



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# Análisis de medidas de mitigación de la inundación urbana mediante elementos de drenaje sostenible. Aplicación a Centroamérica.

Trabajo realizado por:  
*Ana Gómez Coma*

Dirigido:  
*César Álvarez Díaz*

Titulación:  
**Grado en Ingeniería Civil**

Mención:  
**Hidrología**

Santander, junio de 2018

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a César Álvarez la oportunidad de haber realizado bajo su dirección este *Trabajo de Fin de Grado* con el que tanto he aprendido. Así como a Jorge Rojo, también del grupo de Ingeniería Hidráulica de IH Cantabria, por facilitarme tanta documentación y por la ayuda prestada.

También quiero agradecer a Louise Valet y a Juan Benavente su colaboración en la revisión de la traducción al inglés.

Con este trabajo concluyo una parte importante de mis estudios y una etapa de mi vida. Años de esfuerzo en los que no me han faltado momentos para tirar la toalla, pero en los que, por suerte, he contado con los apoyos suficientes para recogerla y seguir. Por eso, quiero dedicar este trabajo:

A mis padres, Eloy y Gema, a Mari Paz, a mi hermana Lucía, a Ismail y a Chelo.

Y, sobre todo, a Andrés, por el camino recorrido juntos y el que aún nos falta por recorrer.

En memoria de Andrés y de mi abuela Lola.

## TÍTULO DEL TFG

Análisis de medidas de mitigación de la inundación urbana mediante elementos de drenaje sostenible. Aplicación a Centroamérica.

## AUTORA

Ana Gómez Coma

## DIRECTOR

César Álvarez Díaz

## CONVOCATORIA

Junio de 2018

## PALABRAS CLAVE

Sistema Urbano de Drenaje Sostenible, SUDS, riesgo, inundación, escorrentía, depósito de detención.

## RESUMEN

Santiago de los Caballeros es una ciudad, al igual que otras muchas áreas de América Latina y del Caribe, afectada por las inundaciones. Estos eventos tienen su origen en la pluviometría de la zona, así como en el desarrollo urbano no planificado. Cada vez que ocurren, generan importantes daños sobre personas, bienes e infraestructuras.

El presente *Trabajo de Fin de Grado* aborda el análisis hidrológico de la cuenca que drena sobre una zona de la ciudad de Santiago de los Caballeros, conocida como Pueblo Nuevo y el dimensionamiento de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS), que permita el almacenamiento de agua, mitigando los efectos de la inundación para un periodo de retorno de 10 años.

Los SUDS son una alternativa a los sistemas de drenaje tradicionales, que presentan importantes ventajas, entre las que se encuentra la posibilidad de emplear espacios de la trama urbana para el almacenamiento de agua, sin necesidad de intervenir en el

subsuelo para enterrar grandes colectores. Además, encajan en el entorno urbano, respetando la estética de las ciudades. En la actualidad, se plantean como soluciones adecuadas para entornos muy consolidados, como es el caso de Pueblo Nuevo, y en todo tipo de áreas que quieran apostar por un desarrollo sostenible.

El tipo de SUDS elegido para almacenar el agua de la escorrentía es el *Depósito de Detención*, ya que permite la acción combinada como depósito de almacenamiento de agua y también como cancha con finalidades de ocio. Para llevar a cabo dicho dimensionamiento, se recurre a la aplicación de un modelo hidrológico, conocido como *Puls Modificado*, que evalúa la evolución de la lámina de agua de la misma forma que se haría en un embalse. Así mismo también se ha empleado el modelo SWMM para estudiar la onda dinámica y contrastar los resultados con los obtenidos con *Puls Modificado*. Además, SWMM tiene en cuenta las características de la conducción que sale del depósito, por lo que se ha trazado un recorrido desde la salida hasta el punto de enlace con la red de saneamiento de la ciudad.

Finalmente, tras realizar dichos estudios hidrológicos y de laminación, se procede a dimensionar la solución propuesta. Se decide la construcción de una cancha que ocupe una superficie de 2.700 m<sup>2</sup> (67,5 m x 40 m) y 6,5 m de altura, enterrada en el terreno (pero no cubierta) a la que llegue el agua recogida por gravedad, a través de dos tuberías de 1,5 m de diámetro, y de la que salga el agua, también por gravedad, a través de una tubería de 1 m de diámetro. El caudal máximo en la salida del depósito será de 1,5 m<sup>3</sup>/s y viene determinado por la capacidad de la red existente en la ciudad y con la que enlaza la tubería que sale del depósito. Se espera que, para la precipitación propia del periodo de retorno para el que se dimensiona la cancha, el tiempo que pase desde que se empieza a llenar hasta que se vacía por completo sea de 8 horas.

## BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Banco Interamericano de Desarrollo, División de Vivienda y Desarrollo Urbano, Sector de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible. *Guía metodológica. Iniciativa ciudades emergentes y sostenibles*. ND : ND, 2016.

IH Cantabria; IDOM. *Estudios base para Santiago de los Caballeros, República Dominicana*. ND : ND, 2015.

Rodríguez Díaz, Héctor Alfonso. *Drenaje urbano. Elementos de diseño: Drenaje urbano no convencional*. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería , 2015.

Castro Fresno, Daniel, y otros. *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). s.l. : Interciencia, 2005, Vol. 30.*

## TITLE

Analysis of urban flooding mitigation measures based on sustainable drainage systems.

## AUTHOR

Ana Gómez Coma

## DIRECTOR

César Álvarez Díaz

## DATE

June 2018

## KEYWORDS

Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS, BMP, BMPs, Best Management Practices, risk, flood, runoff, detention basin.

## ABSTRACT

Santiago de los Caballeros is a city that, like others in Latin America and the Caribbean region, is affected by floods. These events are a consequence of local rainfall patterns and unplanned urban development. Floods cause important damages to infrastructures and are very dangerous for the people who live in this part of the world.

This *Bachelor's Degree Final Project* consists in a hydrological analysis of the basin that drains over a small area of Santiago de los Caballeros, known as Pueblo Nuevo, and in the calculation of the dimensions of the detention basin. This basin is a Sustainable Urban Drainage System (SUDS) and is used to store storm water and to mitigate flood effects. In addition, a mathematical formulation has been applied to evaluate the water height inside the detention basin.

SUDS are better alternatives than traditional drainage systems. They present many advantages, such as the possibility of utilizing small spaces inside cities, without digging

to introduce underground pipelines. Also, SUDS can fit in the urban environment, respecting the esthetic of cities.

The detention basin is on a surface of 2.700 m<sup>2</sup> (67,5 m x 40 m) and its walls are 6,5 m high. Two 1,5 m diameter pipes arrive to the basin, while another of 1 m diameter goes from the basin to the junction with the urban drainage system. The design contemplates a return period of 10 years, and 8 hours are expected to be needed to empty the tank.

## BASIC BIBLIOGRAPHY

Banco Interamericano de Desarrollo, División de Vivienda y Desarrollo Urbano, Sector de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible. *Guía metodológica. Iniciativa ciudades emergentes y sostenibles*. ND : ND, 2016.

H Cantabria; IDOM. *Estudios base para Santiago de los Caballeros, República Dominicana*. ND : ND, 2015.

Rodríguez Díaz, Héctor Alfonso. *Drenaje urbano. Elementos de diseño: Drenaje urbano no convencional*. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería , 2015.

Castro Fresno, Daniel, y otros. *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)*. s.l. : Interciencia, 2005, Vol. 30.

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. OBJETIVO .....	8
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
3.1. Descripción de la zona de estudio .....	9
3.2. Riesgo de inundación .....	13
4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS .....	17
4.1. Definición de los sistemas de drenaje urbano sostenibles (SUDS).....	17
4.2. Tipología.....	19
4.3. Adecuación a las condiciones de los países en vías de desarrollo .....	28
4.4. Solución propuesta .....	29
5. METODOLOGÍA.....	31
5.1. Estudio hidrológico .....	31
5.2. Estudio de laminación.....	33
6. RESULTADOS .....	37
6.1. Resultados del estudio hidrológico (caudales de diseño) .....	37
6.1.1. Definición de la cuenca.....	37
6.1.2. Número de curva .....	40
6.1.3. Tiempo de concentración .....	43
6.1.4. Curvas IDF .....	44
6.1.5. Hietograma de avenida .....	47
6.1.6. Hidrograma solución .....	48
6.2. Resultados del estudio de laminación .....	51
6.2.1. Ubicación del depósito y superficie disponible.....	51
6.2.2. Caudal de salida del depósito y dimensionamiento previo .....	53
6.2.3. Hidrograma de laminación .....	54
6.2.4. Verificación mediante SWMM .....	56
6.3. Dimensiones de la solución propuesta.....	60
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	63

8. BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEJO: PLANOS.....	69

Figura 1: Diagrama característico de sostenibilidad .....	7
Figura 2: Ubicación de Santiago de los Caballeros en la República Dominicana (Fuente: Google Maps) .....	9
Figura 3: Delimitación de la zona de estudio .....	10
Figura 4: Cuenca del río Yaque del Norte y división en subcuencas (Fuente: IH Cantabria).....	11
Figura 5: Vista en detalle de la zona de estudio.....	12
Figura 6: Deficiencias en el saneamiento en Santiago de los Caballeros (Fuente: BID, 2016).....	13
Figura 7: Diagrama explicativo del riesgo.....	14
Figura 8: Gestión correcta de la escorrentía .....	15
Figura 9: Sumideros .....	17
Figura 10: Ejemplo de sistema de drenaje convencional.....	18
Figura 11: Ejemplo de SUDS: pavimento filtrante.....	19
Figura 12: Clasificación de SUDS según GITECO (ETSICCP, Santander).....	20
Figura 13: Ejemplo de pavimento permeable .....	21
Figura 14: Ejemplo de zanja de infiltración (Fuente: Stahre, 2006).....	22
Figura 15: Esquema de funcionamiento de depósito de infiltración (Fuente: CIRIA C522, 2001).....	23
Figura 16: Ejemplo de cubierta verde. Santander.....	23
Figura 17: Esquema de funcionamiento de drenes filtrantes (Fuente: Rodríguez Díaz, 2015).....	24
Figura 18: Ejemplo de cuneta verde (Fuente: Stahre, 2006) .....	25
Figura 19: Esquema de funcionamiento de franja filtrante (Fuente: Rodríguez Díaz, 2015).....	25
Figura 20: Ejemplo de depósito de detención (Fuente: Stahre, 2006) .....	26
Figura 21: Ejemplo de estanque de retención (Fuente: Stahre, 2006) .....	27
Figura 22: Ejemplo de humedal artificial. Santander .....	27
Figura 23: Ejemplo de cuneta verde en Malasia (Fuente: Parkinson y Mark, 2006) .....	28
Figura 24: Ejemplo de depósito de detención en Holanda (Fuente: IH Cantabria) .....	30
Figura 25: Esquema de trabajo con HEC-HMS .....	32

