

## Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara.

Carlos Lázaro Castillo García e-mail: ccgarcia@uclv.cu  
Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba

Tomás Díaz Pérez e-mail: tomas.diaz@giat.cu  
OSDE Gestión Integrada de Aguas Terrestres, La Habana, Cuba.

Lamberto Álvarez Gil e-mail: lambertag@uclv.edu.cu  
Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba.

Michael Álvarez Gonzáles e-mail: michael@vc.hidro.cu  
Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC), Santa Clara, Cuba.

### RESUMEN

En la presente investigación se propone una estrategia para el diseño de Sistemas de Drenaje Urbano a partir de la aplicación de nuevos conceptos basados en softwares especializados para su modelación y análisis, utilizando como caso de estudio la ciudad de Santa Clara. El objetivo principal de la estrategia es la elaboración de propuestas de solución integrales a los lugares más afectados por inundaciones. Los resultados obtenidos permiten reconocer la existencia en la ciudad de 66 Áreas Hidrológicas Urbanas, de las cuales son de interés un total de 24, y se propone como solución integral 16 Sistemas de Drenaje Urbano, con una longitud total de su trazado de 40,69 km y teniendo un impacto directo en 42 Puntos Críticos de Drenaje en la ciudad.

**Palabras clave:** área hidrológica urbana, hidrología urbana, punto crítico, sistema de drenaje urbano, vaguada crítica.

## Strategies for the design of urban drainage systems in Santa Clara City

### ABSTRACT

This research proposes a strategy for the design of Urban Drainage Systems based on the application of new concepts based on specialized software for its modeling and analysis, using the city of Santa Clara as a case study. The main objective of the strategy is to prepare comprehensive solution proposals for the places most affected by floods. The results obtained allow recognizing the existence in the city of 66 Urban Hydrological Areas, of which a total of 24 are of interest, and 16 Urban Drainage Systems are proposed as an integral solution, with a total length of its layout of 40.69 km and having a direct impact on 42 Critical Drainage Points in the city.

**Keywords:** urban hydrological area, urban hydrology, critical point, urban drainage systems, critical stream.

## **INTRODUCCIÓN**

El crecimiento urbano desordenado está considerado como un problema medioambiental y social importante, el cual repercute directamente en los proyectos de infraestructura hidráulica esenciales para la vida en las ciudades. Según Puga (2008) los proyectos de sistemas de aguas en urbanizaciones con desarrollo mal planificados requieren de inversiones sustanciales, debido a que se necesita ampliar una red existente en base a los requerimientos de la nueva área urbanizada. Esta situación de descontrol no solo es característica de países subdesarrollados, existen ejemplos muy marcados en Estados Unidos y España en los que, debido al elevado costo de ampliar las redes en este tipo de urbanización, los precios de las viviendas ascienden considerablemente. La situación se agudiza cuando las urbanizaciones obstruyen el cauce natural de ríos y arroyos lo que provoca inundaciones peligrosas tanto para la vida de los residentes como para sus pertenencias materiales.

En la actualidad existen varios softwares que utilizan modelos matemáticos para solucionar ecuaciones de alta complejidad relacionadas con el proceso lluvia-escurrimiento-tránsito-hidrograma en un sistema de drenaje, generalmente estas ecuaciones responden al flujo no permanente en conductos a lámina libre y son llamadas las ecuaciones de Saint-Venant en 1D cuyas soluciones pueden obtenerse mediante métodos numéricos usando los modelos de onda dinámica, cinemática o difusa (Chow 1994), estas, junto con el patrón de lluvia-escurrimiento adoptado, brindan una aproximación conceptual bastante acertada. En hidrología urbana los modelos más utilizados son EPA SWMM, Storm and Sanitary Analysis y SewerGEMS. En el caso de estudio se adopta el programa Storm and Sanitary Analysis 2015 el cual es un paquete complementario de AutoCAD Civil 3D 2015, quien también posee otros módulos adicionales ampliamente usados a nivel mundial para la concepción y el diseño de redes de drenaje pluvial.

Se parte del hecho de que la información hidrológica de la ciudad es escasa y la poca que existe está desactualizada, lo que provoca que los cálculos hidrológicos tengan que ejecutarse con sumo cuidado, y que en puntos críticos, converjan dos situaciones que obstaculizan el drenaje natural y provoquen serias inundaciones con alto costo material tanto para la sociedad, como para el país; la primera se asocia más a condiciones naturales, al poseer cotas bajas, donde confluyen las aguas, y la segunda a la acción del hombre, al ser zonas donde se acumulan grandes cantidades de desechos sólidos y orgánicos. El entorno se afecta también por el efecto de una mala planificación urbana, que ha provocado la limitación e incluso desaparición, de los registros de limpieza de sistemas de drenaje artificiales de la ciudad; hallándose afectado además arroyos y ríos por la indisciplina de las instituciones y la población que ha desaparecido o reducido sus secciones y cauces naturales; vinculándose a este hecho desfavorable, la limitada cultura ambiental y la existencia de una deficiente red pluvial, que no cubre las necesidades de una urbanización mucho más compleja que para la cual fue diseñada.

A partir de la difícil situación existente es necesario concebir una estrategia unificada para el diseño de sistemas de drenaje urbano (SDU) en la ciudad, aplicando para su concepción, herramientas de diseño y modelación matemáticas que permitan la toma de decisiones acertadas en la elaboración de proyectos de Ingeniería Básica afines.

