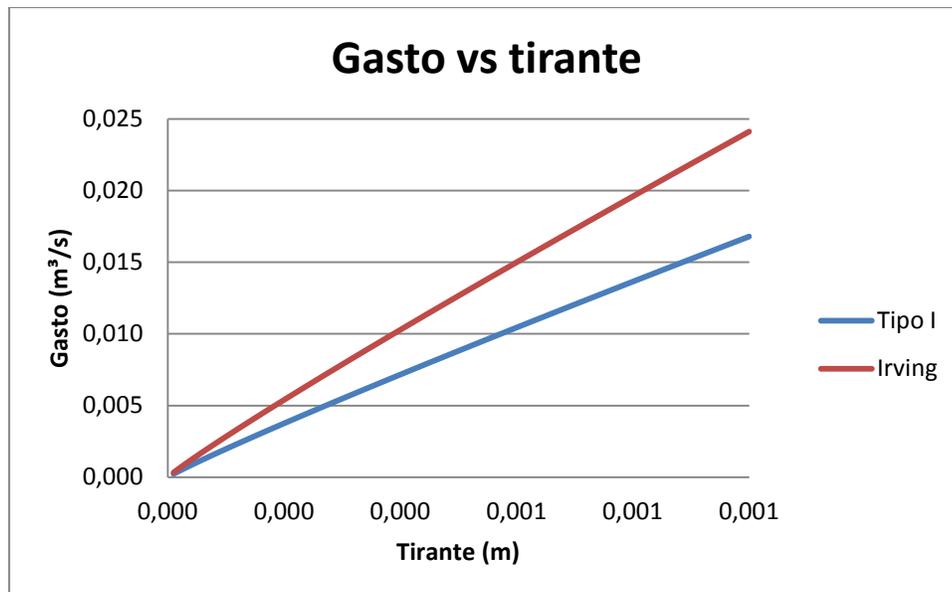
Aplicando el método del manual de diseño de drenaje urbano de la Circular de Ingeniería Hidráulica (*HEC*) No.22 del Departamento de Transportes de E.U.A, de acuerdo a las características geométricas de la rejilla en sitio y el área de abertura, además del tirante hidráulico calculado de diseño, se determinó que ambas rejillas funcionan como vertedor, dando como resultado un mismo gasto para ambas rejillas.

Para este método se demostró que la rejilla tipo I convierte su funcionamiento de vertedor a orificio al alcanzar un tirante superior a los 0.30 metros en comparación a la rejilla de Irving que altera su comportamiento con un tirante mayor a los 0.60 metros, además al comparar sus funcionamientos como orificios la rejilla de tipo Irving tiene una mayor eficiencia que la de tipo I con porcentaje de 97.60%.

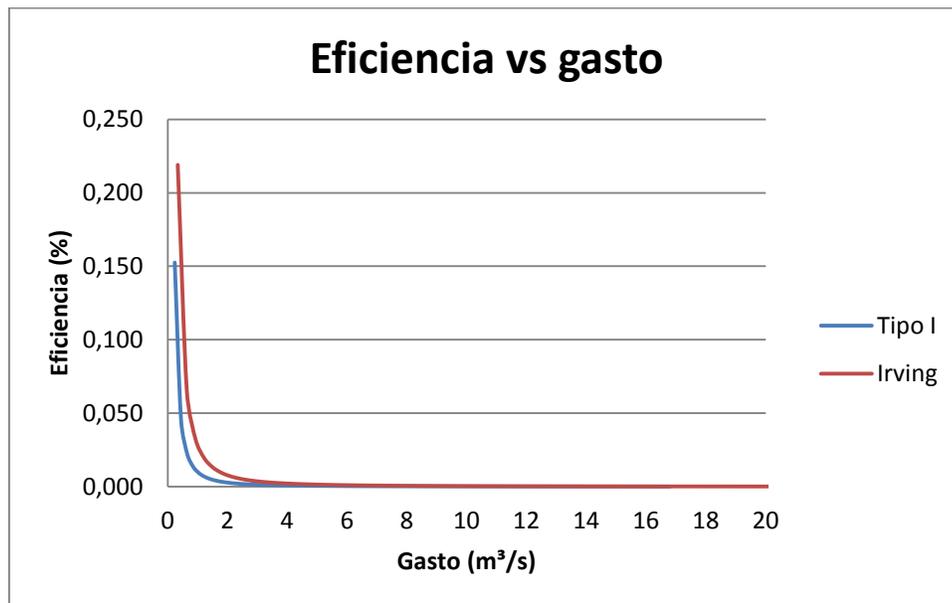
Se realizaron variaciones en el modelo de EPA SWMM aplicando distintos elementos de captación como rejilla, orificio y vertedor, dando como resultando un gasto igual a

