

4 MODELO DE SIMULACIÓN SWMM

Se presentan a continuación las principales características y el funcionamiento del modelo matemático para simulación de procesos hidrológicos e hidráulicos en zona urbana SWMM. Este es el programa empleado para el desarrollo de esta tesina y que también fue utilizado en estudios y tesinas anteriores para el análisis de la cuenca de la Riera Roja en Sant Boi de Llobregat.

4.1 INTRODUCCIÓN

Storm Water Management Model (SWMM) es una aplicación gestionada por el *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA) y respaldada técnicamente por la Universidad de Oregón, capaz de reproducir los fenómenos de escorrentía urbana y combinar fenómenos asociados a aguas residuales.

Su *versión 4.4h*, usada en el desarrollo de esta tesina, carece de entorno gráfico, pero está programada en lenguaje FORTRAN, y el código disponible abiertamente en Internet, siendo un modelo de referencia y de programación robusta.

Se trata de un programa validado por la experiencia de los años que lleva en el mercado, por las aplicaciones que ya se han realizado con el mismo y por las continuas mejoras en su esquema de funcionamiento (SWMM 5.0 dispone de entorno Windows y salidas gráficas, pero ha sido reprogramado en lenguaje C++).

SWMM simula la respuesta de la cuenca (partiendo de datos de precipitación) y otros parámetros meteorológicos y la caracterización del sistema: subcuencas, conducciones, almacenamiento, etc., resolviendo así el problema hidrológico, en superficie, e hidráulico en las conducciones.

El programa está dividido en varios módulos: los computacionales, que son *Runoff, Transport, Extran, y Storage/Treatment*; y los de servicio: *Executive, Rain, Temp, Graph y Statistics*. Puesto que en ningún caso se han considerado los efectos de la nieve, muy poco frecuentes en la zona, ni de calidad de aguas o simulación continua, los módulos que centran la atención del estudio son RUNOFF, para el proceso de transformación lluvia – escorrentía y EXTRAN (*Extended Transport*), para el cálculo hidráulico de los conductos.

El bloque *Executive* se utiliza para control de los bloques computacionales, de manera que pueden utilizarse los dos módulos, RUNOFF y EXTRAN, mediante un solo archivo de entrada.

4.2 MÓDULO RUNOFF

Este módulo tiene por función simular los fenómenos de transformación lluvia – escorrentía de una cuenca y la entrada de hidrogramas en la red de drenaje. Para ello, la cuenca se divide en un número determinado de subcuencas, cada una de las cuales genera su propia escorrentía que acaba introduciendo a la red por un determinado punto o nodo de entrada, que equivale a un imbornal en la mayoría de casos.

El bloque RUNOFF se usa para el cálculo de la escorrentía producida por la lluvia en cada una de las subcuencas en las que se decide dividir la cuenca, y su salida de resultados, en forma de hidrogramas de entrada en ciertos puntos, puede ser usada por los siguientes módulos, en particular, por EXTRAN. Por este motivo, la correcta preparación de los datos de este bloque es decisiva, pues se transmitirá a los siguientes.

Los cálculos de la escorrentía están basados en un modelo de depósitos modificado con la onda cinemática. El modelo divide cada subcuenca en una zona permeable sin retención superficial, otra impermeable sin retención y una última zona permeable con retención, en función de los porcentajes de impermeabilidad y de retención introducidos. La escorrentía es generada aproximando el funcionamiento de cada una de estas zonas a un depósito no lineal esquematizado en la *Figura 4*.