## **METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ESQUEMA TECNOLÓGICO DE LA ESTRATEGIA**

El estudio del drenaje pluvial se asienta en la actualidad en dos ramas fundamentales; la aplicación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en nuevos condominios residenciales, y métodos tradicionales adoptando medidas estructurales y no estructurales en

urbanizaciones existentes; en la actualidad ambas tendencias son combinadas con el propósito de lograr la mayor eficiencia de la infraestructura pluvial. La Hidrología Urbana es la ciencia que se encarga de estudiar los procesos de lluvia-escorrentía en estos entornos, y generalmente, la Hidráulica de Canales es la ciencia que se dedica al estudio del tránsito-hidrograma mediante estructuras de conducción-deposición.

### **Medidas estructurales, no estructurales y principios de diseño aplicados**

Tucci (2007) expone que las medidas para el control de inundaciones pueden ser del tipo estructural y no estructural. Las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial a través de obras en la cuenca (medidas extensivas) o en el río (medidas intensivas). Las medidas no estructurales son aquellas en que los perjuicios son reducidos por la mejor convivencia de la población con las crecidas, a través de medidas preventivas como la alerta de inundación, la zonificación de las áreas de riesgo, el seguro contra inundaciones, y las medidas de protección individual.

Es muy difícil lograr que una sola medida estructural resuelva el problema de drenaje en una urbanización determinada, por eso es que según Bertoni en Martina et al. (2015), las medidas estructurales nunca son proyectadas para dar una protección completa y total, ya que ello exigiría construir obras que aseguraran el resguardo aún frente a la mayor crecida posible, lo cual suele resultar física y económicamente inviable.

A partir de lo anterior, es imprescindible complementar las obras con la adopción de medidas no estructurales. Hasta hace unos años se creía, de manera errónea, que la solución a los problemas de las inundaciones era dada exclusivamente por obras de ingeniería, tales como canales, conductos, alcantarillas, diques laterales de protección y presas. Actualmente ya no existen dudas de que ninguna obra podrá funcionar, tal como originalmente fue prevista, si junto a la misma no se implementa también un conjunto de medidas no estructurales (Martina et al. 2015).

Desde el año 1969, Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD), manifestó varios principios generales para seguir en los procesos de concepción y diseño de drenajes pluviales. (UDFCD 2016):

- Regionalidad: El drenaje es un fenómeno regional que no depende de los límites políticos, jurisdiccionales ni de propiedades.
- Infraestructura: El Sistema de Drenaje Urbano es un subsistema de la infraestructura hidráulica y de los recursos hidráulicos de una ciudad.
- Discretización: Toda área urbana parte de una subcuenca que a su vez pertenece a otra cuenca de mayor orden que conforma el sistema natural de drenaje, por la cual se deben realizar todos los planes de desarrollo y diseño de una correcta infraestructura.
- Precipitación: La lluvia es una propiedad primaria del lugar y el momento determinado.
- Integralidad: El planeamiento y diseño de sistemas de drenaje urbanos nunca puede ser basado en la premisa de que resolver un problema pueda trasladar el problema hacia otro lugar.
- Manejo: Una estrategia de drenaje urbano debe ser considerada multi-objetiva y multi-activa a lo largo de su vida.
- Sistemas: El diseño de un sistema de drenaje debe ser considerado en función al sistema de drenaje existente.

- **Protección:** En relación con el desarrollo de urbanizaciones existentes, los esfuerzos para sistemas de drenaje deben estar basados en minimizar los incrementos de volúmenes de lluvia, y disminuir los volúmenes en puntos críticos.
- **Vertimiento:** El sistema de drenaje urbano debe ser considerado a partir del punto de vertimiento de proyecto, emitiendo las consideraciones pertinentes aguas abajo de ese punto y los efectos que provocan el nuevo flujo entrante en el sistema natural de desagüe.

Los autores mantienen una posición firme con respecto al cumplimiento de los principios del UDFCD y manifiestan que estos deben ser complementados con otros más específicos relacionados con el objeto de estudio, los cuales deben ser aprobados por los organismos e instituciones involucrados en el proyecto y deben ser de conocimiento público.

### **Ubicación de la zona de estudio y caracterización físico-geográfica e hidrológica**

La ciudad de Santa Clara se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas; Universales: 22°24'24"N 79°57'11"O; Sistema Cuba Norte basado en la proyección cónica conforme de Lambert: Norte 284 000 a 289 500 y Este 600 046 a 609 000.

Según proyectos relacionados con la ciudad de Santa Clara, elaborados por varios especialistas de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, las rocas sobre las cuales se asienta la ciudad tienen una antigüedad de aproximadamente 60 a 65 millones de años. Gran parte de la urbe se encuentra encima del macizo serpentínico de Cuba Central, de edad Cretácico Superior, que está compuesto por una roca serpentinita, roca metamórfica de color azul grisáceo de brillo aceitoso, que se observa en el área del complejo "Abel Santa María". Todos los repartos que se encuentran al Sur de la Línea del Ferrocarril Central poseen este tipo de roca. La otra parte de Santa Clara, al Norte del Ferrocarril que incluye los Repartos Libertad, Minerva, Camacho, Santa Catalina y Capiro, están sobre un paquete de rocas sedimentarias en los que predomina la roca caliza de colores claros y otras variedades de ellas como son las areniscas calcáreas (calizas con arena). Este tipo de rocas se observa perfectamente en la Loma del Capiro.