comparación del vertedor que cuenta con un 15.17% menos del gasto. En el modelo utilizado para la simulación hidráulica mediante el programa EPA SWMM se obtuvieron valores iguales en su captación, ya que ambas rejillas tienen la capacidad de desalojar eficientemente el volumen de escurrimiento. Aunque se determinó que la rejilla con mayor eficiencia es la Irving, este resultado no depende del volumen captado en menores proporciones, para determinar cuál rejilla es mejor se observó su comportamiento en la superficie ya que la rejilla con mayor área de abertura, que es la Irving, acumuló menor volumen en la superficie, por lo tanto se puede deducir es más eficiente ya que tiene una mayor velocidad de captación.

En la **gráfica 5** se muestra una comparación a manera general de la capacidad de captar gasto de ambas rejillas, y en la **gráfica 6** se muestra una comparación de la eficiencia que presentan ambas rejillas.



Gráfica 5. Gasto vs tirante



Grafica 6. Eficiencia de ambas rejillas

Se observa que a medida que aumenta el gasto de la calle, el gasto de captación de ambas rejillas va en aumento, pero prácticamente la rejilla tipo Irving presenta el doble de gasto captado. Y a medida que el gasto o el tirante aumenta la eficiencia de ambas rejillas va disminuyendo, ya que el gasto sobrepasa la capacidad de captación de las rejillas, pero la rejilla tipo Irving presenta mayor eficiencia hidráulica.

A manera de resumen, en todos los métodos utilizados la rejilla Irving posee una mayor capacidad de captación, lo cual resulta obvio ya que ésta tiene aproximadamente el doble de área de abertura presentando un 197.6% de incremento en el área existente, y aunque en el método de la Circular de Ingeniería Hidráulica, su comportamiento es distinto, el gasto captado hasta cierto punto es similar, pero la rejilla Irving sigue teniendo mayor captación del gasto, así funcione como vertedor u orificio. Aunque mediante la simulación con el software EPA SWMM 5.0, se observa cómo se produce el proceso de hidrología urbana, desde la simulación de la lluvia en la cuenca, tanto como el escurrimiento de agua de la misma a través del cauce principal, hasta llegar al sistema de captación, aquí se puede observar, que tanto con los dos métodos y la simulación en software, ambas

rejillas tienen la capacidad de captación necesaria, para descargar el gasto de la calle hasta ese lugar en la calle, pero a diferencia de una rejilla de la otra, la rejilla tipo Irving presenta un menor tirante en el sitio, por lo que se concluye que ésta tiene mayor capacidad, ya que ésta permite menor acumulación del agua en este punto, por lo que la rejilla Irving cumple más satisfactoriamente con la tarea de captación de aguas pluviales.

BIBLIOGRAFÍA

- CONAGUA, Diciembre 2007, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de Lagunas de Estabilización.
- FLUMEN, Enero 2007, Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2005, SWMM, modelo de gestión de aguas pluviales, manual de usuario.
- Hydraulic Engineering Circular No. 22, Agosto 2001, Urban drainage design manual
- Ministerio del agua viceministerio de servicios básicos, Abril 2007, Reglamento técnico de diseño de cunetas y sumideros.

ANEXOS

Anexo I. Curva i-d-Tr para un periodo de retorno de 5 años (Oviáchic, 1995)

ANEXO II. Área de abertura óptima de rejilla

ANEXO I. Curva i-d-Tr para un periodo de retorno de 5 años (Oviáchic, 1995)

