



# **MODELACIÓN DUAL DE UNA RED DE DRENAJE PLUVIAL URBANA MEDIANTE SWMM 5.1 Y SOFTWARE PROPIO DESARROLLADO PARA FACILITAR LA CREACIÓN DEL MODELO E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

**Por Jorge Peña Calva<sup>1</sup> y José Roberto Cagigas Velasquez<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Facultad de Ingeniería/Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad  
Universitaria, Ciudad de México, C.P. 04510

<sup>1</sup>*Aspirante al grado de Especialista en Hidráulica Urbana, Posgrado Ingeniería Civil,  
UNAM, jorgepc7@hotmail.com,*

<sup>2</sup>*Consultor en Ingeniería Hidráulica Urbana y Profesor del Posgrado de la Facultad de  
Ingeniería UNAM, jrcagigas@ingenieria.unam.edu*

## **RESUMEN**

Es posible realizar la modelación Dual de manera dinámica haciendo uso del software SWMM 5.1 que, aunque potente, presenta el inconveniente de la dificultad en la creación del modelo de la infraestructura y configuración topográfica, esto por la gran cantidad de datos a emplear, así como la interpretación práctica de los resultados de escurrimiento superficial y funcionamiento de las estructuras de captación. Al crear los objetos gráficos del modelo Dual en SWMM de manera normal usando su interfaz gráfica, pronto es evidente que será un modelo muy complejo de generar, revisar, depurar y analizar los resultados, situación que se acrecienta con modelos de cuencas urbanas grandes. Por tal razón, desarrollamos una aplicación de software gráfica que nos permite adquirir los datos del modelo de manera rápida y eficiente desde archivos *dwg* de *AutoCad*, y otra aplicación de software gráfica que nos permite interpretar los resultados eficientemente al lograr visualizar el comportamiento de flujo superficial en cunetas de calles y de las estructuras de captación de manera dinámica.

## **Palabras clave**

Drenaje Dual Urbano, Modelo Dual, SWMM.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Actualmente existe software comercial con capacidad para realizar la modelación Dual de drenaje urbano, sin embargo, su costo los hace inaccesibles para el ámbito académico, de profesionistas independientes y pequeñas empresas, sin embargo, varias de estas aplicaciones hacen uso del motor de cálculo de SWMM (por ejemplo: Mike Urban por DHI, Infoworks ICM by Innovyze) y no hacen uso de su interfaz gráfica, ya que esta última no está enfocada al modelo Dual, de lo anterior se desprende, por tanto que es conveniente el empleo de SWMM y el desarrollo de aplicaciones de software de apoyo, que faciliten la creación del complejo modelo y la interpretación práctica y gráfica de los resultados del escurrimiento

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

superficial, entre otros. El desarrollo de estas aplicaciones permitirá emplear más de tiempo en el análisis de resultados y su visualización que en la elaboración del modelo.

La primera aplicación de software con interfaz gráfica extrae los datos espaciales del modelo contenidos en un archivo *dwg* de *AutoCad*, generando un archivo de extensión INP, creando así el modelo con el formato reconocible para SWMM5.1. La segunda aplicación es capaz de procesar los resultados del sistema de cunetas y estructuras de captación, para mostrar gráfica y dinámicamente el proceso de inundación de las cunetas de calles.

En el presente trabajo se realiza la modelación del comportamiento hidráulico de la red de drenaje y del sistema de cunetas de calles de una cuenca urbana perteneciente a sistema de drenaje de la Ciudad de México, la cual presenta problemas de inundación recurrentes, esta modelación se realiza empleando el modelo Dual con SWMM5 y dos aplicaciones de software desarrolladas para este trabajo y antes descritas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 PRINCIPALES HERRAMIENTAS DE DESARROLLO EMPLEADAS

#### Visual C++ con Microsoft Visual Studio 2017.

Visual C++ es un entorno integrado de desarrollo que permite la programación orientada a objetos (POO) conjuntamente con el sistema de desarrollo SDK (también denominado API) de Windows. Al ser un entorno integrado Visual C++ incluye, entre otras, las siguientes herramientas de desarrollo:

- Editor de texto
- Compilador/Enlazador
- Depurador
- Visor de datos y dependencias (Browser)

El SDK de Windows es un complejo conjunto de funciones que añade numerosas definiciones de tipos de datos nuevos para cualquier programador de C/C++, incluye la librería de clases MFC (Microsoft Foundation Classes) que permite crear y gestionar de manera intuitiva componentes típicos de Windows. Esto es, MFC es una implementación que utiliza el API encapsulando todas las estructuras y llamadas a funciones en objetos fáciles de utilizar. Basándose en la potencia de MFC, Visual C++ se convierte en un generador de programas C++ para Windows.

#### Libdxfrw

*Libdxfrw* es una biblioteca gratuita en C++ para leer y escribir archivos DXF en dos formatos, ASCII y binarios. También puede leer archivos DWG desde la versión R14 a la V2015. Tiene licencia bajo los términos de la Licencia pública general de GNU versión 2.

*libdxfrw* fue creado por colaboradores de LibreCAD<sup>1</sup> en el proceso de creación de mismo. Dado que el código original de SourceForge ya no tiene soporte de los autores originales, este repositorio se ha convertido en su sucesor. Información histórica sobre el proyecto, aún está disponible en la referencia [1], en donde es posible descargar el código fuente.

---

<sup>1</sup> LibreCAD es una aplicación CAD de código abierto gratuita para Windows, Apple y Linux.

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

### Open Water Analytics Stormwater Management Model (OWA-SWMM)

La biblioteca de código fuente SWMM de código abierto mantenido por el grupo Open Water Analytics. SWMM es un modelo de simulación hidrológico-hidráulico dinámico de la calidad del agua. Se utiliza para simulación de un solo evento o a largo plazo (continuo) de la cantidad y calidad de escorrentía de áreas principalmente urbanas, desarrollado originalmente por la USEPA, el código fuente de SWMM está escrito en lenguaje de programación C y se publica bajo una combinación de licencia MIT y dominio público.

La comunidad de desarrolladores de OWA acepta a todo individuo que le guste programar y puede unirse a las discusiones y compartir ideas y código. Es posible extender OWA-SWMM para uso académico, personal o comercial. Al unirse al proyecto es posible plantear problemas en SWMM para el debate de la comunidad, y con estas contribuciones beneficiar a una gran base de desarrolladores y usuarios.

El proyecto OWA-SWMM se basa en las contribuciones presentadas por Lew Rossman con su trabajo original sobre EPA-SWMM5.

#### *Descripción general del kit de herramientas (Toolkit)*

La interfaz de programación de aplicaciones (API) del Toolkit, es una extensión del paquete de simulación SWMM. A través de la API, un desarrollador puede hablar mediante programación con SWMM antes, durante y después de una simulación. La API expone el modelo de datos de SWMM que permite nuevas posibilidades.

La API de Toolkit proporciona una serie de funciones que permiten a los programadores personalizar el uso del motor de soluciones hidráulico y de calidad del agua de SWMM para sus propias aplicaciones. Antes de usar el Toolkit, debe familiarizarse con la forma en que SWMM representa las superficies hidrológicas, la red hidráulica, el diseño y la información operativa que requiere para realizar una simulación. Esta información se puede obtener leyendo los manuales de usuario de SWMM USEPA [2].

Un procedimiento típico del uso de las funciones del kit de herramientas para analizar una red de aguas pluviales es el siguiente:

- Utilice la función **swmm\_open** para abrir el sistema Toolkit, junto con un archivo de entrada SWMM.
- Use **swmm\_setxxxParam** para actualizar los parámetros antes de comenzar una simulación
- Utilice la función **swmm\_start** para iniciar la simulación.
- Iterar sobre la simulación usando la función **swmm\_step** y salir del bucle cuando se devuelve un 0. Mientras se ejecuta la simulación, use **swmm\_getxxxResult** o **swmm\_getxxxStats** para leer los resultados.
- Utilice la función **swmm\_end** para finalizar una simulación y guardar los resultados.
- Utilice la función **swmm\_close** para cerrar la simulación y liberar la memoria asignada de la simulación.