Se presenta un relieve articulado, de elevaciones bajas a llano. Las cotas oscilan entre 179 msnm y 75,37 msnm. Dentro de la ciudad predomina un relieve de llanuras erosivas muy disecionadas, con pequeñas ondulaciones. El paisaje está fuertemente modificado por la asimilación antrópica, sin mantener detalles del paisaje original.

La combinación de este tipo de relieve con la geología natural predominantemente impermeable, con bajas tasas de infiltración, y las diferencias de nivel entre las elevaciones donde surgen las principales redes hidrográficas y el llano por el cual fluyen, provoca de que en la ciudad exista una amplia red de cañadas, vaguadas y arroyos tributantes a los ríos Bélico y Cubanicay, por las cuales el flujo superficial excedente de la lluvia es transportado hacia ellos (Causas naturales).

La precisión de los planos topográficos para el estudio del drenaje es considerada de acuerdo al nivel de proyecto que se trabaja. Para estudios iniciales en Ideas Conceptuales la escala máxima adecuada es 1:10 000 según CNA (2015). Dentro de los datos de topografía se debe incluir el catastro de la ciudad y detalles específicos necesarios para definir correctamente los parteaguas de escurrimiento. Para la ciudad de Santa Clara se cuenta con el plano 1: 10 000 con el cual se definen las Áreas Hidrológicas Urbanas y con un levantamiento digital del terreno (DEM) elaborado por la empresa GEOCUBA.

El escurrimiento de la ciudad está marcado por la presencia de las cuatro vertientes fundamentales:

- Afluentes del río Ochoa (VO): Es la vertiente Oeste de la ciudad la cual incluye los consejos populares, Sandino, Brisas del Capiro, Escambray, los repartos ubicados en la Carretera de Camajuaní, zonas aledañas a la sede Félix Varela de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, entre otros.
- Río Cubanicay (VC): Sistema afluente al río Bélico aledaño al centro de la ciudad, en el convergen todas las vaguadas de la divisoria Cubanicay-Ochoa y Cubanicay-Bélico, incluye los Consejos Populares de Vigía, Bengochea, Capiro, Zona Hospitalaria, Santa Catalina y parte de la Zona Centro del casco histórico.
- Río Bélico (VB): Corriente principal de la cuenca homónima, fluye por el centro de la ciudad, prácticamente paralelo al río Cubanicay, convergen las aguas de la divisoria Cubanicay-Bélico y Bélico-Carrascal, incluye los Consejos Populares de la Zona Central tributantes, Condado Norte, Condado Sur, Libertad, Camacho, Dobarganes entre otros.
- Arroyo Carrascal (VJM): Es un afluente del río Bélico cuya unión se produce cerca de la zona industrial de la ciudad, comúnmente es conocido como el río de José Martí (debido al nombre del Consejo Popular por el cual atraviesa), presenta como tributantes los repartos Virginia y José Martí.

Los datos hidrológicos necesarios para la elaboración de las propuestas de soluciones son obtenidos a partir del estudio de los patrones de precipitación de la ciudad, en caso de nivel de Ideas Conceptuales, el estudio no es necesario si se tienen relaciones de Intensidad-Frecuencia-Duración (IFD) elaboradas con anterioridad. En niveles superiores de proyecto es necesaria la revisión de las curvas IFD y en caso de poseer más de diez años de creadas, proceder a su actualización en correspondencia con las recomendaciones dadas por la Organización Meteorológica Mundial en su Manual de Prácticas Hidrometeorológicas. En este trabajo se utilizan las curvas IFD para la región central, elaboradas por Ing. Diego Emilio Abreu Franco, Ing. María P. Darias Navarro, Ing. Pedro M. Santana Jiménez del año 2009.

### **Condiciones actuales del drenaje pluvial en la ciudad**

La situación actual de la ciudad con respecto a su drenaje pluvial es muy compleja, varios proyectos elaborados en la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (EIPH VC) hacen mención de las causas que provocan las inundaciones en la urbe. Una característica importante de estas avenidas es que no necesariamente dependen de eventos extremos como lluvias de tormenta tropicales o huracanes, simples lluvias convectivas o de verano, son detonantes de que en ciertos puntos vulnerables exista una acumulación considerable de volúmenes de escurrimiento, debido a la incapacidad de las redes naturales y artificiales para evacuar los gastos.

A partir del estudio de estos proyectos, complementados por los recorridos realizados en la elaboración de este trabajo, sumando además las experiencias internacionales y nacionales, así como las encuestas a pobladores residentes cercanos de los puntos más complejos, se presentan a continuación un resumen de las causas antropogénicas fundamentales que provocan la situación existente: deficiente planificación urbana, indisciplina urbanística, falta de control de las autoridades competentes, falta de previsión, deficiente infraestructura de drenaje existente,

entubamiento indiscriminado de cañadas, falta de mantenimiento del drenaje existente, falta de cultura medioambiental, indisciplina social asociada a vertimientos de residuos, conexiones ilegales de alcantarillados domésticos a redes pluviales. Un ejemplo de la combinación de varias causas antropogénicas se muestra en la figura 1. Las causas antropogénicas y naturales, estas últimas definidas anteriormente, son la plataforma principal para un posterior estudio de medidas no estructurales aplicables a cada sistema de drenaje urbano propuesto en este trabajo.