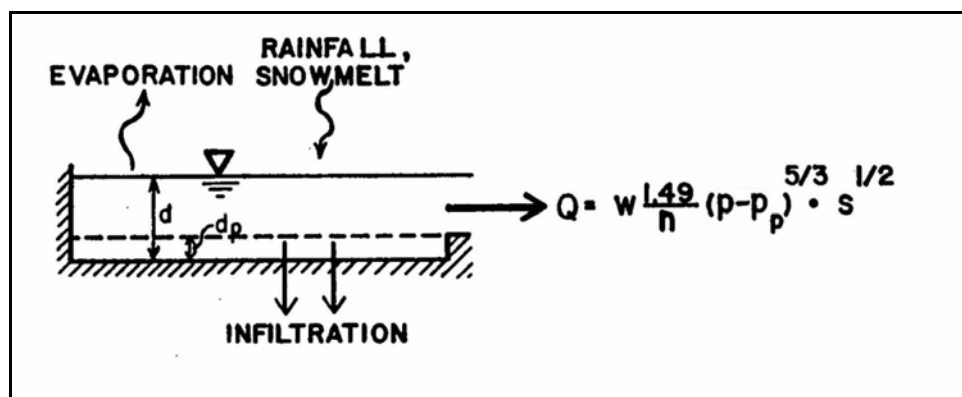


Figura 4. Esquema de cálculo del módulo RUNOFF de SWMM (en unidades americanas). Fuente: (Huber & Dickinson, 1992).

El caudal de salida responde a la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{W}{n} (p - p_p)^{5/3} S^{1/2}, \quad [4.1]$$

donde

Q : caudal de salida de la subcuenca, [m³/s].
 W : ancho de la subcuenca, [m].
 n : coeficiente de rugosidad de Manning.
 p : profundidad del agua, [m].
 p_p : profundidad de retención superficial, [m].
 S : pendiente.

La ecuación del depósito no lineal se establece resolviendo el sistema de ecuaciones que constituyen la ecuación de continuidad y la ecuación de Manning. La continuidad para cada subcuenca es:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dp}{dt} = A \cdot i - Q, \quad [4.2]$$

donde

V : volumen de agua en la subcuenca ($V=A \cdot p$), [m³].
 p : profundidad del agua o calado, [m].
 t : tiempo, [s].
 A : superficie de la subcuenca, [m²].
 i : lluvia neta (precipitación menos infiltración y evaporación), [m/s].
 Q : caudal de salida de la subcuenca según [4.1], [m³/s].

Las dos ecuaciones anteriores se combinan para dar lugar a la ecuación diferencial, no lineal, para el calado:

$$\frac{dp}{dt} = i - \frac{W}{A \cdot n} (p - p_p)^{5/3} S^{1/2}. \quad [4.3]$$

Esta ecuación se resuelve mediante un esquema en diferencias finitas de *Newton-Raphson*, para cada incremento de tiempo. Por este motivo, es conveniente evitar divisiones de la cuenca de estudio en subcuencas de pocos metros cuadrados y con incrementos de tiempo largos (varios minutos), para prevenir problemas de convergencia del esquema.

Conviene resaltar que los parámetros que se introducen en el modelo pueden servir para ajustar la respuesta del mismo. Por ejemplo, W corresponde a la anchura del depósito que está representando a una determinada subcuenca y que debe estimarse a partir de la forma geométrica real de la misma, que no será ni uniforme ni simétrica. Asumiendo una cuenca rectangular y para una misma superficie, un mayor ancho producirá hidrogramas de salida de la subcuenca de menor duración y mayor caudal punta, mientras que un ancho menor retrasará la punta del hidrograma, produciendo un efecto de laminación. Sin embargo, si se conocen realmente los valores de los parámetros y no sólo se están estimando, conviene usar otras variables para el ajuste, como por ejemplo el coeficiente de rugosidad de Manning, que para valores elevados, produce caudales punta

menores y calados mayores. Idéntica situación se podría plantear para otros parámetros como la pendiente de las subcuencas, por ejemplo, aunque los análisis de sensibilidad y la calibración de modelos requieren un conocimiento de la cuenca estudiada bastante elevado.

Los datos de entrada (*inputs*) requeridos por el módulo RUNOFF son:

1. Datos meteorológicos. Descripción del evento (o eventos) de lluvia; por ejemplo, mediante datos de intensidades de lluvia en intervalos fijados de tiempo y duración total (hietograma). También podrían introducirse espesores y características de la capa de nieve.

2. Características de las subcuencas. Debe introducirse la siguiente información:

- Asignación de un hietograma (evento de lluvia) a cada subcuenca.
- Número de identificación de la subcuenca.
- Identificación del lugar por donde drena la subcuenca, que puede ser un sumidero (nodo de entrada a la red de drenaje) o un canal en superficie. Los sumideros pueden ser compartidos por varias subcuencas.
- Ancho de la subcuenca.
- Área de la subcuenca.
- Pendiente media de la subcuenca.
- Coeficiente de rugosidad de Manning de las zonas permeables e impermeables.
- Volumen de almacenamiento o retención en la zona permeable e impermeable.
- Parámetros de infiltración, según la ecuación de *Horton* (aunque también es posible usar la formulación de *Green-Ampt*):

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \cdot e^{-\alpha t}, \quad [4.4]$$

- f_p : capacidad de infiltración.
- f_0 : capacidad de infiltración inicial.
- f_∞ : capacidad de infiltración del suelo saturado.
- α : coeficiente de reducción de la infiltración.
- t : tiempo desde el inicio de la lluvia.