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

En la Figura 1 se muestra de manera general un fragmento de código que ilustra como usar el Toolkit.

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

#include "swmm5.h"
#include "toolkitAPI.h"

long newHour, oldHour = 0;
long theDay, theHour;
double elapsedTime = 0.0;

char *inputFile;
char *reportFile;
char *binaryFile;

inputFile = "<path2>/inputfile.inp";
reportFile = "<path2>/reportfile.rpt";
binaryFile = "<path2>/outputfile.out";

// Open the files & read input data
ErrorCode = swmm_open(inputFile, reportFile, binaryFile);

// Run the simulation if input data OK
if ( !ErrorCode )
{
    int ndType;
    double depth = 0;

    swmm_getNodeType(0, &ndType);

    printf("Node Type: %d", ndType); \\ Print node type (See SM_NodeType)

    // Initialize values and Start the Simulation
    ErrorCode = swmm_start(TRUE);

    // Execute each time step until elapsed time is re-set to 0
    if ( !ErrorCode )
    {
        do
        {
            ErrorCode = swmm_step(&elapsedTime);

            swmm_getNodeResult(0, SM_NODEDEPTH, &depth) \\ Stream Results!

            printf("Node Depth %lf", depth); \\ Print node result (See SM_NodeResult)

        } while ( elapsedTime > 0.0 && !ErrorCode );
    }
    // Clean up
    ErrorCode = swmm_end();
}

// Get Stats for Node
SM_NodeStats* Node0Stats;
swmm_getNodeStats(0, &Node0Stats);

printf("Node Max Depth %lf", Node0Stats->avgDepth);

// Report results
swmm_report();