**Figura 1: Ejemplos de cañadas afectadas por el crecimiento urbanístico en la ciudad de Santa Clara. (Fuente: Elaboración Propia)**

Atacar las causas desde la raíz es una premisa fundamental para el diseño del nuevo Plan Integral de Manejo de Aguas Pluviales de la ciudad de Santa Clara. Es complejo, desde el punto de vista práctico, emitir especificaciones o normas generales de cómo proceder en cada Consejo Popular o en cada cañada, pues todos los lugares poseen características propias. Sin embargo, este trabajo golpea directamente a la causa relacionada con la falta de infraestructura, mediante el diseño de un esquema tecnológico de medidas estructurales el cual es parte insoslayable de la estrategia adoptada para la solución de los puntos donde la situación de drenaje sea más difícil. Estas medidas, por si solas, no resuelven una situación determinada, para ampliar la concepción del alcance se hace necesario redimensionar la definición de Sistema de Drenaje Urbano, cuyo concepto se brindará posteriormente. Para obtener una metodología eficaz, el análisis exhaustivo del lugar y las condiciones naturales existentes es parte esencial de un buen redimensionamiento del problema y a partir de ello se propone entonces la respuesta acertada.

## **ANÁLISIS DEL ESQUEMA TECNOLÓGICO PARA LA ESTRATEGIA DE CONCEPCIÓN DE MEDIDAS ESTRUCTURALES APLICADA**

Un esquema tecnológico es el conjunto de etapas necesarias para idear, diseñar y producir un bien o servicio que pretenda solucionar un problema o satisfacer una necesidad. Sin embargo, bajo este criterio, es necesario introducir nuevos conceptos ajustados a las necesidades del estudio, los cuales pretenden ampliar el campo de aplicación de la estrategia para otras ciudades con características similares.

### **Conceptos adoptados en la estrategia de concepción de medidas estructurales**

Se utiliza el principio general de discretización de allí que se emplea en el trabajo el concepto de “microcuenca” como parte de un elemento más general “la subcuenca”, y a su vez de la “cuenca hidrográfica”, esta es una característica propia de la morfología de las redes fluviales y que en muchos casos influye directamente en la adopción de modelos de lluvia-escurrimiento, un

ejemplo recurrente es los límites de aplicación de la fórmula Racional, varios autores recomiendan solo su uso en cuencas pequeñas con diferentes rangos de áreas que varían desde los 5 km<sup>2</sup> hasta los 12 km<sup>2</sup> como máximo, incluso más como expresa Chow et al. (1994).

El estudio del drenaje de la ciudad de Santa Clara parte de la cuenca a la cual pertenece, las subcuencas que tributan al sistema principal y las microcuencas aportantes a cada una, para definir estos elementos se establece el punto de cierre de la cuenca del río Bélico, en el puente ferroviario al Norte de la Circunvalación, ubicado en las siguientes coordenadas: N, 289 590; E, 604 999. Esta misma red ferroviaria también cierra el río de José Martí en las coordenadas: N, 289 375; E, 601 526. La línea de corriente principal de la cuenca es el río Bélico, mientras que los ríos Cubanicay y José Martí son los afluentes más importantes cuyas áreas de aporte son consideradas subcuencas. Para definir los límites de la cuenca del río Bélico y las subcuencas José Martí y Cubanicay se emplea el software AutoCAD Civil 3D 2015 y la herramienta "Catchments" con la ayuda del plano 1:10 000 para aquellas zonas fuera del alcance del DEM.

A partir de la relevancia del factor Área de Aporte en la fórmula Racional; combinando la definición de microcuenca, de la cual es necesario tomar los parámetros fundamentales para la obtención de la lluvia de proyecto; además de la intervención del hombre con infraestructuras que cambian el curso del drenaje natural; surge el concepto de Área Hidrológica Urbana (AHU).

Un Área Hidrológica Urbana es la adaptación del concepto de microcuenca en ambientes urbanos, es definida como aquella área tributante a una vaguada principal cuyo vertimiento ocurre en el sistema fluvial primario de la cuenca o la subcuenca a la que pertenece. Se consideran AHU también a aquellas laderas de los sistemas fluviales sin presencia de vaguadas, ambas tipologías con una superficie superior a las 5 ha. La construcción del AHU tiene como premisas fundamentales que sus límites no dependen de los Consejos Populares ni de zonas específicas, su trazado se realiza a partir de la vaguada principal objeto de estudio y las obras lineales como carreteras, autopistas y redes ferroviarias con presencia de drenajes, pueden ser consideradas límites de sectores dentro de una propia AHU.