d (min)	i (mm/hr)						
Hora (H:M)	Valor						
00:00	0	03:05	3,68	06:05	2,59	09:05	2,10
00:05	24,07	03:10	3,63	06:10	2,57	09:10	2,09
00:10	16,79	03:15	3,58	06:15	2,55	09:15	2,08
00:15	13,60	03:20	3,54	06:20	2,53	09:20	2,07
00:20	11,71	03:25	3,49	06:25	2,52	09:25	2,06
00:25	10,43	03:30	3,45	06:30	2,50	09:30	2,05
00:30	9,48	03:35	3,41	06:35	2,48	09:35	2,04
00:35	8,75	03:40	3,36	06:40	2,47	09:40	2,03
00:40	8,16	03:45	3,33	06:45	2,45	09:45	2,02
00:45	7,68	03:50	3,29	06:50	2,43	09:50	2,01
00:50	7,27	03:55	3,25	06:55	2,42	09:55	2,01
00:55	6,92	04:00	3,22	07:00	2,40	10:00	2,00
01:00	6,61	04:05	3,18	07:05	2,39	10:05	1,99
01:05	6,34	04:10	3,15	07:10	2,37	10:10	1,98
01:10	6,10	04:15	3,12	07:15	2,36	10:15	1,97
01:15	5,89	04:20	3,08	07:20	2,35	10:20	1,96
01:20	5,69	04:25	3,05	07:25	2,33	10:25	1,96
01:25	5,52	04:30	3,02	07:30	2,32	10:30	1,95
01:30	5,36	04:35	3,00	07:35	2,31	10:35	1,94
01:35	5,21	04:40	2,97	07:40	2,29	10:40	1,93
01:40	5,07	04:45	2,94	07:45	2,28	10:45	1,92
01:45	4,94	04:50	2,91	07:50	2,27	10:50	1,92
01:50	4,82	04:55	2,89	07:55	2,25	10:55	1,91
01:55	4,71	05:00	2,86	08:00	2,24	11:00	1,90
02:00	4,61	05:05	2,84	08:05	2,23	11:05	1,89
02:05	4,51	05:10	2,82	08:10	2,22	11:10	1,89
02:10	4,42	05:15	2,79	08:15	2,21	11:15	1,88
02:15	4,34	05:20	2,77	08:20	2,20	11:20	1,87
02:20	4,26	05:25	2,75	08:25	2,18	11:25	1,86
02:25	4,18	05:30	2,73	08:30	2,17	11:30	1,86
02:30	4,11	05:35	2,70	08:35	2,16	11:35	1,85
02:35	4,04	05:40	2,68	08:40	2,15	11:40	1,84
02:40	3,97	05:45	2,66	08:45	2,14	11:45	1,84
02:45	3,91	05:50	2,64	08:50	2,13	11:50	1,83
02:50	3,85	05:55	2,62	08:55	2,12	11:55	1,82
02:55	3,79	06:00	2,60	09:00	2,11	12:00	1,82
03:00	3,73						

d (min)	i (mm/hr)						
Hora (H:M)	Valor						
12:05	1,81	15:05	1,61	18:05	1,47	21:05	1,35
12:10	1,80	15:10	1,61	18:10	1,46	21:10	1,35
12:15	1,80	15:15	1,60	18:15	1,46	21:15	1,35
12:20	1,79	15:20	1,60	18:20	1,46	21:20	1,35
12:25	1,78	15:25	1,59	18:25	1,45	21:25	1,34
12:30	1,78	15:30	1,59	18:30	1,45	21:30	1,34
12:35	1,77	15:35	1,59	18:35	1,45	21:35	1,34
12:40	1,77	15:40	1,58	18:40	1,44	21:40	1,34
12:45	1,76	15:45	1,58	18:45	1,44	21:45	1,33
12:50	1,75	15:50	1,57	18:50	1,44	21:50	1,33
12:55	1,75	15:55	1,57	18:55	1,43	21:55	1,33
13:00	1,74	16:00	1,56	19:00	1,43	22:00	1,33
13:05	1,74	16:05	1,56	19:05	1,43	22:05	1,32
13:10	1,73	16:10	1,56	19:10	1,42	22:10	1,32
13:15	1,73	16:15	1,55	19:15	1,42	22:15	1,32
13:20	1,72	16:20	1,55	19:20	1,42	22:20	1,31
13:25	1,71	16:25	1,54	19:25	1,41	22:25	1,31
13:30	1,71	16:30	1,54	19:30	1,41	22:30	1,31
13:35	1,70	16:35	1,54	19:35	1,41	22:35	1,31
13:40	1,70	16:40	1,53	19:40	1,40	22:40	1,30
13:45	1,69	16:45	1,53	19:45	1,40	22:45	1,30
13:50	1,69	16:50	1,52	19:50	1,40	22:50	1,30
13:55	1,68	16:55	1,52	19:55	1,40	22:55	1,30
14:00	1,68	17:00	1,52	20:00	1,39	23:00	1,30
14:05	1,67	17:05	1,51	20:05	1,39	23:05	1,29
14:10	1,67	17:10	1,51	20:10	1,39	23:10	1,29
14:15	1,66	17:15	1,50	20:15	1,38	23:15	1,29
14:20	1,66	17:20	1,50	20:20	1,38	23:20	1,29
14:25	1,65	17:25	1,50	20:25	1,38	23:25	1,28
14:30	1,65	17:30	1,49	20:30	1,37	23:30	1,28
14:35	1,64	17:35	1,49	20:35	1,37	23:35	1,28
14:40	1,64	17:40	1,49	20:40	1,37	23:40	1,28
14:45	1,63	17:45	1,48	20:45	1,37	23:45	1,27
14:50	1,63	17:50	1,48	20:50	1,36	23:50	1,27
14:55	1,62	17:55	1,47	20:55	1,36	23:55	1,27
15:00	1,62	18:00	1,47	21:00	1,36	24:00	1,27

ANEXO II. Área de abertura óptima de rejilla

Para dimensionar una rejilla se podría hacer un estudio previo de la zona de abarque además de algunos aspectos como el análisis de precipitación, tamaño y tipo cuenca además del uso del suelo aun que suelen emplearse diversos métodos para dimensionar usualmente se utiliza la fórmula de Talbot y así obtener la abertura óptima con la que debe de contar la rejilla.