// Close the system
swmm_close();

```

*Figura 1. Como usar el Toolkit*

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

La información descrita anteriormente, referente al API de Toolkit de SWMM5.1, se ha tomado de la referencia [3].

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO

Es una cuenca urbana con drenaje combinado de La Ciudad de México, las tormentas de diseño que se usaron para el análisis hidrológico de la cuenca en estudio se obtuvieron a partir de los registros de la estación climatológica COYOL, muy cercana a la cuenca de estudio, para periodos de retorno de 5 y 10 años, y duraciones de tormentas de 60 y 120 minutos.

Construcción del Modelo Dual. Las subcuencas representan las casas o predios con un total de 690, las de Infraestructura con un total de 12, las de calles con total de 345 y 2 cuencas vecinas. La red superficial formada por las cunetas consta de 843 *Junctions* que representan puntos del sistema mayor, de los cuales 623 representan las coladeras de banqueteta del sistema de captación. Los tramos de cunetas son un total de 807 elementos tipo *Conduit*.

Sistema de drenaje combinado. El modelo incorpora un total de 582 *Junctions* que representan nodos de la red de drenaje, solo 158 representan los pozos de registro, los restantes 424 son nodos auxiliares usados para la descarga de subcuencas de casas y coladeras de banqueteta. Se ha empleado un total de 593 elementos tipo *Conduit*. Se cuenta con 623 coladeras de banqueteta, que se modelan con un conducto tipo *OutLet*.

Los criterios utilizados para formular el modelo de Drenaje Dual fueron adoptados principalmente de las referencias: [4] y [5], el comportamiento hidráulico de las coladeras de banqueteta se basó en lo propuesto en la referencia [6]. Una descripción más detallada de la construcción del modelo Dual de esta cuenca de estudio se encuentra en la referencia [7].

## 2.3 DESARROLLO DE LA APLICACION CAD2SWMM

Esta aplicación gráfica que hemos llamado *Cad2Swmm*, nos permite generar el modelo a partir de la importación de los datos de un archivo DWG, el cual contendrá todos los datos concernientes a los objetos físicos del proyecto, tales como tuberías, pozos, cunetas, subcuencas, descarga de subcuencas, coladeras o imbornales, entre otros. Lo anterior debido a que es mucho más fácil y práctico detallar el modelo en el dibujo CAD, pues sus herramientas de dibujo son más potentes y avanzadas para dibujar con precisión los objetos del modelo y porque además la gran mayoría de los proyectos se generan en CAD, por lo que, de entrada, ya se contará con el dibujo y por lo tanto con gran parte del modelo, simplemente habrá que prepararlo ajustando ciertas propiedades y generando otros objetos, tales como las subcuencas.

*Cad2Swmm* cuenta con su propia interfaz gráfica que representará los objetos importados en la medida que estos sean extraídos del dibujo, lo que permitirá visualizarlos y detectar errores, los elementos del dibujo estarán organizados en capas o layers adecuados a su naturaleza, tales como: nodos, conductos, subcuencas, coladeras, entre otros. Una vez que se extraigan exitosamente los objetos del dibujo, *Cad2Swmm* podrá generar el archivo de texto con extensión INP con toda la información importada desde el dibujo CAD.

*Cad2Swmm* extrae los objetos a partir de su capa, por lo que el dibujo deberá estar debidamente preparado, siguiendo el criterio de usar una capa diferente para cada tipo de objeto, al extraer los objetos de una capa y de acuerdo con el tipo de elementos contenidos