Figura 26: Esquema de trabajo para el estudio de laminación .....	33
Figura 27: Método Puls Modificado (Fuente: Apuntes de Ampliación de hidrología UC) .....	35
Figura 28: Mapa de inundación sobre modelo digital del terreno .....	37
Figura 29: Área de estudio sobre ortofoto y mapa de inundación del terreno .....	38
Figura 30: Cuenca definida mediante ArcGis .....	39
Figura 31: Esquema de la cuenca en HEC-HMS.....	39
Figura 32: Mapa de los usos del suelo en la República Dominicana (Fuente: GlobCover,2009) .....	41
Figura 33: Curvas IDF (Fuente: IH Cantabria) .....	45
Figura 34: Curva IDF ajustada para emplearla para tiempos de concentración menores a 3 horas.....	46
Figura 35: Hietograma de diseño de precipitación .....	48
Figura 36: Hidrograma de salida tras el primer análisis en HEC-HMS.....	49
Figura 37: Esquema de la conducción de agua de las subcuencas C1 y C2.....	50
Figura 38: Hidrograma de salida tras el segundo análisis en HEC-HMS.....	51
Figura 39: Posibles ubicaciones del tanque de detención (Fuente: Google Earth e IH Cantabria).....	52
Figura 40: Vista en detalle de las posibles ubicaciones del tanque de detención (Fuente: Google Earth e IH Cantabria).....	53
Figura 41: Gráfico para el cálculo aproximado del volumen necesario del depósito de detención .....	54
Figura 42: Hidrogramas de entrada y salida en el depósito de detención .....	55
Figura 43: Variación de la altura de la lámina de agua en el depósito de detención ....	56
Figura 44: Esquema de la tubería que va desde el depósito hasta el punto de enlace con la red de la ciudad .....	57
Figura 45: Comparativa de los hidrogramas de salida obtenidos con los dos modelos	59
Figura 46: Comparativa de las alturas en la lámina de agua obtenidas con los dos modelos.....	59
Figura 47: Perfil de elevación del agua en el sistema .....	60
Figura 48: Depósito de detención .....	62

Tabla 1: Área de cada subcuenca y área total.....	40
Tabla 2: Usos del suelo .....	41
Tabla 3: Número de curva para condiciones de humedad previa II en función del umbral de escorrentía .....	42
Tabla 4: Número de curva para condiciones de humedad previa II para cada subcuenca y valor total .....	42
Tabla 5: Número de curva para condiciones de humedad previa III para cada subcuenca y valor total .....	43
Tabla 6: Número de curva para condiciones de humedad previa I para cada subcuenca y valor total .....	43
Tabla 7: Tiempos de concentración y de retardo para cada subcuenca.....	44
Tabla 8: Tiempo de concentración para cada subcuenca en horas y en minutos .....	45
Tabla 9: Valores de intensidad y tiempo obtenidos de la curva IDF correspondiente al periodo de retorno de 10 años .....	46
Tabla 10: Intensidades asociadas al tiempo de concentración total y al intervalo elegido .....	47
Tabla 11: Precipitaciones obtenidas para construir el hietograma de avenida .....	47
Tabla 12: Resultados del primer análisis en HEC-HMS.....	49
Tabla 13: Resultados del segundo análisis en HEC-HMS.....	50
Tabla 14: Datos de entrada a SWMM .....	57
Tabla 15: Comparativa de los resultados del estudio de laminación con Puls Modificado y con SWMM .....	58
Tabla 16: Características del depósito de almacenamiento del agua de escorrentía....	61

## 1. INTRODUCCIÓN

El programa de Ciudades Emergentes Sostenibles (CES) es una iniciativa del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) que pretende apoyar a distintas áreas de América Latina y del Caribe para el desarrollo de planes de sostenibilidad urbana.

Las ciudades seleccionadas para formar parte de este proyecto (más de 50 hasta la fecha) son zonas caracterizadas por un gran incremento de población en las últimas décadas, acompañado de un crecimiento económico importante, a veces cercano al llamado desarrollismo.

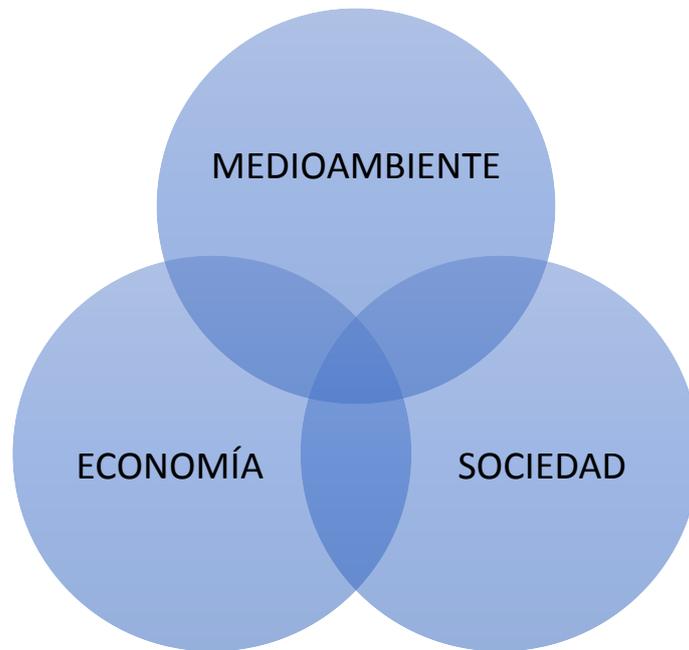
Todo esto las convierte en áreas de expansión poco planificadas en cuanto a asentamientos, transporte, redes de abastecimiento, saneamiento, drenaje, y muchos otros aspectos. Hay que tener en cuenta, además, que la falta de planificación ha hecho que éstas sean zonas muy vulnerables frente al cambio climático (1).

Cada ciudad elegida en el programa CES está sometida a los mismos procesos entre los que se incluye la identificación de los posibles riesgos que afectan a la zona (2). Dentro de estos riesgos, las inundaciones son uno de los problemas más persistentes y que más preocupa en muchas regiones de América Latina y del Caribe, como en el caso de Santiago de los Caballeros en la República Dominicana (3).

El desarrollo sostenible que se persigue con este Programa, implica un modelo de progreso que no agota los recursos existentes y, además, no genera daños irreparables al medio ambiente. Como se puede ver de forma gráfica en la Figura 1, dicho desarrollo sostenible resulta del equilibrio entre las necesidades económicas, sociales y medioambientales de la ciudad. Este desarrollo cobra especial relevancia en América Latina y el Caribe, ya que se trata de un área muy amplia del Planeta en la que, en algunos países, el porcentaje de personas que vive en las ciudades supera el 80%.

La República Dominicana, por ejemplo, cuenta con un porcentaje aproximado a ese valor, puesto que un 78% de sus más de 10 millones de habitantes viven en áreas urbanas (4).

Es por ello que resulta necesario el análisis de un riesgo tan serio como pueden ser las inundaciones, así como la propuesta de alternativas, para la mitigación de este problema, que sean sostenibles con el medio.



*Figura 1: Diagrama característico de sostenibilidad*

## 2. OBJETIVO

El presente trabajo se centra en examinar las posibles alternativas de drenaje sostenible de una zona de la ciudad de Santiago de los Caballeros, así como en seleccionar la solución más adecuada. Para ello se va a analizar el problema tanto desde el punto de vista hidrológico como hidráulico, es decir, definiendo, por un lado, los caudales de escorrentía de la zona para diferentes periodos de retorno y, por otro, dimensionando las partes que conformarán el sistema de drenaje.

Los objetivos específicos de este estudio son los siguientes:

- Examinar la situación actual, así como plantear la problemática que hay que resolver y delimitar la zona de estudio.
- Definir los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), clasificarlos y caracterizarlos.
- Valorar la posible incorporación de los SUDS en países en vías de desarrollo.
- Seleccionar y justificar la solución adoptada para la zona de estudio.
- Realizar un estudio hidrológico que incluya:
  - Caracterización de las cuencas vertientes al área de estudio
  - Cálculo de caudales
- Realizar un estudio hidráulico que contenga el dimensionamiento del sistema de drenaje elegido

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 3.1. Descripción de la zona de estudio

Santiago de los Caballeros es la capital de la provincia de Santiago y la ciudad más importante de la región de Cibao. Es la segunda urbe demográficamente más grande de la República Dominicana, con una población de 700.000 habitantes, aproximadamente. La metrópoli está asentada en el centro del Valle de Cibao y la atraviesa la autopista Duarte, la más importante del país. Además, es el principal centro económico de la región. Esto hace que Santiago de los Caballeros, junto con el área metropolitana, se hayan convertido en una zona en continuo crecimiento demográfico y económico, sin un plan de expansión establecido. El potencial de la ciudad hizo que, en el año 2014, fuera incorporada al programa de Ciudades Emergentes Sostenibles.

A continuación, en la Figura 2 , se puede ver la localización de Santiago de los Caballeros dentro de la República Dominicana.



Figura 2: Ubicación de Santiago de los Caballeros en la República Dominicana (Fuente: Google Maps)

La zona elegida para efectuar el estudio (Figura 3) es la conocida como *Pueblo Nuevo* y está ubicada al este del río Yaque del Norte. Ha sido seleccionada por ser una de las áreas que bordea al río a su paso por la ciudad y por tratarse de una zona inundable debido a su elevada pluviosidad.

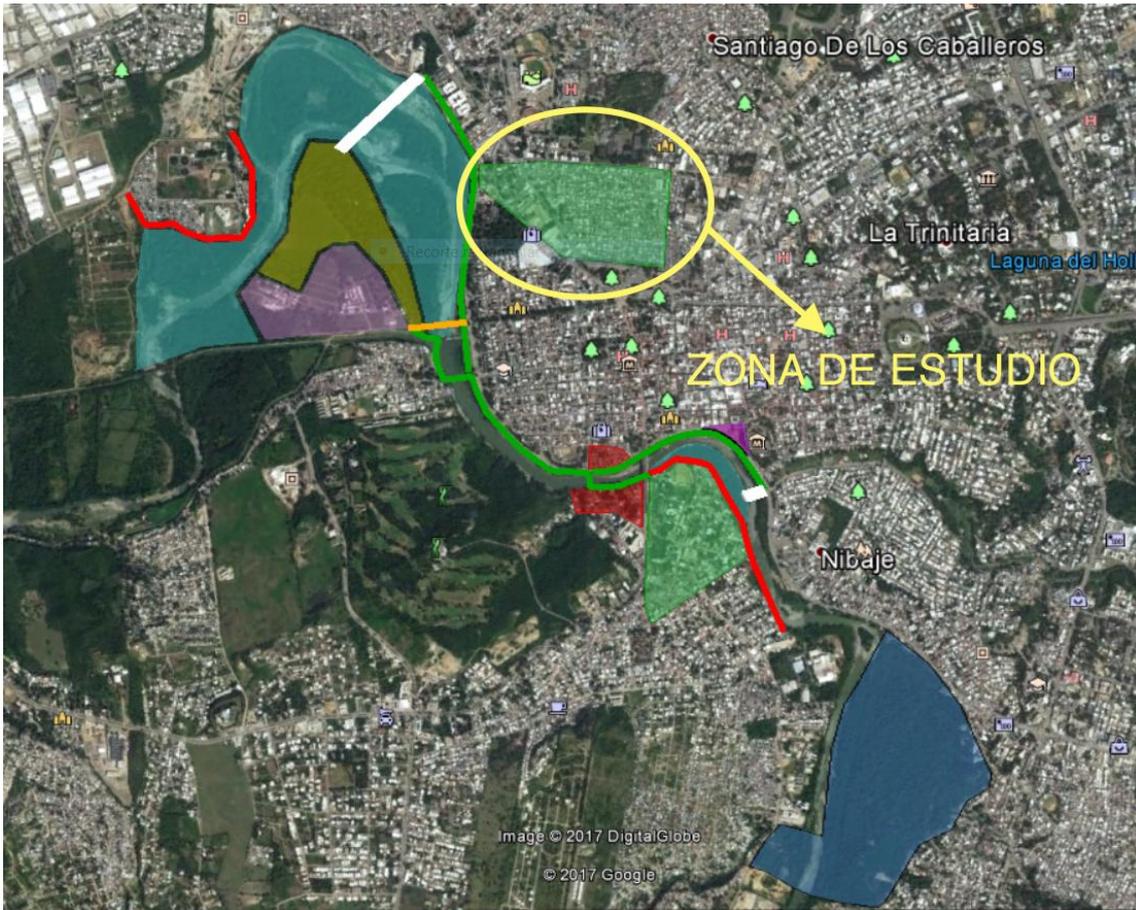


Figura 3: Delimitación de la zona de estudio  
(Fuente: Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y Google Maps)

La cuenca del río Yaqué del Norte, que atraviesa la ciudad de Santiago de los Caballeros, es la más grande de la República Dominicana con una superficie de 7.053 km<sup>2</sup> y se encuentra entre la Cordillera Central y la Septentrional. Este río nace en el Pico Yaqué de la Cordillera Central, a 3.087 metros sobre el nivel del mar, y recorre una longitud de 296 km, con un caudal promedio de 20 m<sup>3</sup>/s, para desembocar al Océano Atlántico en la Bahía de Monte Cristi, al noroeste del país. A lo largo de su recorrido, sigue un trazado sinuoso con continuas modificaciones, debido a las frecuentes inundaciones que se producen. Se alimenta de una serie de afluentes (Figura 4), entre los que destacan los ríos Bao, Amina, Mao, Guayubin y Maguaca, en la margen izquierda, y Jimenoa, Gurabo y Jacagua, en la derecha (3).