3. Características de los canales de drenaje. Son los canales por los que cada subcuenca puede conducir su escorrentía, en vez de enviarlos directamente a un sumidero. Suelen corresponder a las propias calles y vías de comunicación de la cuenca y quedar delimitados por sus bordillos, por ejemplo. Estos canales pueden atravesar varias subcuencas, pero acabando siempre en un

sumidero que de entrada a la red. En este caso, el sumidero podría corresponder a un imbornal de grandes dimensiones (interceptores transversales, por ejemplo). Requieren de la definición de los siguientes parámetros (siempre que la cuenca no drene directamente a un punto de entrada):

- Número de identificación.
 - Identificación del siguiente canal o sumidero al que drena el canal.
 - Forma, que puede ser trapezoidal, circular, parabólica y contener un azud o un orificio de salida, y los parámetros que la definen.
 - Coeficiente de rugosidad de Manning de los canales.
 - Calado máximo admisible en el canal y calado inicial.
4. Otros parámetros. Se puede ajustar el intervalo de tiempo de la discretización numérica, así como la duración total de la simulación, sistema de unidades, etc.

4.3 MÓDULO EXTRAN

EXTRAN (*Extended Transport Module*) utiliza como datos de entrada los datos de salida del módulo RUNOFF, consistentes en la evolución temporal de la entrada del agua de escorrentía en la red de alcantarillado a través de los imbornales (o nodos de entrada), para modelar el flujo del agua por la red de alcantarillado, a través de los conductos, nodos y depósitos, mediante la resolución de las ecuaciones completas de *Saint-Venant*.

EXTRAN es una mejora del módulo TRANSPORT del mismo programa, y que resolvía el problema de propagación mediante el método de la onda cinemática. Este último método, que no tiene la capacidad de reproducir los efectos hacia aguas arriba, representaba una importante deficiencia y merma de la validez de los resultados. La falta de capacidad de algunos conductos, la disposición de depósitos de retención, etc., son circunstancias que repercuten en el funcionamiento del sistema de alcantarillado propagándose aguas arriba, por lo que la resolución de las ecuaciones completas de Saint-Venant es necesaria para la correcta modelización de una red de alcantarillado compleja. EXTRAN, al reproducir el flujo gradualmente variado, permite la modelización de azudes, orificios, bombeos, compuertas, depósitos, redes malladas y vertidos, con las condiciones de contorno deseadas.

Las ecuaciones de *Saint-Venant* son las siguientes:

- Ecuación de continuidad para secciones prismáticas

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad [4.5]$$

donde

A: área de la sección.

Q: caudal.

x: distancia a lo largo del conducto.

t: tiempo.

- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot S_f = 0, \quad [4.6]$$

donde

g: gravedad.

H: cota piezométrica ($H = z + h$).

z: cota de la solera o lecho.

h: calado.

S_f : pendiente de fricción, según la ecuación de Manning.

Para resolver este sistema de ecuaciones diferenciales, EXTRAN usa una descripción de la red en nodos ("*junctions*" o "*nodes*") y conductos ("*links*"), con elementos singulares tales como orificios, depósitos o azudes, para representar matemáticamente el prototipo físico. Así, se usa la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en los conductos, y una modificación de la ecuación de continuidad en los nodos. De esta forma, los conductos transmiten el flujo de nodo a nodo, supuesto constante en un incremento de tiempo, y los nodos funcionan como elementos de almacenamiento del sistema (*Figura 5*). Algunas modificaciones en el procedimiento de cálculo han sido probadas mediante la modificación del código por diversos autores y otras efectuadas en sucesivas versiones de SWMM.

EXTRAN combina las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento en una sola, que resuelve para todos los conductos en cada intervalo de tiempo. La ecuación es la siguiente:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \cdot A \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot S_f = 0, \quad [4.7]$$

donde

v: velocidad media.