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

en esta, podrán asignarse propiedades comunes a todos estos objetos, por ejemplo para conductos: el coeficiente de rugosidad, el diámetro, entre otros, para subcuencas: su ancho y su pendiente, y en general para cualquier grupo de objetos: etiquetas o Tags los cuales resultarán sumamente útiles, ya que una vez generado el modelo, podremos realizar cambios masivos a las propiedades de dichos objetos con las funciones gráficas de EPA SWMM. Un procedimiento más detallado para realizar la preparación del archivo DWG y la importación con *Cad2Swmm* se puede obtener de la referencia [7].

Para el desarrollo de *Cad2Swmm* se usó *Visual C++* y la librería *libdxfrw*, que como se describió, se usa entre otras cosas para leer archivos DWG y generar archivos DXF, sin embargo, se adaptó el código para que, a partir de los datos espaciales obtenidos desde el archivo DWG, generar el archivo INP de entrada para SWMM5.1

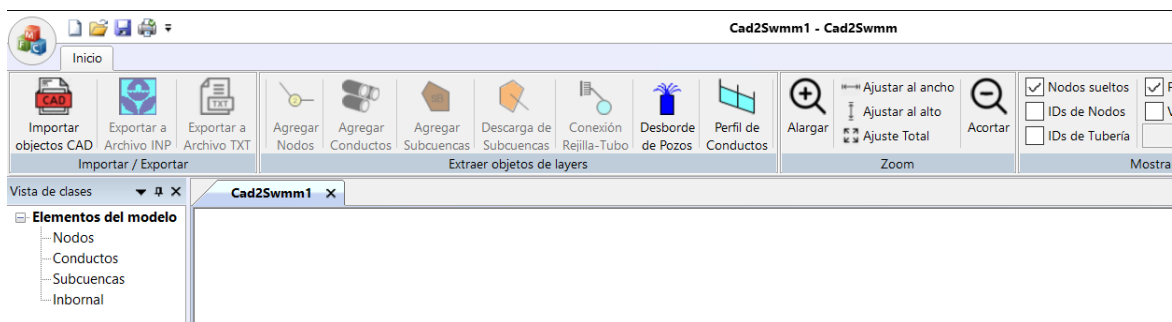


Figura 2. Interfaz gráfica de *Cad2Swmm*

En la Figura 2 se muestra parte de la interfaz gráfica de *Cad2Swmm*

## 2.4 DESARROLLO DE LA APLICACION SWMMSIMULATOR

La aplicación gráfica que hemos llamado *SwmmSimulator* y que hace uso de la API de SWMM, con ello logra acceso entre otras cosas al proceso de análisis, los datos y resultados de todos sus elementos, se colectan los resultados que corresponden a los intervalos de reporte de cunetas y sus nodos, obteniendo los datos para alimentar una simulación y mostrar gráficamente el proceso del flujo en cunetas y su encharcamiento. La aplicación carga el archivo de extensión INP del modelo en SWMM y realiza el análisis numérico que recolectará los resultados, los cuales representará gráficamente simulando el proceso de encharcamiento, mostrará a escala la red de cunetas y su espejo de agua, en donde al correr la simulación se puede apreciar el proceso de encharcamiento de todas las calles y cunetas.

Para el desarrollo de *SwmmSimulator* se hizo uso de *Visual C++* y la librería API de Toolkit de SWMM5.1, que se describió en la sección 2.1. Sus funcionalidades se resumen de la siguiente forma:

Al lanzar *SwmmSimulator* y una vez mostrada su interfaz gráfica ejecutamos la función “*Cargar modelo SWMM*”, con lo cual se desplegará un explorador de archivos que nos permitirá navegar por el sistema de archivos y localizar el archivo INP que contiene el modelo, una vez localizado y seleccionado el archivo daremos clic al botón “*Abrir*”, con lo que se cargará el modelo y se mostrará en la interfaz gráfica la red de cunetas y rejillas pluviales.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Con el comando “*Realizar Análisis*”, se inicia el proceso de análisis hidráulico del modelo con el motor de cálculo de SWMM5.1 al que hemos extendido su funcionalidad con el API de SWMM5.1, proceso que tomará un tiempo similar al que toma el análisis con la interfaz de SWMM5.1, con ello y durante este proceso, *SwmmSimulator* filtrará y recolectará los resultados del cálculo hidráulico de nodos de cunetas, cunetas y rejillas pluviales, que servirán como datos para generar la simulación gráfica.

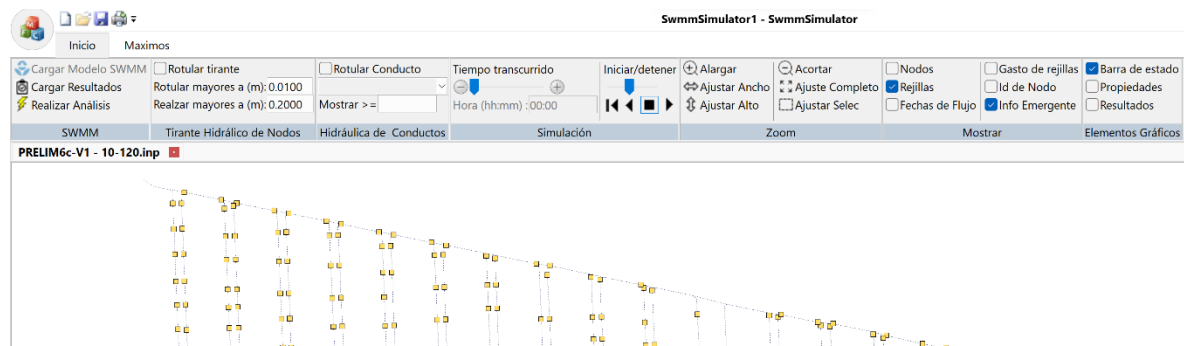


Figura 3. Interfaz gráfica de *SwmmSimulator*