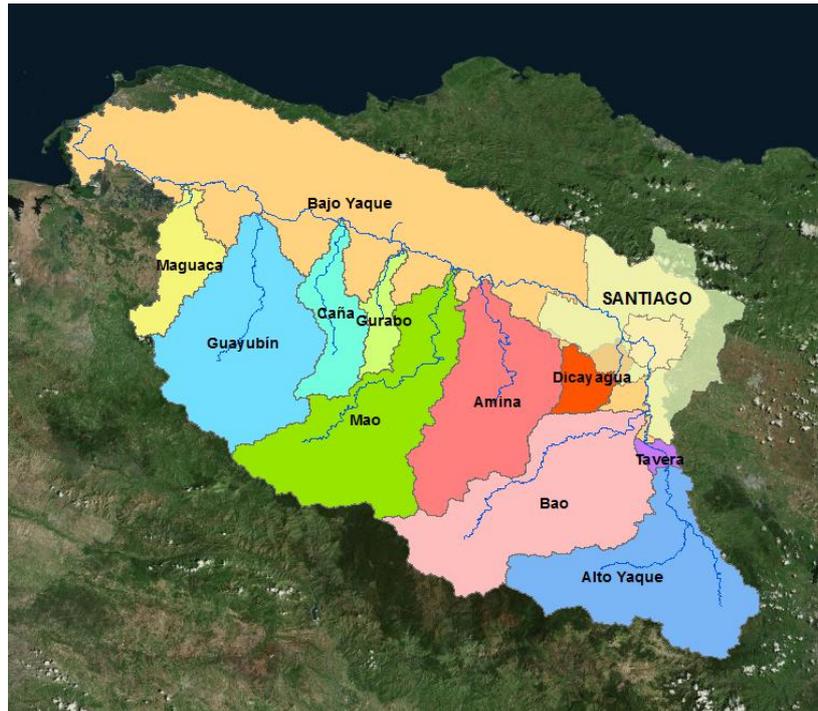


Figura 4: Cuenca del río Yaque del Norte y división en subcuencas (Fuente: IH Cantabria)

A lo largo de la cuenca, se ubican siete presas dedicadas a la regulación del agua y a la producción de energía hidroeléctrica. De dichas presas, las más importantes y que más influyen en el curso del río, a su paso por la ciudad, son las de Tavera, en el río Yaque del Norte, y las de Bao y López Angostura, en el río Bao. Las tres son presas de tierra muy próximas entre sí, a unos 30 km al sur de Santiago de los Caballeros, que modifican el régimen natural del cauce y, en conjunto, tienen una capacidad de 421,4 Hm<sup>3</sup>. La capacidad de regulación de estas presas debe servir, además de para producir energía y abastecer a la población y a las zonas de cultivo, para laminar el agua en los casos en los que una gran crecida del río ponga en riesgo la zona. Sin embargo, algunos daños causados en la ciudad, en momentos de grandes crecidas del río, se atribuyen a una mala gestión de las presas (3).

La zona urbana colindante al río Yaque del Norte es la más afectada por las inundaciones. De hecho, el sector elegido para el presente estudio, tal y como se puede apreciar en la Figura 5, se encuentra en la margen este del río y se trata, por tanto, de un sitio notablemente afectado. Otras zonas que padecen el mismo problema son las que se

localizan al margen de los arroyos Gurabo, Pontezuela y Cristo Rey al noreste de la ciudad, así como las colindante al arroyo Nibaje (3).



Figura 5: Vista en detalle de la zona de estudio  
(Fuente: Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y Google Maps)

Cabe mencionar también, aunque no vaya a ser objeto de estudio en el presente trabajo, que existen en la ciudad unos asentamientos, junto a los márgenes del río, que se denominan “hoyas”. Las hoyas están conformadas por conjuntos de viviendas informales, construidas sin ningún tipo de permiso ni planificación, y que carecen del saneamiento y drenaje adecuados. Estas áreas están ampliamente pobladas y sometidas a la acción destructiva del agua cuando escapa del cauce natural del río (5).

Al ir ampliándose el tejido urbano sin un plan de ordenación, los afluentes del río Yaque han sido incorporados al área urbana sin ningún tipo de adaptación hidráulica y, por tanto, causando numerosos desbordamientos. La ocupación del espacio fluvial por parte

de las personas, así como la falta de infraestructuras de encauzamiento del río y de drenaje urbano, junto con la disminución de la sección útil en algunos arroyos a causa de los sedimentos que han llegado hasta ellos, arrastrados por las aguas y por el vertido de residuos (Figura 6), han hecho de Santiago de los Caballeros una ciudad sometida a la fuerza de un río que, tras cada episodio de tormenta, reclama el espacio que le corresponde (5).



*Figura 6: Deficiencias en el saneamiento en Santiago de los Caballeros (Fuente: BID, 2016)*

### 3.2. Riesgo de inundación

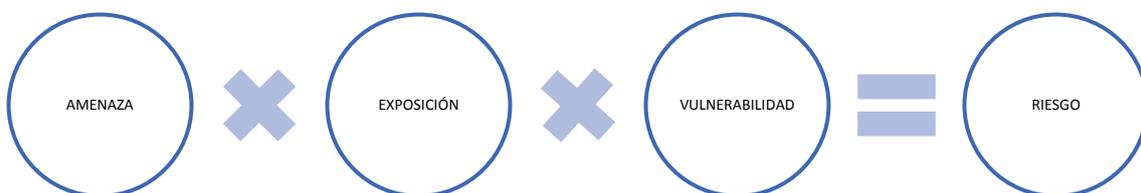
Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales que más impacto causan en Santiago de los Caballeros cada vez que tienen lugar. Para decidir las medidas que se deben tomar para minimizar dicho impacto, es necesario conocer previamente el riesgo de inundación en la ciudad y los tres componentes que lo determinan:

1. La amenaza a la que se enfrenta la ciudad y que es el origen de las inundaciones.
2. El grado de exposición de la zona a dicha amenaza.

3. La vulnerabilidad, que dependerá de las características humanas, ambientales y socioeconómicas del lugar, así como de las infraestructuras con las que cuenta.

Estos tres factores combinados nos dan como resultado el riesgo (Figura 7) y, en base a él, se proponen las medidas pertinentes, que constituyen el propósito del presente trabajo. A continuación, se expone detalladamente cada uno de los factores:

- Amenaza: se denomina amenaza al factor externo que puede causar un riesgo y, por tanto, notables daños socioeconómicos en las regiones a las que afecta (6). La ciudad está cíclicamente amenazada por las lluvias torrenciales, así como por las tormentas tropicales características del Caribe (5).
- Exposición: hace referencia a las personas o a los bienes (viviendas particulares, infraestructuras, etc.) que pueden verse afectados por una amenaza. La exposición en Santiago de los Caballeros ha sido acrecentada por el fenómeno migratorio que ha hecho que la ciudad crezca sin seguir un plan establecido y por la eliminación de las barreras naturales de defensa frente a las inundaciones (7).
- Vulnerabilidad: indica lo susceptible que es la comunidad a las amenazas ambientales y depende del uso del suelo, de la calidad de las viviendas, de las infraestructuras del país, de la deforestación, de la destrucción de cuencas, etc. Santiago de los Caballeros es una zona ciertamente vulnerable y esto se debe fundamentalmente a la precariedad de sus infraestructuras, al desorden urbanístico y a la ocupación del espacio fluvial.



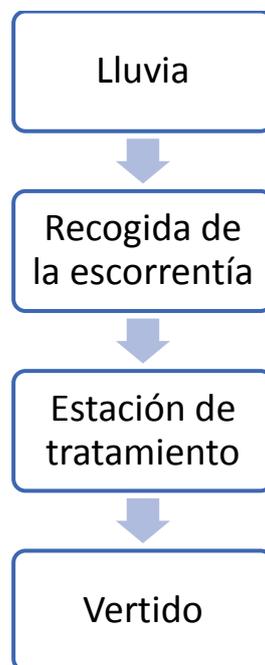
*Figura 7: Diagrama explicativo del riesgo*

Por tanto, el conjunto de factores anteriormente descritos determina nivel de riesgo que, en el caso de Santiago de los Caballeros es considerable y las consecuencias

derivadas de este riesgo son negativas desde el punto de vista tanto económico como humano (3).

Es difícil devolver al Yaque el espacio que le corresponde, pero gestionar el riesgo que causa dicha situación, para minimizarlo al máximo, es posible y, también, imprescindible para el desarrollo sostenible de Santiago de los Caballeros. Lo más probable es que, el cambio climático dificulte aún más el proceso y haga a la zona más indefensa. Sin embargo, un uso eficiente de los recursos naturales para subsanar el problema hará que se adapte mejor a las consecuencias de dicho cambio.

El agua pluvial debería ir a parar al alcantarillado sanitario y, desde ahí, circular hasta una estación de tratamiento de aguas (Figura 8). Sin embargo, esto solo ocurre en algunos barrios de la ciudad y, en los que pasa, la capacidad del sistema de tuberías, construido hace varias décadas, es muy baja, por lo que las fugas y los desbordamientos, son muy comunes en la zona (5). Santiago de los Caballeros necesita una red de drenaje de calidad, que encaje dentro de los cánones del desarrollo sostenible, y minimice las consecuencias que las lluvias torrenciales tienen en la ciudad.



*Figura 8: Gestión correcta de la escorrentía*

Además, otra medida necesaria para reducir los riesgos de inundación de los ríos y los arroyos que atraviesan Santiago de los Caballeros es la implantación de infraestructuras capaces de almacenar el agua, en los momentos en los que las precipitaciones sean tan elevadas que la red no pueda hacer frente a dichos caudales. Es por ello, que el propósito de dicho trabajo es establecer la infraestructura más adecuada para desempeñar esta función, así como realizar el dimensionamiento de la misma para almacenar los caudales de esorrentía característicos de la zona.

## 4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

### 4.1. Definición de los sistemas de drenaje urbano sostenibles (SUDS)

Los sistemas tradicionales de drenaje urbano constan de un conjunto de tuberías cuya finalidad es dirigir el agua, que ha penetrado en ellas a través de imbornales o sumideros (Figura 9), hasta un punto de vertido lo más rápidamente posible. Preferiblemente, esa agua debe pasar por un tratamiento antes de ser vertida al medio receptor, debido a la carga de contaminantes, así como de residuos sólidos que la acompañan. Dependiendo de si la red es unitaria o separativa, las aguas de lluvia (aguas grises) compartirán las mismas tuberías de la red de alcantarillado con las aguas residuales domésticas o industriales (aguas negras) o las conducciones serán independientes.