Este concepto discretiza la red de drenaje natural de la ciudad en 66 AHU, de ellas solo seis son tipo laderas, a las cuales no es necesario la imposición de medidas estructurales; las restantes 60 en su totalidad poseen vaguadas principales que, en algunos Consejos Populares, principalmente en la Zona Centro, son entubadas. Cada vaguada posee características inherentes a su Área Hidrológica Urbana, sin embargo, el nivel de afectaciones provocadas por el hombre es directamente proporcional a la densidad de población que habita alrededor de ella como se observa en la figura 2; entre las menos afectadas está la cañada de Sub-Planta cuyo cauce principal recorre 2,5 km desde su nacimiento, en el cementerio de la ciudad, hasta su punto de cierre en el Ferrocarril Circunvalante del Norte, una de las más afectadas es la cañada de Dobarganes cuyo cauce recorre 0,5 km desde su nacimiento en el Museo Provincial Abel Santamaría hasta su punto de cierre en su unión con el río Bélico.

La Vaguada Crítica es la cañada principal del Área Hidrológica Urbana en estudio, donde generalmente se encuentran los Puntos Críticos de drenaje, aunque en ciertos lugares estos puntos pueden estar ubicados en vaguadas secundarias, la Vaguada Crítica es la que proporciona los datos morfométricos necesarios para el cálculo de la intensidad máxima de precipitación de la fórmula Racional, en caso de que no exista la vaguada principal como son las AHU de laderas, estos datos son obtenidos del AHU típica más cercana. Los parámetros principales que son evaluados en las AHU son: Área (km<sup>2</sup>, ha), Longitud de Vaguada Crítica (km, m), Pendiente Media de Vaguada Crítica (m/m, %).

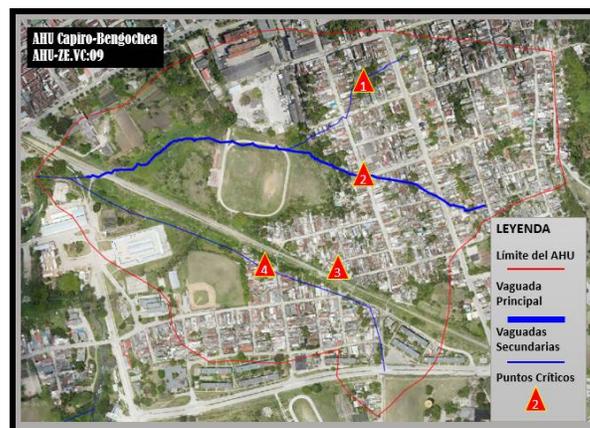


**Figura 2: Áreas Hidrológicas Urbanas de Sub-Planta y Dobarganes. (Fuente: Elaboración Propia)**

El estudio de los casos más complicados tiene que partir necesariamente de puntos conocidos donde ocurran inundaciones frecuentes; el análisis de los proyectos elaborados en la EIPH VC, sobre todo las I.C Drenaje Pluvial Santa Clara de 2010 y el plano georreferenciado de 2014 con la recopilación de soluciones propuestas en el período comprendido entre 2006 y 2012; el documento “Puntos Críticos de Drenaje de la ciudad de Santa Clara” elaborado en 2019 por el MSc. Ing. Tomás Díaz Pérez Delegado de Recursos Hidráulicos de la Provincia de Villa Clara, recopilación de las principales demandas de pobladores y organismos; además de estudios presenciales realizados en el transcurso de los meses de agosto y diciembre de 2019 por el autor de este trabajo, con la colaboración de varios ingenieros involucrados en los estudios de hidrología y topografía de la ciudad; son los antecedentes para la definición de los Puntos Críticos.

Un Punto Crítico es el lugar o zona puntual en donde el drenaje, tanto natural como artificial, es afectado por causas antropogénicas; lo que provoca la acumulación de considerables volúmenes de escorrentía pluvial que no son evacuados eficientemente por los sistemas existentes y provocan inundaciones, causando la incomodidad y quejas de los residentes afectados.

En la figura 3 se observa la aplicación de los conceptos de Área Hidrológica Urbana, Vaguada Crítica y Punto Crítico en los Consejos Populares Capiro y Bengochea:



**Figura 3: Área Hidrológica Urbana Capiro-Bengochea. (Fuente: Elaboración Propia)**

Para solucionar o mitigar los efectos de las inundaciones es necesario reelaborar el concepto de Sistema de Drenaje Urbano y ampliarlo al punto que permita, no solo la aplicación de medidas estructurales, soluciones ingenieriles u otra obra física, sino además crear una estructura sólida de medidas no estructurales que acompañen su campo de acción. Para ello se propone la siguiente definición.

Un Sistema de Drenaje Urbano (SDU) es el conjunto de medidas estructurales y no estructurales aplicadas a una o varias Áreas Hidrológicas Urbanas, cuyo objetivo fundamental es la mitigación del impacto de lluvias intensas en los Puntos Críticos definidos y Vaguadas Principales y Secundarias, con lo cual se pretende el bienestar económico y social de la comunidad junto con su convivencia con eventos extremos. Un SDU está compuesto por:

- Red Natural de Drenaje (RDN): En las AHU esta red viene representada por las vaguadas principales y secundarias, a las que se adiciona los vertimientos de las mismas en los cuerpos receptores fluviales.
- Red Artificial de Drenaje (RAD): Son presentadas en este estudio como la nueva red diseñada y la red artificial existente, así como sus vertimientos en los cuerpos receptores fluviales.
- Estructuras de cruce de aguas (ECA): Obras como puentes y alcantarillas cuyo objetivo es proporcionar la vía de cruce necesaria para personas y vehículos.
- Estructuras de mitigación de avenidas (EMA): Aplicables en puntos específicos donde sean necesaria la reducción de gastos o la acumulación de volúmenes. En esta investigación se emplea la estructura de bypass para dividir el flujo de un colector o cañada con alto gasto de diseño.
- Plan de Gestión de Avenidas (PGA): Una mirada a eventos extremos y el comportamiento del SDU ante una situación de eventos superiores al de diseño, lo cual es fundamental para el estudio de medidas no estructurales en los SDU.
- Plan de Gestión de Infraestructura (PGI): Análisis de mantenimientos periódicos, responsabilidades de la comunidad, el gobierno local y los organismos para el correcto desempeño de la vida útil de la obra.
- Plan de Gestión de la Urbanización (PGU): Ubicación de las franjas vetadas para nuevas construcciones, límites de propiedad de cañadas y ríos, cuestiones legales sobre drenaje pluvial en la comunidad.

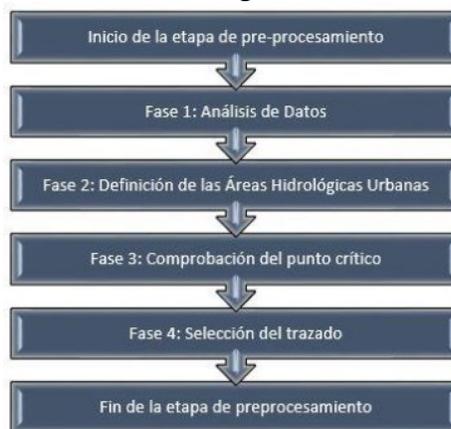
Bajo estas nuevas definiciones, teniendo como pilares la búsqueda bibliográfica de casos de estudio y manuales a nivel nacional e internacional, la consulta de normativas de la temática y la experiencia acumulada por proyectistas y constructores, los autores proponen un Esquema Tecnológico que resume la etapa de anteproyecto en Ideas Conceptuales de un Sistema de Drenaje Urbano aplicado para solucionar o mitigar el impacto de grandes avenidas o eventos extremos en un Punto Crítico o varios de un Área Hidrológica Urbana determinada.

### **Esquema Tecnológico Simplificado para proyectos en Ideas Conceptuales de Drenaje Pluvial Urbano**

El esquema tecnológico se divide en etapas (pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento), fases (10 en total) y casos (flexibles de acuerdo a la tenencia de datos) y es aplicado única y exclusivamente para un AHU o varias limítrofes que presenten características similares y que estén relacionadas con el objetivo de proyecto. Bajo ninguna circunstancia este esquema puede ser aplicado para una ciudad en general o poblado si dentro de los mismos se

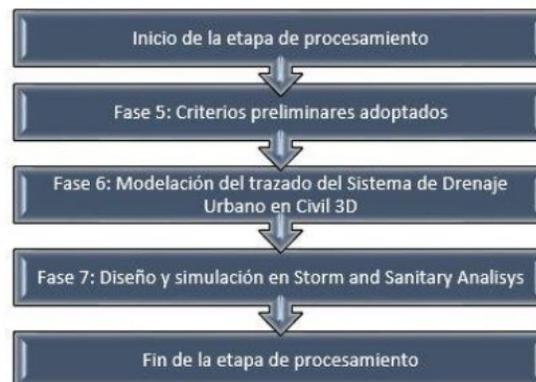
distinguen varias AHU no conectadas, no hay límites de áreas de la AHU para aplicar el esquema puesto que la morfología de la cuenca es variada, sin embargo, la más grande de la ciudad de Santa Clara es de 160 ha, perteneciente a los consejos populares Escambray y Brisas del Capiro.

La figura 4 muestra el Esquema Tecnológico para la etapa de pre-procesamiento cuyo objetivo principal es la definición del trazado del Sistema de Drenaje Urbano. En esta etapa cobra relevancia, por su carácter determinante, el concepto de AHU y a partir de su definición, el trazado final del SDU. Uno de los aspectos más significativos de esta etapa es el intenso estudio de la situación existente, así como de las características físico-geográficas e hidrológicas del lugar, por tanto, los recorridos y las preguntas a residentes son una parte esencial de la etapa. Por último, el trazado de la RAD conjunto con la RDN y la ubicación de las ECA (tanto como proyecto o existentes) y EMA debe ser una fase donde las empresas de proyectos y organismos institucionales den la aprobación a la solución integral.



**Figura 4: Etapa de Pre-Procesamiento. (Fuente: Elaboración Propia)**

Por su parte en la etapa de procesamiento como se muestra en la figura 5 es donde se concentran los cálculos del esquema tecnológico, su objetivo principal es el diseño de todas las medidas estructurales del Sistema de Drenaje Urbano, para lo cual se desarrollan 3 fases como se muestra. Lo más relevante es sin duda el proceso de diseño y simulación del comportamiento de las variables hidrológicas (AHU) e hidráulicas (RDN, RAD, ECA y EMA) a partir de herramientas computacionales, por lo cual gana en importancia las normas y requisitos fundamentales para este tipo de proyecto.



**Figura 5: Etapa de Procesamiento. (Fuente: Elaboración Propia)**

Por último, el post-procesamiento es la etapa final del esquema tecnológico, su objetivo principal es el análisis de los resultados obtenidos en la etapa de procesamiento, para lo cual se desarrollan 3 fases como se presenta en la figura 6. Su importancia viene con cada nivel de proyecto, por ejemplo, un proyecto en Ideas Conceptuales no va a tener un análisis constructivo tan profundo como un proyecto Técnico-Ejecutivo, aunque el análisis hidrológico e hidráulico debe ser exigente en todos los niveles.