Una vez concluido el análisis del modelo podremos realizar el proceso de simulación, presionado “Play” del panel Simulación, comenzarán a visualizarse a escala, en las cunetas del modelo la formación del espejo del agua, el cual variará entre intervalos de tiempo de acuerdo a los resultados del análisis, su representación se hace empleando una gama de color azul, sin embargo cuando el tirante resulta mayor al valor configurado, estos tramos de cuneta comenzarán a ser representados con una gama de color rojo, siendo los de color más oscuro los de tirante mayor. Con las opciones “Rotular tirante” y “Rotular conducto”, se rotula el valor del tirante de los nodos y diversos valores numéricos de las cunetas.

### 3. RESULTADOS

Análisis, resultados y errores de continuidad. Los errores de continuidad resultan aceptables para nuestro modelo, pues el máximo resulta de 1%.

Calibración cualitativa y validación del modelo. La calibración realizada fue cualitativa y el procedimiento que se siguió fue hacer variar algunas propiedades de las subcuencas y conductos, con la aplicación *SwmmSimulator*, se logró la representación gráfica del proceso de encharcamiento y la obtención de tirantes máximos en las cunetas de calles.

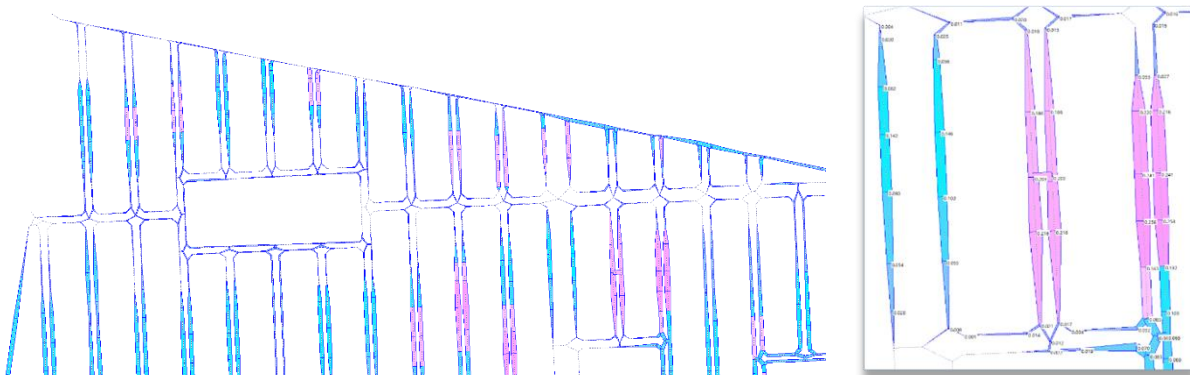


Figura 4. Muestra de simulación gráfica

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

## 4. CONCLUSIONES

El uso del Modelo Dual de Drenaje puede aplicarse en sistemas de drenaje Urbanos de gran complejidad, como las que cuentan con redes interconectadas, en las que resulta importante tomar en cuenta la capacidad de regulación que proporciona la red de cunetas y el flujo superficial, antes de ser interceptado por las estructuras de captación.

El uso del modelo dual permite conocer el tirante, el ancho del espejo del agua y velocidad del flujo en cualquier punto de la red de cunetas, lo que permite la revisión de estos con fines de seguridad para la circulación de peatones y vehículos, así como evitar valores excesivos de encharcamientos o inundaciones.

El nivel de detalle, así como el tiempo empleado en la creación de los elementos del modelo del modelo Dual en comparación con el modelo tradicional es muy alto, pues requiere de un conocimiento más amplio de la cuenca de estudio, situación que hace deseable la creación de software de apoyo como el expuesto en este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] S. José F., «C++ library to read/write DXF files in binary and ascii form and to read DWG from r14 to v2015,» SourceForge, 2011 - 2015. [En línea]. Available: <https://sourceforge.net/projects/libdxfrw/>.
- [2] R. Lewis A., Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, EPA- 600/R-14/413b ed., Cincinnati, OH 45268: U.S. Environmental Protection Agency EPA, 2015.
- [3] R. Lewis, D. Robert, T. Michael, M. Bryant E., E. Adam, S. Hatchett y P.- C. Gonzalo, «Open Water Analytics Stormwater Management Model,» Open Water Analytics, 2016. [En línea]. Available: <http://wateranalytics.org/Stormwater-Management-Model/index.html>.
- [4] M. Gómez V, Hidrología Urbana, Barcelona: Flumen, 2007.
- [5] A. Múrcia B y M. Gómez V, Estudio de la cuenca de La Riereta en Sant Boi de Llobregat mediante un modelo de drenaje utilizando SWMM 5, Barcelona España: Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [6] FHWA, Urban Drainage Design Manual, third edition ed., U.S Department of transportation, Federal Highway Administration, 2009.
- [7] J. Peña Calva y R. Cagigas Velásquez, «Modelación dual de una red de drenaje pluvial urbano teniendo en cuenta el escurrimiento superficial en las calles y la eficiencia de estructuras de captación,» Repositorio Facultad de Ingeniería UNAM, 2022. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/18202>.