Figura 9: Sumideros

A continuación, en la Figura 10 se puede ver un ejemplo característico de sistema de drenaje convencional. En días de lluvia, el agua discurre por la cuneta hasta el imbornal, por donde penetra para seguir su curso a través de tuberías instaladas en el subsuelo.



Figura 10: Ejemplo de sistema de drenaje convencional

Hoy en día, especialmente en las ciudades, los cursos habituales del agua se han visto alterados. Esto unido a la creciente polución y al cambio climático, hacen que las inundaciones y la contaminación del agua sean un riesgo cada vez más frecuente. Como alternativa a los sistemas convencionales de drenajes han aparecido otras soluciones más sostenibles con el medio.

Los *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*, *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) o *Best Management Practices* (BMPs) pretender abordar el problema de la escorrentía en las ciudades lo más cerca posible del origen de la lluvia, así como proteger las fuentes naturales de agua de la contaminación puntual. Todo ello preservando al máximo los recursos naturales, la estética de las ciudades y beneficiando a la fauna silvestre (8). Los SUDS, como soluciones sostenibles que son, responden a criterios ambientales, sociales y económicos y, en cierta medida, tratan de recuperar parte de los mecanismos naturales del medio imitando lo mejor posible al ciclo hidrológico antes del desarrollo urbano (9). A continuación, en la Figura 11, se muestra un ejemplo de SUDS.



Figura 11: Ejemplo de SUDS: pavimento filtrante

Los *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible* pueden ser un complemento adecuado a los sistemas convencionales que ya existen en las ciudades (10), y una opción a considerar en las nuevas áreas de crecimiento, así como en la trama urbana de tantas ciudades en la actualidad, en las que es casi imposible intervenir el subsuelo para agrandar la red de drenaje con más tuberías.

## 4.2. Tipología

En la actualidad, existen diversas clasificaciones de los *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Una de las más interesantes, la del *Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO)*, de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria*, se puede ver en el esquema que se presenta a continuación (Figura 12):

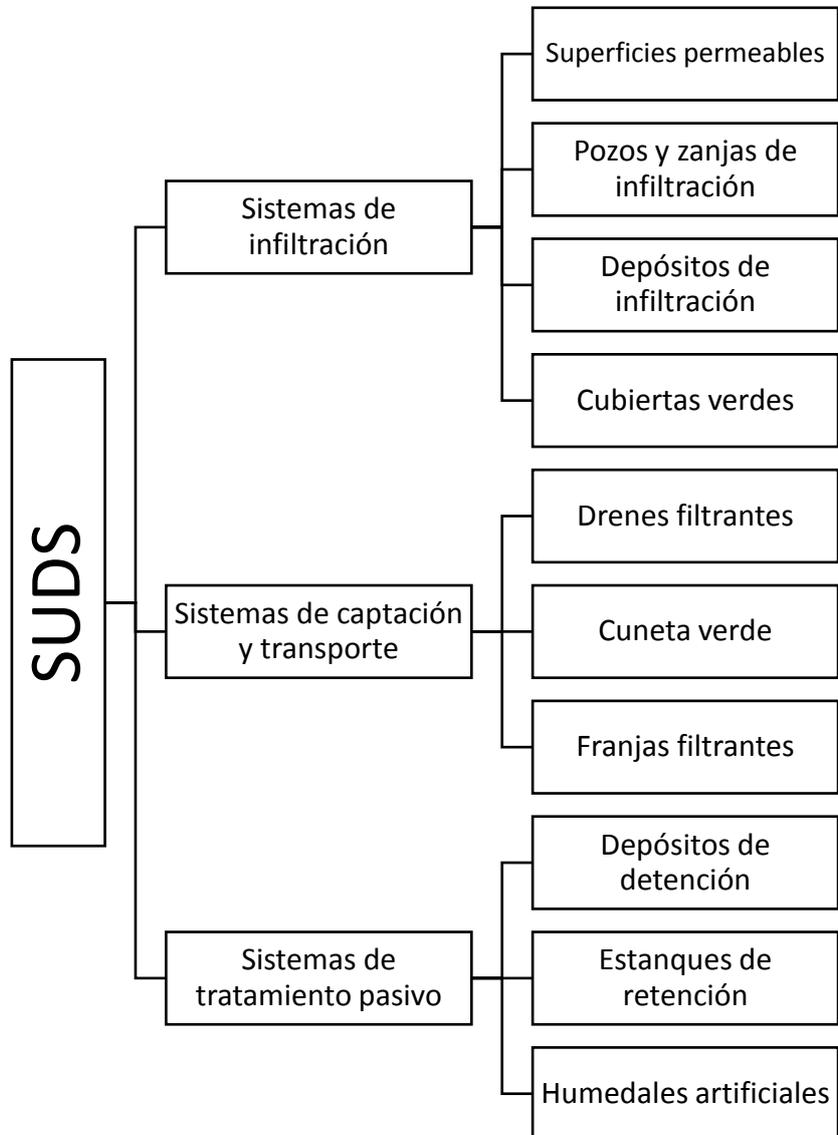


Figura 12: Clasificación de SUDS según GITECO (ETSICCP, Santander)

- Sistemas de infiltración:
  - Superficies permeables: son zonas del terreno en las que se permite el paso del agua. Pueden estar constituidas por capas de distintos materiales a través de las que va pasando el agua, de tal forma que cada una sea más porosa que la anterior. Estas capas operan a modo de filtro para el agua que, una vez que llega a la última, se infiltra en el terreno o es transportada a otro lugar (11). Las superficies permeables pueden encontrarse en aparcamientos (Figura 13), calles con poco tráfico, parques, etc.



Figura 13: Ejemplo de pavimento permeable

- Pozos y zanjas de infiltración: son excavaciones rellenas de material permeable que sirven para almacenar el agua de escorrentía y permitir que penetre con facilidad en el terreno. A veces poseen una cubierta vegetal (10). Pueden incluir desagües para que el agua pase a la red de

alcantarillado si se llena el pozo o la zanja. No deben ubicarse cerca de cimentaciones (11). En la Figura 14 se muestra una zanja de infiltración sin cubierta vegetal.



*Figura 14: Ejemplo de zanja de infiltración (Fuente: Stahre, 2006)*

- Depósitos de infiltración: son embalses superficiales, con paredes en pendiente cubiertas de vegetación, capaces de almacenar el agua en periodos de lluvia hasta que se produzca su infiltración en el terreno. Aunque su forma de trabajar se asemeja a la de los pozos y las zanjas de infiltración, estos depósitos pueden recoger agua de una cuenca mayor. A menudo, cuentan con desagües de emergencia, que se suman a los propios del sistema, para evacuar el agua con mayor facilidad en caso de llenado del mismo (11). En la Figura 15 se puede ver el esquema de funcionamiento de este sistema de drenaje.

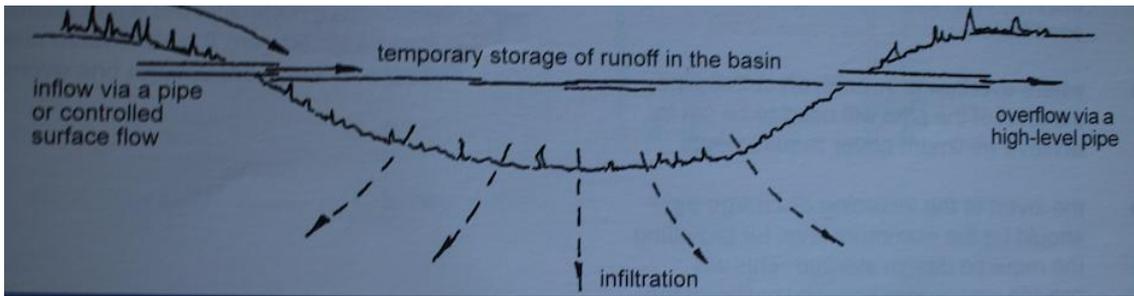


Figura 15: Esquema de funcionamiento de depósito de infiltración (Fuente: CIRIA C522, 2001)

- Cubiertas verdes: son tejados con una capa vegetal (Figura 16), que tiene como propósito interceptar el agua de lluvia, de tal forma que con ellos se reduce, sustancialmente, la escorrentía. Además, cuentan con otra gran ventaja que es su buen funcionamiento como aislante térmico. Es un tipo de solución que puede llevarse a cabo en cualquier lugar, independientemente de la densidad de población, ya que lo único que se hace es cubrir una estructura que ya existe de partida.



Figura 16: Ejemplo de cubierta verde. Santander

- Sistemas de captación y transporte:
  - Drenes filtrantes: se emplean en lugares en los que el suelo es impermeable, y son zanjas rellenas de material filtrante, en las que se favorece la sedimentación de sólidos que pueda arrastrar el agua. A través de los drenes, el agua circula como si de una tubería convencional se tratase (10) con la diferencia de que en muchas el agua se infiltra en el terreno antes de llegar al punto de vertido. A continuación, Figura 17, se muestra un esquema que caracteriza muy bien este sistema.

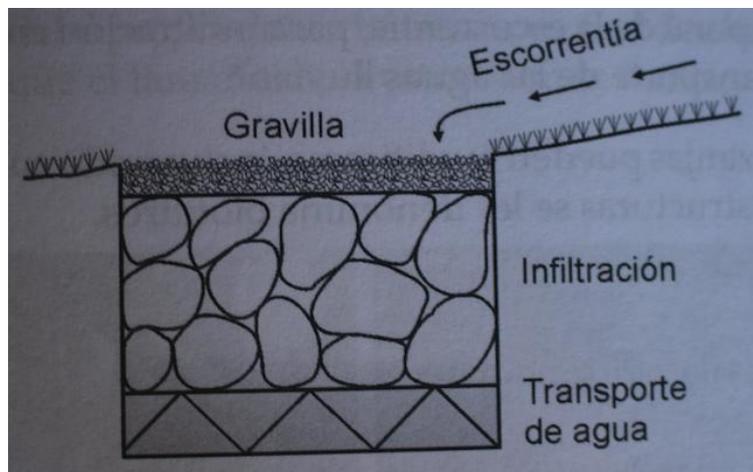


Figura 17: Esquema de funcionamiento de drenes filtrantes (Fuente: Rodríguez Díaz, 2015)

- Cunetas verdes: se llaman así porque suelen ubicarse al margen de las carreteras. Requieren mucho espacio por lo que no son aptas para zonas con mucha densidad de población. Generalmente están cubiertas de vegetación y se asemejan a canales ya que facilitan el transporte de agua a baja velocidad y en ellas se produce sedimentación de sólidos. También pueden servir de almacenamiento temporal, en cuyo caso es común la infiltración del agua al terreno (11). En la Figura 18 se puede ver esta solución aplicada a una zona urbana.



Figura 18: Ejemplo de cuneta verde (Fuente: Stahre, 2006)

- Franjas filtrantes: son estructuras de pendiente suave por las que circula el agua lentamente para así favorecer la sedimentación. Parte del agua es común que se infiltre en el terreno, mientras que otra discurre hacia otro elemento que almacene el agua o lo transporte. A menudo, se complementan con otros SUDS como las cunetas verdes (10). En la Figura 19, se puede ver un esquema del funcionamiento de este tipo de soluciones.