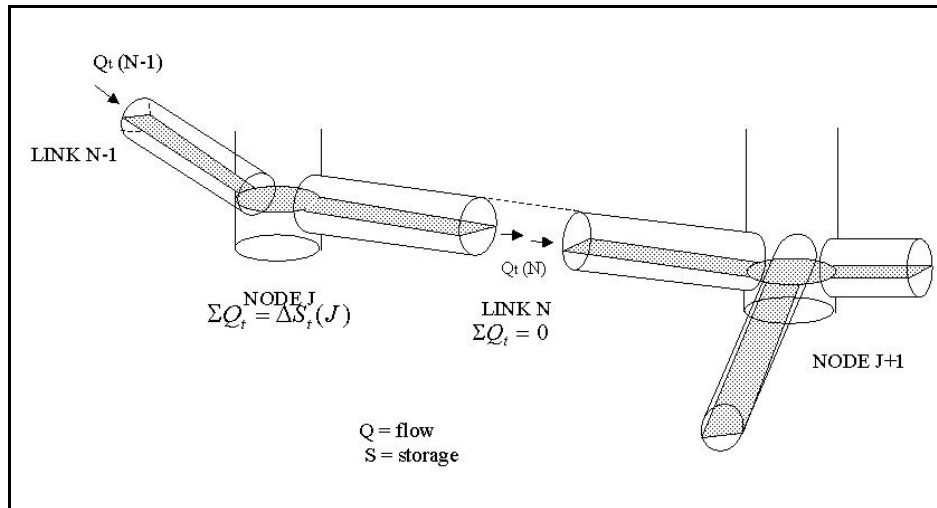


Figura 5. Representación conceptual del modelo EXTRAN de SWMM.
Fuente: *Guelph website*.

Por otro lado, aplica la ecuación de continuidad en los nodos para cada intervalo de tiempo:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum \frac{Q}{A_s}, \quad [4.8]$$

donde

A_s : área del nodo (según *Figura 5*, el área incluye el nodo propiamente dicho y el área correspondiente a la mitad de la longitud de los conductos que confluyen en ese nodo).

De esta manera, según [4.8], se puede simular la existencia de depósitos en la red, indicando un área de nodo equivalente al área del depósito a representar.

Al resolver las ecuaciones de *Saint-Venant* dando continuidad en los nodos y conservación en los conductos, se reducen el número de incógnitas, agilizando los tiempo de computación. Las ecuaciones [4.7] y [4.8] se resuelven de forma secuencial para determinar el flujo en cada conducto y el calado en cada nodo para cada intervalo de tiempo mediante el método de *Euler modificado*, en un esquema de *diferencias finitas explícito*. Este esquema implica operaciones aritméticas sencillas y poco espacio de almacenamiento comparado con los métodos implícitos. Sin embargo, son generalmente menos estables numéricamente y requieren incrementos de tiempo pequeños.

Las condiciones que se deben cumplir para que el esquema sea estable numéricamente son:

- Condición de *Courant*, expresada de la siguiente manera, donde el incremento de tiempo está limitado al tiempo necesario por una onda dinámica para propagarse en la longitud del conducto,

$$\Delta t \leq \frac{L}{\sqrt{g \cdot D}}, \quad [4.9]$$

donde

Δt : incremento de tiempo.
 L : longitud del conducto.
 D : calado máximo del conducto.
 g : gravedad

- Condición sobre los nodos,

$$\Delta t \leq 0.1 \cdot A_s \frac{\Delta H_{\max}}{\sum Q}, \quad [4.10]$$

donde

ΔH_{\max} : elevación máxima del agua en Δt .
 $\sum Q$: flujo neto de entrada al nodo.

El cumplimiento de las dos ecuaciones anteriores será más restrictivo en los conductos más cortos y con mayores entradas de caudal. En general incrementos de tiempo de pocos segundos (10 – 30 s) son comunes en la práctica de SWMM. El programa acepta un incremento de tiempo mínimo de 1 s.