La fórmula de Talbot se escribe como

$$a = 0.183CA^{3/4}$$

Donde:

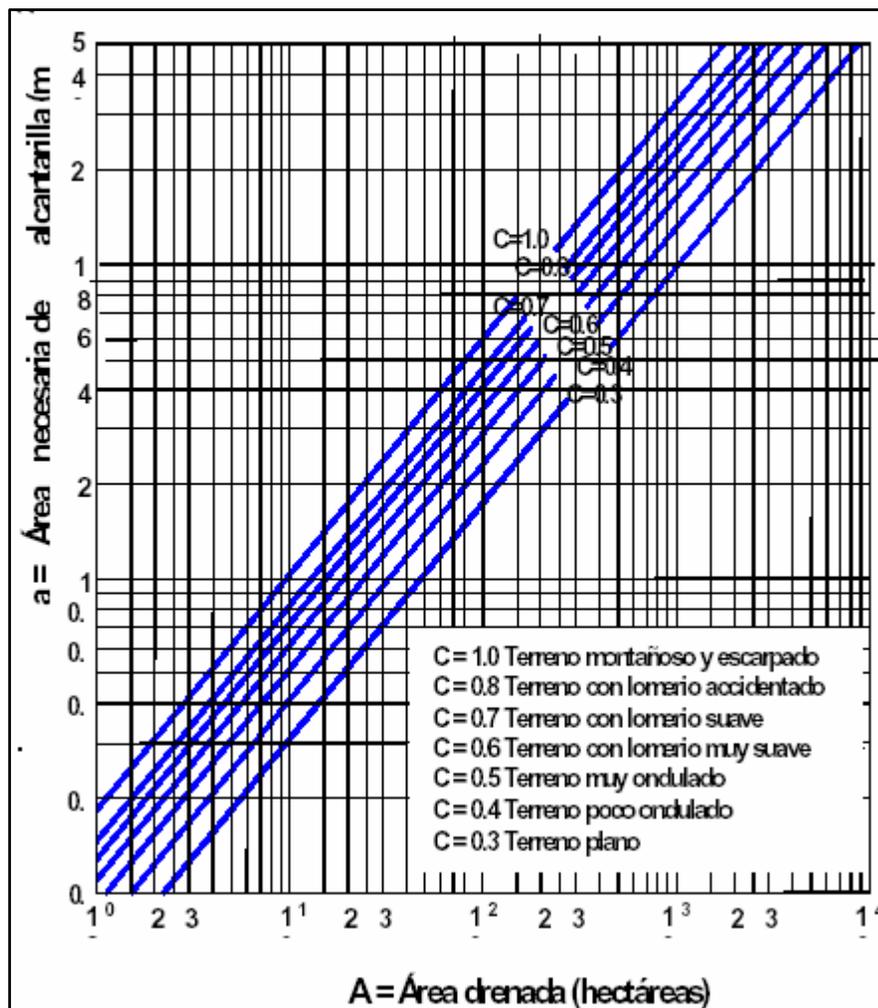
- a área hidráulica necesaria en la alcantarilla (m^2)
- A área de la cuenca (has)
- C coeficiente que varía de acuerdo a las características del terreno

Para el valor de C se pueden considerar los siguientes valores con respecto a las características de la cuenca.

- $C = 1$ para terrenos montañosos con suelos de roca y pendientes pronunciadas.
- $C = 0.65$ para terrenos accidentados con pendientes moderadas.
- $C = 0.50$ para cuencas irregulares, muy largas.
- $C = 0.33$ para terrenos agrícolas ondulados, en los que el largo de la cuenca es de tres a cuatro veces el ancho
- $C = 0.20$ para terrenos llanos, sensiblemente horizontales, no afectados por inundaciones fuertes.

En terrenos permeables, estos valores de C, deben disminuirse en 50%, por lo que además de la formación geológica de la zona, debe conocerse el tipo de cubierta vegetal y el futuro uso del terreno.

Conociendo el área de la cuenca y el coeficiente C, puede emplearse la Figura 3.24 para obtener el área hidráulica necesaria en la alcantarilla y si se trata de un tubo, puede calcularse su diámetro.



Fuente: Comisión Nacional del Agua 2007: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.