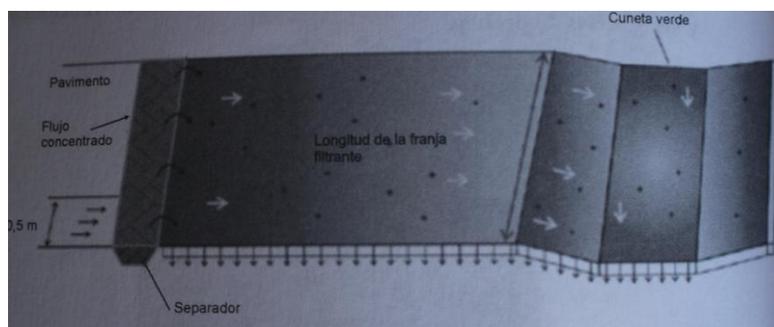


Figura 19: Esquema de funcionamiento de franja filtrante (Fuente: Rodríguez Díaz, 2015)

- Sistemas de tratamiento pasivo:
  - Depósitos de detención: son pequeños embalses en los que se almacena el agua durante periodos de tormenta, permitiendo la laminación del agua de avenida. El agua permanece en ellos durante la tormenta y un pequeño margen de tiempo, una vez que ésta acaba. Lo suficiente para detener la escorrentía y facilitar la sedimentación de sólidos. Pueden ubicarse en áreas sin uso alguno o aprovechando parques o zonas recreativas (12). Dichos depósitos pueden ser también subterráneos. Lo común es que tengan, al menos, un desagüe para favorecer la salida de agua. En la Figura 20, se muestra un parque urbano que, durante eventos de lluvia, hace la función de depósito de detención.



Figura 20: Ejemplo de depósito de detención (Fuente: Stahre, 2006)

- Estanques de retención: son depósitos abiertos y artificiales, con algo de vegetación, contruidos con el propósito de que el agua se almacene por un periodo largo de tiempo. La sedimentación y la descomposición son procesos comunes en este sistema. A continuación, en la Figura 21, se muestra un ejemplo de este tipo de soluciones.



Figura 21: Ejemplo de estanque de retención (Fuente: Stahre, 2006)

- Humedales artificiales: son depósitos abiertos, al igual que los estanques, con la diferencia de que los humedales suelen caracterizarse por su gran densidad de vegetación que hace que tengan un importante valor ecológico y estético. Las plantas sirven como mecanismo natural de filtración del agua, que queda almacenado en el humedal. Al igual que en los estanques, en los humedales la sedimentación también es común. En la Figura 22 se muestra un humedal artificial.



Figura 22: Ejemplo de humedal artificial. Santander

### 4.3. Adecuación a las condiciones de los países en vías de desarrollo

En el año 1997 se impulsó una ley en Chile por la que había que contemplar la puesta en marcha de elementos para mitigar la escorrentía causada por las lluvias en las nuevas zonas urbanizadas. Como respuesta, la *Pontificia Universidad Católica de Chile* hizo distintos experimentos con pozos de infiltración y pavimentos permeables. Los primeros se probaron en casas y hasta ellos llegaba el agua recogida en el tejado mediante canaletas. También se añadió un filtro para hojas y otros elementos que pudieran colapsar el pozo. El otro experimento tuvo aún más éxito y consistió en un aparcamiento con superficie permeable para que el agua pudiera infiltrarse en el terreno, a través de sus capas, así como almacenarse un tiempo entre ellas (13).

Chile no ha sido el único país en poner en marcha planes así. Otro ejemplo lo encontramos en Malasia (Figura 23) donde, ya en el año 2002, se puso en marcha el proyecto BIOECODS (*Bio-Ecological Drainage System Project*), que pretendía desarrollar sistemas de drenaje alternativos a los habitualmente usados en ingeniería. Entre dichos sistemas estaban: estanques, humedales, depósitos de detención, etc (14). Los resultados a los experimentos fueron satisfactorios, especialmente en lo referente a la disminución de la escorrentía y a la mejora de la calidad del agua (15).



Figura 23: Ejemplo de cuneta verde en Malasia (Fuente: Parkinson y Mark, 2006)

En Kuala Lumpur (Malasia) también se llevó a cabo un estudio paralelo a otro en Adelaida (Australia), que consistía en la puesta en marcha de un pavimento permeable con buenos resultados, aunque se remarcó la importancia que tenía considerar bien el volumen de almacenamiento de agua en este tipo de soluciones (16).

Otros ejemplos de países en vías de desarrollo que han tratado de implementar sistemas sostenibles de drenaje son India y Brasil. Estos antecedentes nos revelan que los resultados pueden ser tan provechosos como en Occidente, únicamente hay que seleccionar las alternativas más adecuadas a cada lugar.

#### 4.4. Solución propuesta

A la hora de elegir una alternativa entre las planteadas para resolver los problemas de drenaje de la ciudad de Santiago de los Caballeros, se debe tener en cuenta el punto de vista económico ya que, según informes realizados dentro del programa CES, existen problemas importantes de recaudación de impuestos (2). Por tanto, pese a considerar que el proyecto podría realizarse con fuentes económicas externas como son las del BID, es muy posible que existiese un problema de mantenimiento de infraestructuras debido a la falta de ingresos en las arcas públicas.

Otro aspecto importante es la sismicidad. Al trazarse de una zona sísmica, hay que adoptar una solución que, en caso de movimiento de placas, sufra el menor desperfecto posible. Es por ello mejor que se ponga en marcha un sistema que discurra por superficie o a muy poca profundidad. De esta forma, en caso de que tengan lugar desperfectos por la acción sísmica, la restauración o reconstrucción de los mismos no tendrá un coste tan elevado.

Por último, hay que tener en cuenta que, la ciudad carece de un plan de gestión de residuos sólidos y de aguas de saneamiento adecuado (2). De esta forma, cuando la escorrentía circula sobre el tejido urbano, arrastra sólidos, contaminantes y es propensa a mezclarse con aguas negras. Por tanto, la solución adoptada debe ser lo menos sensible posible a la obstrucción. Para ello se pueden emplear rejillas que retengan los residuos sólidos y sedimentos, así como lechos filtrantes que sirvan para limpiar el agua.

Por todo lo arriba mencionado, la solución más adecuada podría ser la construcción de depósitos de detención. Este sistema es muy atractivo porque permite introducirlo en la trama urbana, aprovechando la construcción de una zona recreativa (Figura 24), o también como elemento subterráneo, y aprovechar el espacio superficial para otro uso compatible.

Otro aspecto positivo de otra opción es que está respaldada por otros estudios, previamente realizados por el *Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria)*, en colaboración con la empresa *Idom* y el *Banco Interamericano de Desarrollo*, consistentes en la búsqueda de similares sistemas de drenaje sostenible en Tegucigalpa (Honduras).



Figura 24: Ejemplo de depósito de detención en Holanda (Fuente: IH Cantabria)

Esta solución tiene la ventaja de que, si el espacio disponible, como parque urbano o instalación deportiva, es demasiado pequeño, puede ubicarse otro depósito inferior a la altura del subsuelo que lo complemente.

Para dirigir el agua hasta el depósito o desde él también se pueden utilizar otras soluciones de drenaje sostenible, dedicadas a captar el agua y transportarlo, tales como drenes filtrantes o cunetas verdes y aprovechar, a su vez, el potencial que tienen como mecanismos de infiltración de agua en el terreno.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Estudio hidrológico

El estudio hidrológico de este trabajo se ha realizado utilizando como soporte dos softwares: *ArcGis* y *HEC- HMS*. Con el primero de ellos se ha llevado a cabo la modelización de la cuenca objeto de estudio: forma, área, subcuencas de las que consta, definición del cauce principal, longitud y pendiente del mismo, etc. Con el segundo se han obtenido los hidrogramas de avenida con los que posteriormente se dimensionará el depósito de detención. A continuación, se resume de forma breve las características de ambos modelos.

*ArcGis* es un eficaz programa informático para la visualización y gestión de información geográfica, en este caso hidrológica. Para este trabajo se ha empleado una herramienta muy eficaz, que se puede descargar a modo de extensión de dicho programa, y que se llama *ArcSwat*. Dicha herramienta ha sido creada para simular acontecimiento relacionados con el uso del suelo, así como con el flujo del agua en el terreno, entre otras cosas (17). Para trabajar con dicho software ha sido necesario emplear un modelo digital del terreno objeto de estudio, así como un mapa de inundaciones, ambos facilitados por *IH Cantabria*.

*HEC- HMS* es un sistema creado para modelizar procesos de precipitación y escorrentía de cuencas ya sean naturales o artificiales (18). El software, desarrollado por el *Centro de Estudios Hidrológicos (Hydrologic Engineering Center)* del *Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers)*, simula la respuesta hidrológica en una cuenca partiendo de una serie de datos (19). Es decir, el uso del software requiere de un trabajo previo de búsqueda de información, así como de cálculo de diversos parámetros que se pretenden resumir en el siguiente esquema (Figura 25).

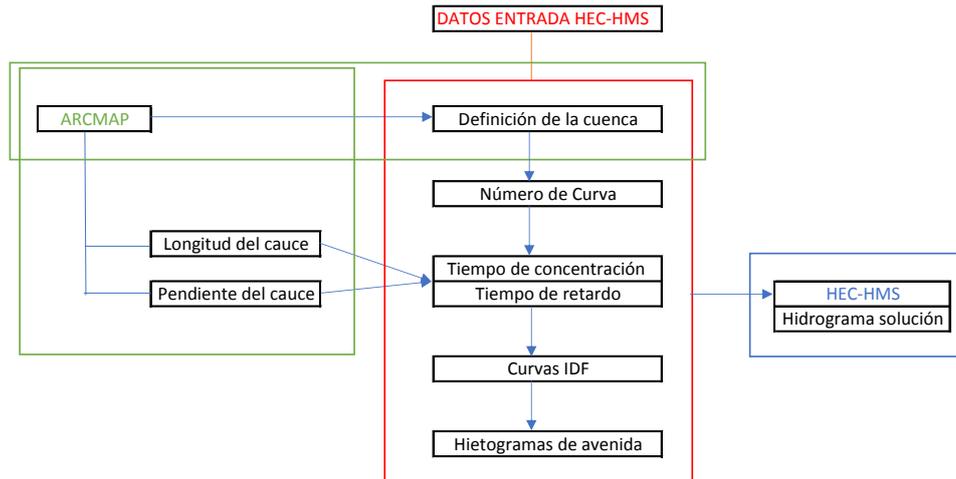


Figura 25: Esquema de trabajo con HEC-HMS

En definitiva, el estudio hidrológico consta de seis partes:

- Definición de la cuenca: el procedimiento seguido para trabajar con *ArcGis* ha sido el que indica el manual (17).
- Cálculo de pérdidas por escorrentía: existen diversos métodos para el cálculo de pérdidas por escorrentía generada por la tormenta. Para la realización de este trabajo se ha decidido emplear el del *Número de curva*.
- Cálculo del tiempo de concentración y de retardo: existen distintos métodos para calcular el tiempo de concentración. Para este trabajo se ha usado el recomendado por la *Instrucción 5.2 I.C. de drenaje superficial*, que a su vez se corresponde con la formulación de *Témez*.
- Construcción de la curva IDF para el periodo de retorno y el tiempo de concentración establecido: se ha llevado a cabo partiendo de las curvas facilitadas por el *Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria*. Estas curvas, a su vez fueron obtenidas empleando datos satelitales de precipitaciones de la base “Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM) y calibrándolos con los pluviómetros de la zona de estudio.
- Cálculo del hietograma de avenida o de diseño: dicho hietograma ofrece información acerca de cómo se distribuye la precipitación a lo largo de la

tormenta. Aunque hay varios métodos para definirlo, para este trabajo se ha elegido el de *Bloques Alternos*. Este método emplea curvas IDF.