Otra situación en la que SWMM también puede presentar problemas al resolver las ecuaciones se da cuando el caudal circulante es nulo o prácticamente nulo. Esto ocurre al inicio del suceso de precipitación que se está simulando, por lo que es recomendable usar caudales base para que no se den situaciones de conductos “secos”. También pueden aparecer problemas si la simulación del módulo EXTRAN se alarga mucho en el tiempo, y la escorrentía generada en superficie ya ha sido conducida en su totalidad por la red de drenaje, volviendo a dejar los conductos sin agua.

De forma análoga a cómo los depósitos se pueden representar mediante nodos de dimensiones iguales al depósito, los orificios, que se introducen como tal, son modelizados automáticamente por SWMM como conductos equivalentes mediante la siguiente expresión:

$$Q_0 = C_0 \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad [4.11]$$

donde

C_0 : coeficiente de descarga (depende del tipo de obertura y longitud del orificio).
 A : área del orificio.
 g : gravedad.

h : altura hidráulica en el orificio.

La conversión de orificio a conducto se realiza igualando la ecuación anterior a la expresión de Manning, de manera que

$$n \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} = C_0 \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} . \quad [4.12]$$

Finalmente, para la resolución de las ecuaciones de *Saint-Venant*, se necesita la condición de contorno aguas abajo. La restricción que presenta SWMM en este aspecto es que obliga a la disposición de sólo un conducto (procedente de un nodo donde sólo haya otro conducto de llegada) en la salida del sistema, e imponer ahí la condición de contorno. Esta situación puede ser problemática cuando en la salida de la cuenca haya varios elementos de regulación hidráulica o más de una conexión o salida principales de la red.

Los datos de entrada (*inputs*) requeridos por el módulo EXTRAN son:

1. Datos procedentes del módulo RUNOFF.
2. Duración de los incrementos de tiempo.
 - Incremento de tiempo para el cálculo de las ecuaciones (teniendo precaución de cumplir las condiciones de estabilidad numérica).
 - Duración total de la simulación. Aunque SWMM no tiene limitaciones en los pasos de cálculo, hay que controlar la aparición de errores para simulaciones muy largas una vez terminado el suceso de lluvia.
3. Características de los colectores y alcantarillas. La siguiente información es requerida por el programa:
 - Número de identificación del colector (conviene mantener una relación numérica lógica con los identificadores de los nodos a los que une, para una mejor y más sencilla revisión de los datos).
 - Número de identificación de los dos pozos que une el conducto.
 - Flujo inicial circulante por el conducto. Se puede considerar el flujo de aguas residuales o evitar problemas de simulación con caudal nulo.
 - Tipología del conducto y sus dimensiones.
 - Longitud del conducto.
 - Elevación de los extremos del conducto sobre la solera del pozo, si ésta es distinta de cero.
 - Coeficiente de rugosidad de Manning del conducto.
4. Características de los pozos. Los pozos (o *junctions*) son los nodos de la red de drenaje y las uniones de los conductos. Corresponden en realidad a los

pozos de registro y los lugares por los que el agua de la superficie entra a la red, recogida en los sumideros. De esta manera, los pozos y sumideros (*junctions* e *inlets* en nomenclatura de SWMM) son los puntos de conexión superficie – red de drenaje. Pueden existir pozos sin entrada de escorrentía, y que tengan sólo función de conectar y/o unir conductos de la red de drenaje, mientras que todos los sumideros sí tienen un *inlet* asociado. La información requerida por el programa es:

- Número de identificación del pozo, que en el caso de ser también un *inlet*, será el mismo.
 - Cota de la solera del pozo.
 - Cota de la calle en este mismo punto, y que condiciona la salida de agua del sistema.
 - Caudal adicional vertido y calado inicial, independiente de la lluvia simulada.
5. Depósitos de retención. Si bien se representan como nodos de dimensiones equivalentes al depósito, hay que definir, para tipologías prismáticas los siguientes campos:
- Superficie en planta del depósito.
 - Altura máxima, que no puede ser mayor que la de la superficie.
 - Posibilidad de hacer solera de cota variable.
6. Orificios. Pueden incorporarse a la salida de un nodo, o depósito, para dotarlo de una restricción y retener mayor cantidad de agua. Estos orificios pueden variar sus dimensiones a lo largo del tiempo para simular abertura y cierre de compuertas. Se debe introducir:
- Coeficiente de descarga.
 - Área del orificio.
 - Cota del orificio.
 - Variables para la definición de los tiempos de abertura.
7. Condición de contorno aguas abajo.