**Figura 6: Etapa de Post-Procesamiento. (Fuente: Elaboración Propia)**

### Análisis de resultados en la aplicación de la estrategia para la ciudad de Santa Clara

La ciudad de Santa Clara es una urbe con más de 200 000 habitantes y con un alto grado de urbanización, sobre todo hacia su casco histórico y entre los ríos Bélico y Cubanicay. Las AHU de Santa Clara por lo general poseen características similares con respecto a su forma, siendo alargadas y estrechas hacia la parte sur de la ciudad y más redondeadas, amplias hacia la parte norte. La tabla 1 muestra los parámetros hidrológicos fundamentales obtenidos para el diseño en la etapa de procesamiento de los 16 SDU propuestos.

**Tabla 1: Resultados de los parámetros hidrológicos obtenidos en las modelaciones.**

SDU	Coeficiente de escurrimiento en % de Área			Gasto máximo del AHU <sup>3</sup> /s	Área de aporte al sistema ha	Error del modelo %
	0,3-0,49	0,5-0,69	0,7-0,8			
Bengochea	32,13	11,89	55,98	2,51	13,29	-0,13
Calle Unión	0	0	100	3,08	13,82	-0,34
Camacho	0	51,53	48,47	4,80	25,42	-0,29
Capiro	48,81	21,49	29,69	3,48	21,45	-0,02
Chambery	0	75,34	25,66	1,74	9,57	-0,19
Condado Sur	0	100	0	4,60	26,53	-0,19
Condado-Calle Real	4,41	90,70	4,89	16,71	140,18	-0,14
Dobarganes	0	0	100	3,04	13,85	-0,32
Escambray	23,10	62,42	14,48	20,89	153,10	-0,09
Hospital-Calle Maceo	0	0	100	3,18	13,35	-0,43
La Vigía	0	14,59	85,41	8,69	40,58	-0,40
Libertad	12,01	38,93	49,05	3,38	17,98	-0,27
Paseo de la Paz	0	56,78	43,22	3,38	19,76	-0,23
Santa Catalina	43,02	41,77	15,21	3,32	19,20	-0,08
Sub-Planta	5,20	46,28	48,52	4,29	27,31	-0,26
Virginia	0	43,66	56,36	13,12	83,82	-0,25

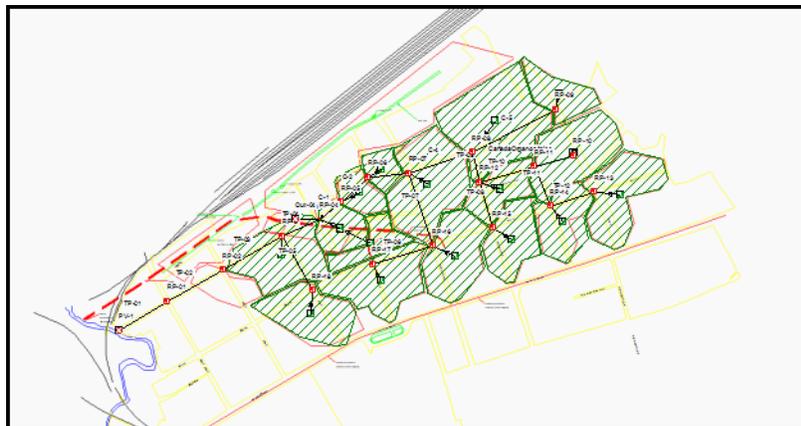
La estrategia adoptada permitió en un plazo cercano a 6 meses tener una caracterización completa de las 66 AHU de la ciudad, de las cuales 24 alojan los 42 Puntos Críticos, se proponen

en la estrategia 16 SDU para dar una solución integral a la ciudad, de ellos 14 tienen como vertiente a los ríos Bélico y Cubanicay mientras que los dos restantes poseen vertientes hacia fuera del perímetro urbano. La tabla 2 ofrece un resumen de las dimensiones de las obras de conducción propuestas, siendo este valor un estimado y muy útil para obtener estimar los costos de inversión que supone un proyecto de esta envergadura.

**Tabla 2: Longitud de conducciones en metros para cada Sistema de Drenaje propuesto.**

SDU	400 mm	500 mm	600 mm	800 mm	1000 mm	1200 mm	Canal Cubierto	Canal de Drenaje	Total	Tuberías
Bengochea	0	425	257	171	68	321	0	612	1854	1242
Calle Unión	0	0	32	232	790	0	177	0	1231	1054
Camacho	748	195	78	451	30	0	0	255	2157	1902
Capiro	0	369	427	362	106	0	0	507	1771	1264
Chambery	335	323	244	483	0	0	0	0	1385	1385
Condado Sur	0	1203	597	673	248	0	0	0	2721	2721
Condado-Calle Real	1695	196	858	2069	870	780	1120	781	8369	6468
Dobarganes	159	221	145	59	366	0	0	0	950	950
Escambray	0	81	237	140	675	0	0	2403	3536	1133
Hospital-Calle Maceo	187	768	417	641	0	0	0	0	2013	2013
La Vigía	0	232	338	1271	668	0	0	0	2509	2509
Libertad	202	36	64	104	892	0	0	874	2172	1298
Paseo de la Paz	0	451	0	203	194	731	0	0	1579	1579
Santa Catalina	282	0	432	57	74	338	478	388	2049	1183
Sub-Planta	103	260	215	162	819	0	196	0	1755	1559
Virginia	183	498	331	857	1182	1305	228	64	4648	4356
<b>TOTAL</b>	<b>3894</b>	<b>5258</b>	<b>4672</b>	<b>7935</b>	<b>7382</b>	<b>3475</b>	<b>2199</b>	<b>5884</b>	<b>40699</b>	<b>32616</b>