- Obtención del hidrograma solución: una vez que se han introducido todos los datos previos en *HEC- HMS* y siguiendo los pasos indicados en el manual (18) se obtiene el hidrograma de salida de la cuenca que servirá como punto de partida para el estudio de laminación.

## 5.2. Estudio de laminación

Una vez que los caudales de diseño han sido calculados, se puede proceder al estudio de la laminación del agua almacenada en el depósito de detención.

El estudio de laminación (Figura 26) consta de las siguientes partes:

- Ubicación del depósito y cálculo de la superficie disponible
- Cálculo del caudal de salida
- Obtención del hidrograma de salida

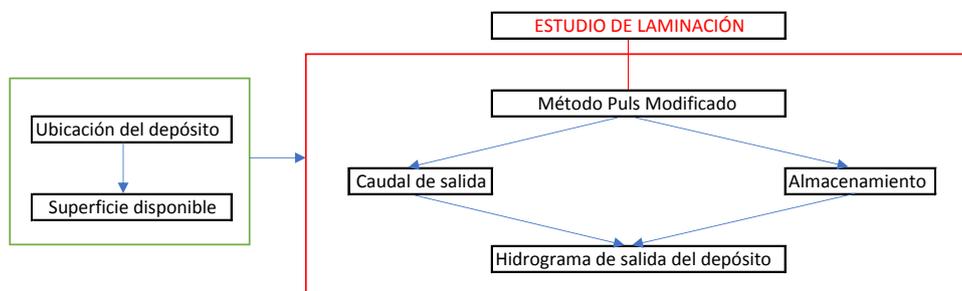


Figura 26: Esquema de trabajo para el estudio de laminación

Existen diversos métodos para el cálculo de la laminación en embalses y depósitos. Para este trabajo se ha decidido utilizar el método *Puls Modificado*, también llamado de *tránsito en depósitos*. Mediante este método es posible obtener el hidrograma de salida del depósito de detención a partir del de entrada al mismo (el que se obtuvo como resultado del estudio hidrológico). El proceso consiste en una aproximación en diferencias finitas de la ecuación de continuidad, así como una representación de la

ecuación de la dinámica. A continuación, se muestra la formulación correspondiente (20):

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q_s \rightarrow \frac{V_2 - V_1}{\Delta t} = \frac{Q_{e2} + Q_{e1}}{2} - \frac{Q_{s2} + Q_{s1}}{2}$$

Donde:

- $Q_e$  y  $Q_s$  ( $m^3/s$ ) son los caudales de entrada y salida del depósito respectivamente
- $V_1$  y  $V_2$  ( $m^3$ ) son los volúmenes de agua en el depósito en dos instantes consecutivos
- $\Delta t$  (s) es el intervalo de tiempo durante el que se analiza la entrada y salida de agua

Agrupando algunos términos de la ecuación:

$$\frac{V_2}{\Delta t} + \frac{Q_{s2}}{2} = \frac{V_1}{\Delta t} + \frac{Q_{s1}}{2} + \frac{Q_{e2} + Q_{e1}}{2} - Q_{s1}$$

$$G = \frac{V}{\Delta t} + \frac{Q_s}{2} \rightarrow G_2 = G_1 + Q_{em} - Q_{s1}$$

Como las incógnitas son  $V_2$  y  $Q_{s2}$ , hace falta una segunda ecuación que ponga las ponga en relación:

$$V = V(Q_s) \rightarrow G = G(Q_s)$$

En definitiva, resolviendo el siguiente sistema e iterando se puede llegar al hidrograma solución:

$$\begin{cases} G_2 = G_1 + Q_{em} - Q_{s1} \\ G = G(Q_s) \end{cases}$$

La imagen de la Figura 27, permite entender de forma visual, la utilidad del método. En ella se ven dos hidrogramas, el primero de ellos se corresponde con uno de entrada en un embalse y todos los puntos del mismo son datos conocidos mientras que, el segundo, es el de salida y sus puntos son incógnitas que se pueden ir despejando a partir del sistema de ecuaciones de arriba.

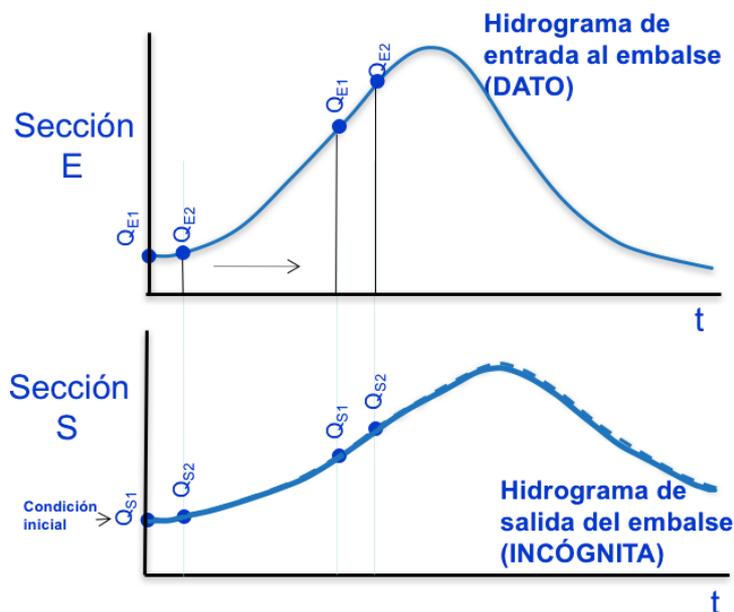


Figura 27: Método Puls Modificado (Fuente: Apuntes de Ampliación de hidrología UC)

El método *Puls Modificado* permite la obtención del hidrograma de salida del depósito. Sin embargo, se trata de un estudio desde el punto de vista estático y los resultados obtenidos pueden no adaptarse a la realidad de funcionamiento de este tipo de sistemas. Por tanto, una verificación de los resultados con un método que analice el sistema desde un punto de vista dinámico resulta muy adecuada. *Storm Water Management Model (SWMM)* es un modelo empleado para la simulación de fenómenos de escorrentía principalmente que, entre otras funciones, permite analizar el funcionamiento de sistemas de drenaje tras eventos de tormenta (21).

Los datos de entrada en SWMM son:

- **Nodos:** constituyen los puntos del sistema de drenaje donde se conectan las líneas. En la realidad equivalen a los puntos en los que se colocan pozos de registros. Los datos principales de entrada al modelo son la cota del fondo y la profundidad del mismo.
- **Conductos:** son los tramos de tubería ubicados entre nodos. En el modelo se especifica la forma del conducto, así como los nodos con los que conecta a la entrada y la salida, entre otros datos.
- **Elementos de almacenamiento:** solicita algunos datos del depósito. Fundamentalmente, cota del fondo, altura máxima de almacenamiento y superficie.
- **Nodos de vertido:** son los nodos finales del sistema en los que se fija alguna condición de contorno. El dato principal de entrada es la cota del fondo.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Resultados del estudio hidrológico (caudales de diseño)

Siguiendo la metodología explicada en el apartado 5.1, se muestran a continuación los resultados referentes al estudio hidrológico obtenidos para cada apartado. Los apartados 6.1.1 a 6.1.5 incluyen resultados parciales, necesarios para introducirlos en *HEC- HMS* y el último, apartado 6.1.6, corresponde a los hidrogramas solución a los que se ha llegado a través de dicho software.

#### 6.1.1. Definición de la cuenca

En la Figura 28 se puede ver el modelo digital del terreno y, sobre él, el mapa de inundación facilitado por *IH Cantabria* para los periodos de retorno de 10 y 20 años. A partir de ellos y destacando sobre el mapa la zona de Pueblo Nuevo, que es sobre la que se realiza el estudio, se ha obtenido el contorno de las subcuencas y sus cauces principales.

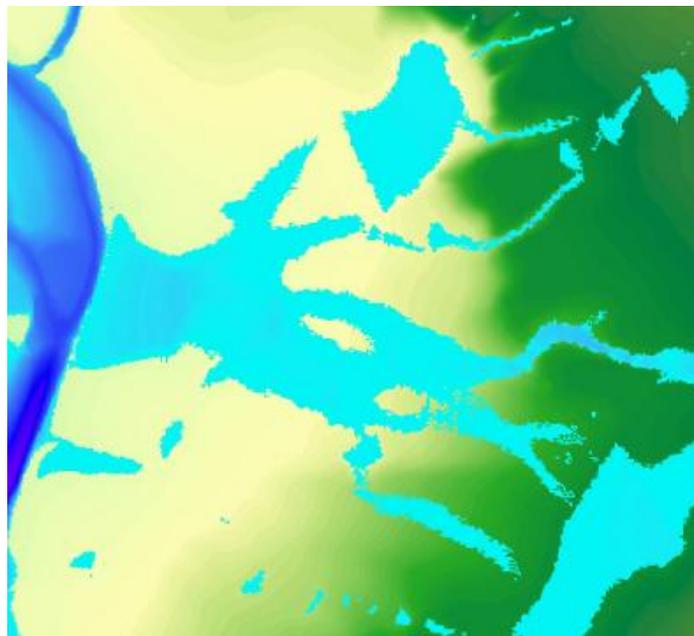


Figura 28: Mapa de inundación sobre modelo digital del terreno

Una de las partes fundamentales del proceso de delimitación de la cuenca es la ubicación de los puntos de salida del agua de las subcuencas siendo, lo más lógico es ubicarlos sobre el perímetro de la zona que se está estudiando ya que lo que interesa es conocer el agua de escorrentía que entra en el sector. En la Figura 29 se puede ver el área de estudio (en color verde) sobre una ortofoto (a su vez ubicada sobre el modelo digital del terreno) y sobre el mapa de inundación.

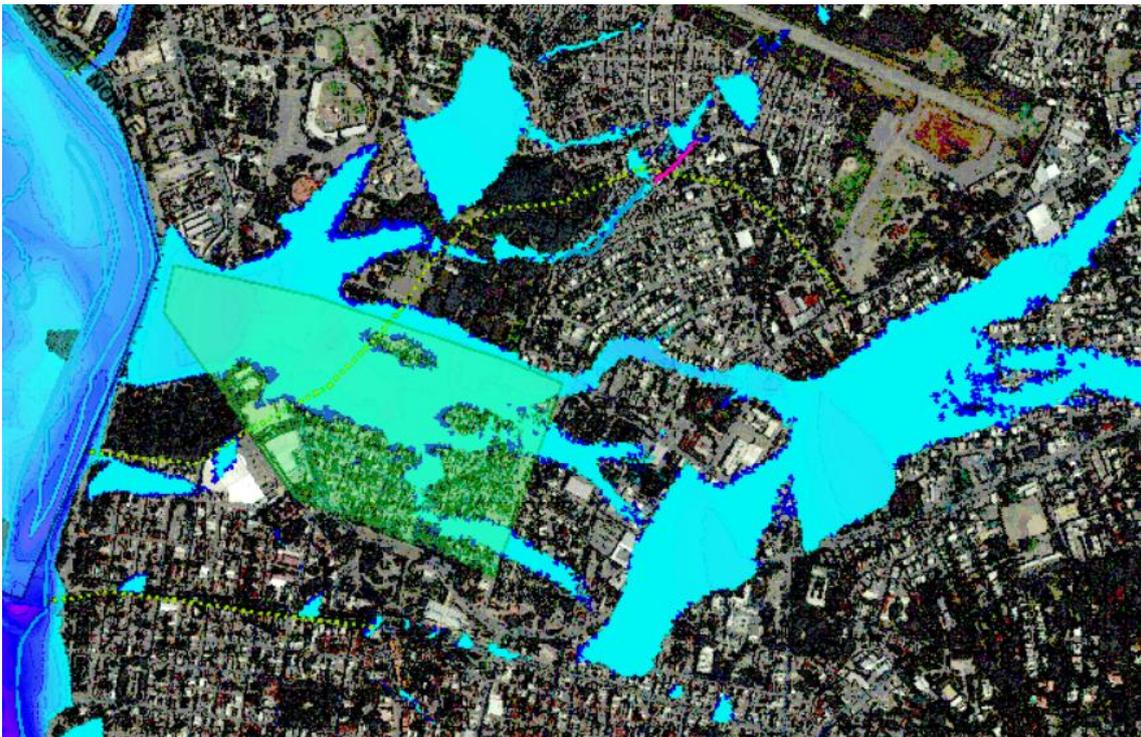


Figura 29: Área de estudio sobre ortofoto y mapa de inundación del terreno

A continuación, en la Figura 30, se muestra una imagen de las subcuencas (en color morado) delimitadas con el programa informático, sobre la que también se distinguen los cauces principales del agua (en azul) así como los recorridos más largos que puede seguir la escorrentía (amarillo). En rojo se pueden ver los puntos de salida del agua para cada subcuenca. Dichos puntos son importantes porque son por donde entra la escorrentía a la zona de estudio, conocida como *Pueblo Nuevo*.