La figura 7 muestra una vista del modelo Autodesk Storm Sanitary Analysis 2015, elaborado para el Sistema de Drenaje Urbano Santa Catalina, las características de cada SDU varían de acuerdo a las necesidades locales de cada AHU y a la RDN existente, los mismos son diseñados en estrecha relación a la RDN afectada por la urbanización. Esta característica permite que el SDU tenga puntos de alivio de los gastos en los lugares donde coinciden con las redes existentes y así tener un mayor margen de descarga de aguas



**Figura 7: Sistema de Drenaje Urbano Santa Catalina. (Fuente: Elaboración Propia)**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el análisis de cada solución propuesta permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- La aplicación de medidas estructurales y de diseño de obras para drenaje de por sí solas no resuelven los problemas de inundaciones, es necesaria la adopción además de medidas no estructurales que mitiguen los impactos de eventos superiores a los de proyecto.
- La estrategia planteada permitió obtener en un breve período de tiempo una caracterización general del drenaje en la ciudad de Santa Clara, compuesto por 66 AHU, 42 Puntos Críticos y como propuesta de solución se presentan 16 SDU con una longitud total cercana a los 40 km de conducciones.
- Las herramientas informáticas Autodesk AutoCAD Civil 3D 2015 y Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2015, son una gran combinación para modelar redes de drenaje pluvial y emitir posteriormente conclusiones acerca de su funcionamiento.
- La nueva definición de Sistema de Drenaje Urbano con sus siete componentes permite implementar medidas estructurales y no estructurales sólidas articuladas en un solo plan general para un Área Hidrológica determinada.

Los autores recomendamos:

- La elaboración del estudio “Tormenta de diseño para la ciudad de Santa Clara” cuyos resultados brindarán un mejor comportamiento de relaciones IDF e hietogramas patrones para la ciudad.
- La elaboración del estudio “Hidrología de los ríos Bélico y Cubanicay” considerando que los puntos de vertidos propuestos en este trabajo son solo esquemáticos.

## REFERENCIAS

**Chow V. T., Maidment D. y Mays L.** (1994) Hidrología Aplicada. McGraw-Hill Interamericana, ISBN: 958-600-171-7 Bogotá, Colombia

CNA (2015) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Drenaje Pluvial Urbano. Comisión Nacional del Agua, México DF, extraído de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro19.pdf> en abril de 2020

**Martina E. F., Peralta A. M. d. V., Marín N. C., Paolo L. D. P., González S., Torchia N., Viand J. y Moscardini O.** (2015) Inundaciones urbanas y cambio climático. Recomendaciones para la gestión. Gobierno de Argentina, ISBN 978-987-47402-6-7, Buenos Aires (Argentina), extraído de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf> en marzo de 2020

NC: 1239-2018 (2018) Especificaciones para el diseño de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.

**Puga D.** (2008) "Crecimiento urbano desordenado: causas y consecuencias", Centre de recerca en economia internacional, No 19 ISSN: 1137-7828, Universidad Pompeu Farra, Barcelona España, extraído de: [https://crei.cat/wp-content/uploads/opuscles/090429174552\\_ESP\\_CREI\\_19\\_castella.pdf](https://crei.cat/wp-content/uploads/opuscles/090429174552_ESP_CREI_19_castella.pdf) en marzo de 2020

**Tucci C. E. M.** (2007) “Gestión de Inundaciones Urbanas”. Argentina: Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua, ISBN 8577271277, Google Books, extraído de [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf) en abril de 2020.

**UDFCD** (2016) Urban Storm Drainage Criteria Manual. Vol.1. Management, Hydrology, and Hydraulics. Urban Drainage and Flood Control District. ISBN: 978-1-887201-66-7. Denver (Colorado, USA).

### **Conflictos de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### **Contribución de los autores**

*Ing. Carlos Lázaro Castillo García* <https://orcid.org/0000-0002-6430-2775>

Autor principal del trabajo de diploma “Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara” presentado en Santa Clara, 2020 para la obtención del título de Ingeniero Hidráulico en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

*MSc. Tomás Díaz Pérez* <https://orcid.org/0000-0001-8236-6652>

Tutor del trabajo de diploma “Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara” presentado en Santa Clara, 2020. Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados.

*Dr. C. Lamberto Álvarez Gil* <https://orcid.org/0000-0002-4543-4035>

Co-tutor del trabajo de diploma “Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara” presentado en Santa Clara, 2020. Participó en el diseño de la investigación.

*Dr. C. Michael Álvarez González* <https://orcid.org/0000-0003-2953-4762>

Participó en el análisis de resultados.