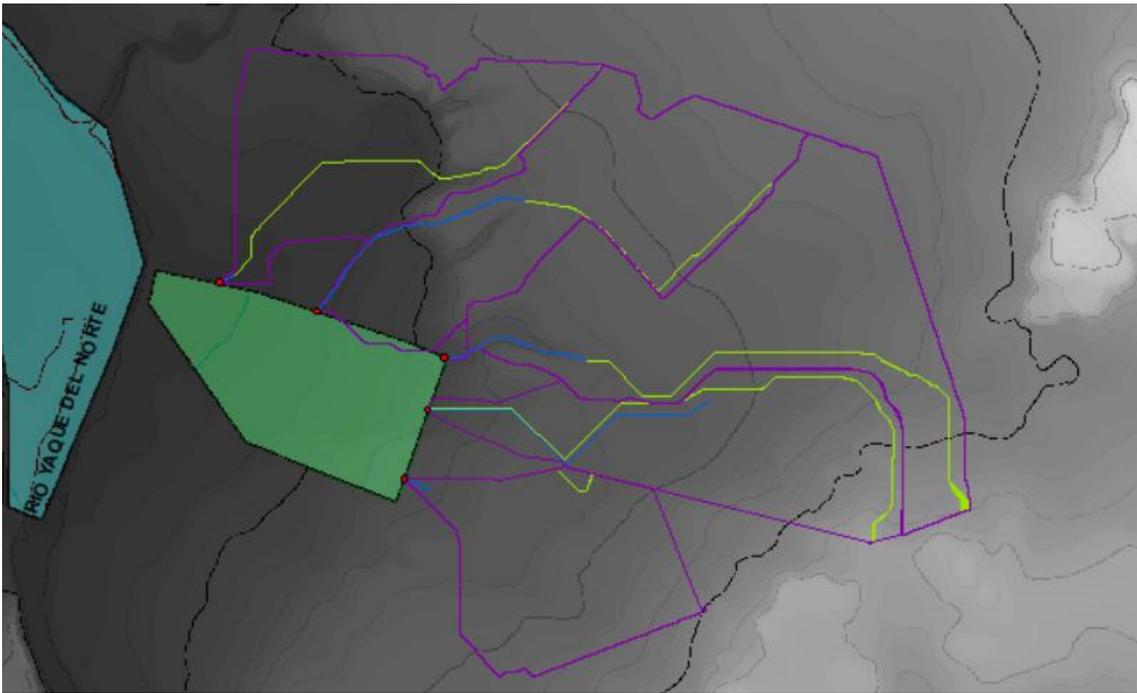


Figura 30: Cuenca definida mediante ArcGis

En la Figura 31 se puede ver el esquema de la cuenca una vez introducido en *HEC-HMS*. Las subcuencas aparecen nombradas con la letra C y un identificador numérico. En la figura también se pueden ver los puntos de salida del agua, de acuerdo con el curso del agua que se puede ver en los planos hidrográficos.

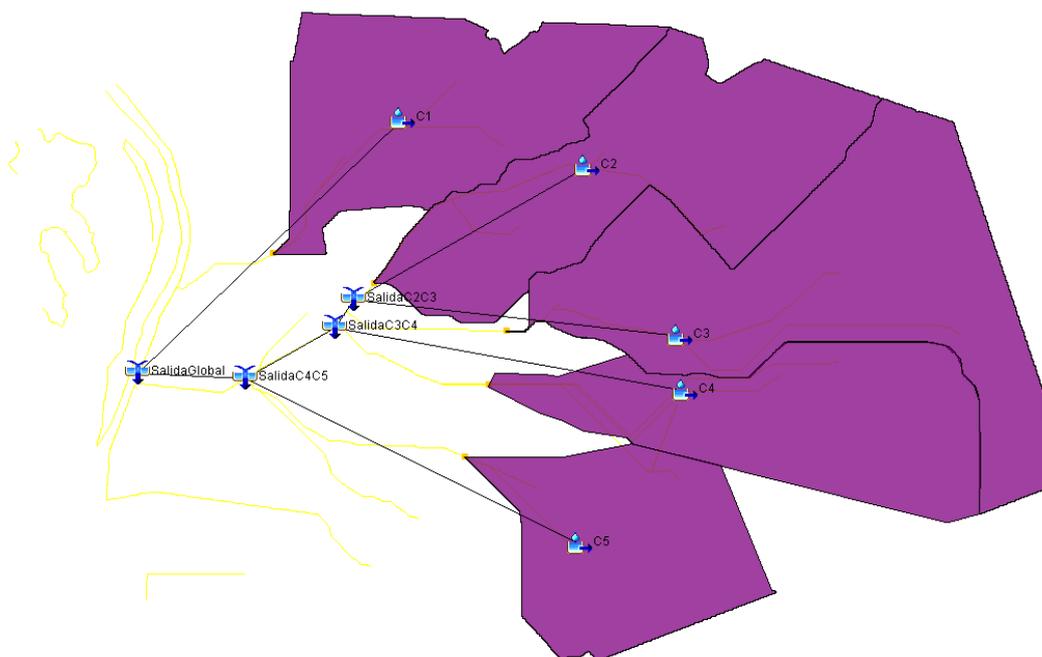


Figura 31: Esquema de la cuenca en HEC-HMS

En la Tabla 1 se recogen las superficies de cada una de las subcuencas, así como el área total de la cuenca (suma de todas las áreas) extraídas de *ArcGis* y que son las que se han introducido en *HEC- HMS*.

SUBCUENCA	ÁREA (km <sup>2</sup> )
1	0,5412
2	0,6222
3	0,8198
4	0,5095
5	0,4207
<b>TOTAL</b>	<b>2,9134</b>

Tabla 1: Área de cada subcuenca y área total

#### 6.1.2. Número de curva

Este modelo, desarrollado por el *Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (US Soil Conservation Service)* determina el umbral de escorrentía a través de un número de curva que depende de la capacidad de la cuenca de generar escorrentía superficial. Sin embargo, su utilización está limitada por una serie de condicionantes (22):

- Eventos aislados
- Tormentas de 24 horas de duración como máximos
- Zonas en las que el suelo no esté congelado
- Representa las condiciones medias de la cuenca
- Escorrentía directa

Para poder aplicar el método, ha sido necesario recabar tres datos:

- Uso de suelo
- Tipo de suelo
- Umbral de escorrentía

El conjunto de la cuenca objeto de estudio está formado por suelo urbano consolidado según puede verse en el mapa de los usos del suelo desarrollado por *European Space*

Agency (ESA) bajo el proyecto *GlobCover* en el año 2009 (Figura 32). Es decir, el 100% del uso del suelo de todas las superficies implicadas es urbano (Tabla 2).

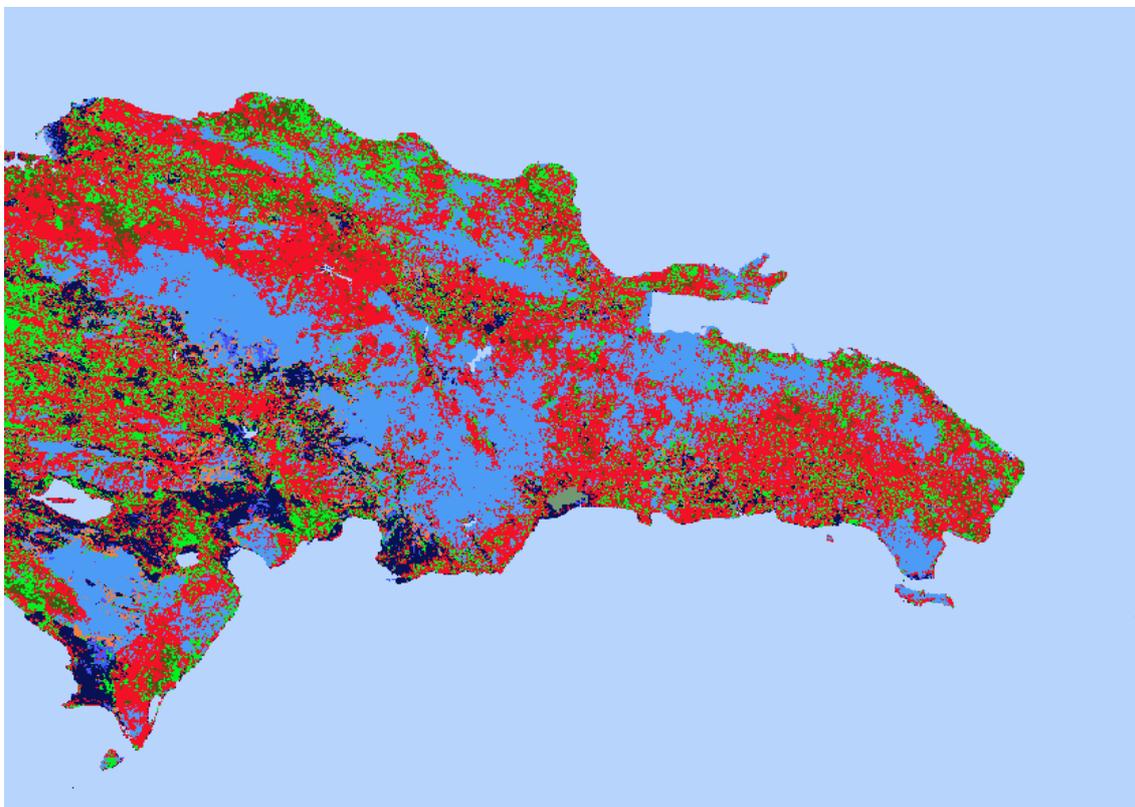


Figura 32: Mapa de los usos del suelo en la República Dominicana (Fuente: GlobCover, 2009)

USO DEL SUELO (%)	SUBCUENCA				
	1	2	3	4	5
<b>Urbano</b>	100	100	100	100	100

Tabla 2: Usos del suelo

A efectos del umbral de escorrentía, según la información facilitada por *IH Cantabria*, el suelo de esta zona de la República Dominicana es del grupo C. Los suelos de este grupo tienen una textura franco-arcillosa, franco-arcillosa-limosa o arcillo-arenosa y, por tanto, la infiltración es lenta y el drenaje imperfecto.

$$CN = \frac{25400}{254 + \frac{Po}{0,2}}$$

Donde:

- *CN* es el número de curva para condiciones de humedad previa II (normal)
- *Po* es la estimación inicial del umbral de escorrentía

El umbral de escorrentía *Po* se ha obtenido a partir de los valores que marca la *Instrucción 5.2 I.C. de drenaje superficial*. Se ha empleado dicha instrucción al no contar con la propia de la República Dominicana. Se ha tomado un *Po* de 1,25 como media del valor propio de pavimento bituminoso y adoquinado, los dos tipos de terreno más característicos de áreas urbanas consolidadas como la de *Pueblo Nuevo*. Es posible que el valor de CNII que se ha obtenido (Tabla 3) sea excesivamente conservador ya que es muy cercano a 100 y, aún en zonas tan consolidadas como ésta, existen zonas del terreno menos homogéneas o pequeñas áreas verdes que favorecen la infiltración.

USO DEL SUELO	TIPO DE TERRENO	Po (mm)	CNII
Área urbana consolidada	Adoquinado-Pavimento	1,25	97,598

Tabla 3: Número de curva para condiciones de humedad previa II en función del umbral de escorrentía

Como en todas las subcuencas la superficie urbana se corresponde de tejido urbano al 100%, en todas ellas corresponde el mismo valor de CNII (Tabla 4) y no es necesario prorratearlo para tener un valor total que sirva para el conjunto de la cuenca.

SUBCUENCA	1	2	3	4	5	TOTAL
CNII	97,598	97,598	97,598	97,598	97,598	97,598

Tabla 4: Número de curva para condiciones de humedad previa II para cada subcuenca y valor total

A partir de los datos de CNII puedo obtener fácilmente el número de curva para condiciones de humedad de suelo seco (CNI) y para suelo húmedo (CNIII). Los resultados se pueden ver en la Tabla 5 y en la Tabla 6 respectivamente

$$CNIII = \frac{23 \cdot CNII}{10 + 0,13 \cdot CNII}$$

SUBCUENCA	1	2	3	4	5	TOTAL
<b>CNIII</b>	98,941	98,941	98,941	98,941	98,941	98,941

Tabla 5: Número de curva para condiciones de humedad previa III para cada subcuenca y valor total

$$CNI = \frac{4,2 \cdot CNII}{10 - 0,058 \cdot CNII}$$

SUBCUENCA	1	2	3	4	5	TOTAL
<b>CNI</b>	94,466	94,466	94,466	94,466	94,466	94,466

Tabla 6: Número de curva para condiciones de humedad previa I para cada subcuenca y valor total

### 6.1.3. Tiempo de concentración

Tal y como se explicó en el apartado 5.1, para este trabajo se ha usado el método recomendado por la *Instrucción 5.2 I.C. de drenaje superficial*, que a su vez se corresponde con la formulación de *Témez*.

$$T_c = 0,3 \cdot \left( \frac{L}{I^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Donde:

- $T$  (h) es el tiempo de concentración
- $L$  (km) es la longitud del cauce
- $I$  (m/m) es la pendiente media

Otro parámetro que puede ser interesante para aplicar el método es el del tiempo de retardo, que se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$T_{lag} = 0,6 \cdot T_c$$

En la Tabla 7 se muestran los tiempos de concentración y de retardo para cada una de las subcuencas.

SUBCUENCA	LONGITUD (km)	PENDIENTE (m/m)	Tc (h)	Tc (min)	Tlag (h)	Tlag (min)
1	0,060	0,008	0,089	5,321	0,053	3,193
2	0,864	0,023	0,550	32,999	0,330	19,799
3	0,518	0,023	0,373	22,390	0,224	13,434
4	1,073	0,013	0,725	43,479	0,435	26,088
5	0,095	0,020	0,106	6,341	0,063	3,805

Tabla 7: Tiempos de concentración y de retardo para cada subcuenca

El tiempo de concentración que se utilizará será el de la subcuenca 4 por ser el mayor de todos, esto es debido a que el canal principal tiene una longitud considerablemente superior al del resto de subcuencas.

#### 6.1.4. Curvas IDF

El periodo de retorno para el que se va a diseñar el sistema de drenaje sostenible será de 10 años. Lógicamente, calcular la estructura de drenaje para un periodo de retorno más grande implicaría un factor de seguridad mayor, pero el objetivo del presente trabajo es proponer una solución para los eventos de tormenta más comunes en Santiago de los Caballeros y no medidas de seguridad para situaciones meteorológicas menos frecuentes, aunque más catastróficas.

A continuación, en la Figura 33, se muestran las curvas IDF facilitadas. La curva ubicada más abajo en la gráfica (color azul) es la que se corresponde al periodo de retorno de 10 años.

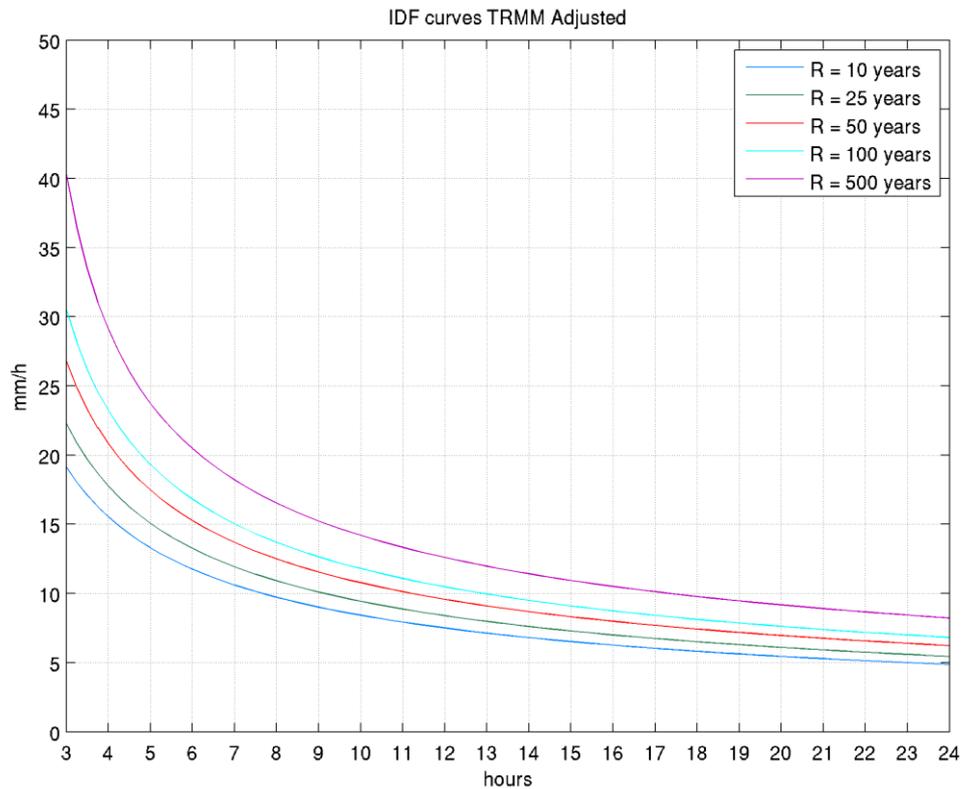


Figura 33: Curvas IDF (Fuente: IH Cantabria)

Antes de trabajar con las curvas IDF, ha habido que definir el tiempo de concentración con el que se va a trabajar. En este caso, se ha elegido el de la subcuenca 4 por tratarse del mayor de todos ellos y, por tanto, ser el tiempo de concentración total de la cuenca ya que es el mayor tiempo que puede tardar en desaguar una gota que cae sobre la misma. En la siguiente tabla (Tabla 8) se muestran los tiempos de concentración que se obtuvieron en el apartado anterior en horas y en minutos.

SUBCUENCA	Tc (h)	Tc (min)
1	0,089	5,321
2	0,550	32,999
3	0,373	22,390
4	0,725	43,479
5	0,106	6,341

Tabla 8: Tiempo de concentración para cada subcuenca en horas y en minutos

El problema de las curvas IDF facilitadas es que responden a una duración mínima del aguacero de 3 horas. Sin embargo, al trabajar con un tiempo de concentración de 43,5 minutos (0,73 horas), la obtención del hietograma no es inmediata, sino que hay que trabajar con la ecuación que modela la curva. Tal y como se puede ver en la Tabla 9, se han extraído distintos puntos de la curva para definirla de nuevo y en función de ella obtener una curva que ajuste correctamente y nos sirva para obtener la intensidad para tiempos de concentración más bajos.

I (mm/h)	t (h)
19	3
15	4,1
10	7,7
8,5	10
7,5	12
6,5	15
5	23

Tabla 9: Valores de intensidad y tiempo obtenidos de la curva IDF correspondiente al periodo de retorno de 10 años

A continuación, en la Figura 34, se puede ver la línea de tendencia de tipo logarítmico obtenida con *Excel*. Junto a ella está la ecuación que la define y gracias a la cual se puede obtener el valor exacto de la intensidad para el tiempo de concentración de 40 minutos.

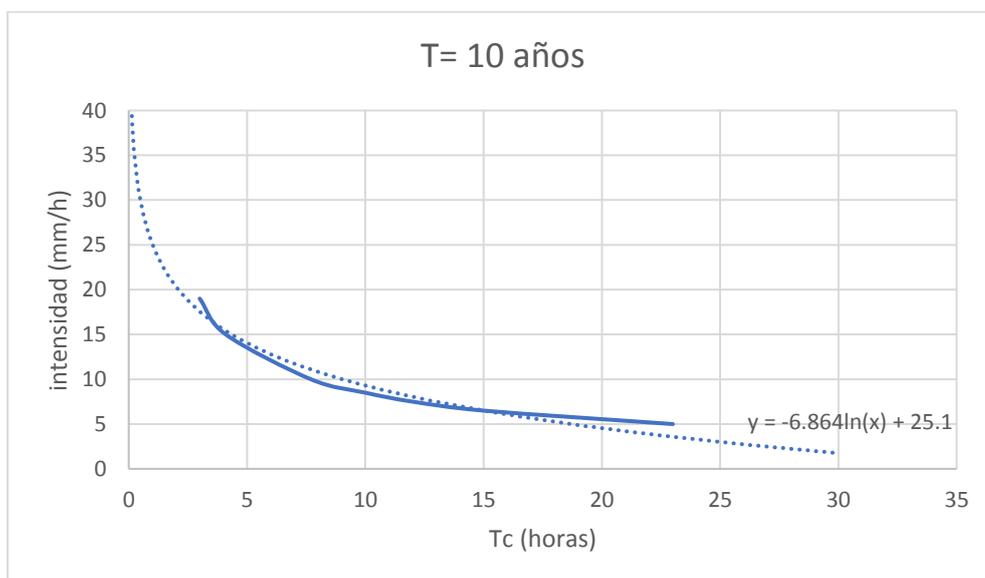


Figura 34: Curva IDF ajustada para emplearla para tiempos de concentración menores a 3 horas

## 6.1.5. Hietograma de avenida

El hietograma se puede expresar con intensidades (unidades en mm/h) o con precipitaciones (unidades en mm). Para este trabajo se calcula el correspondiente a precipitaciones ya que es el más útil porque es el que posteriormente se introducirá en *HEC- HMS*.

Para construir el hietograma de avenida es necesario definir previamente los intervalos de tiempo para los que se va a definir. En este caso como el tiempo total es de 40 minutos, los intervalos elegidos son de 10 minutos. En la Tabla 10 se puede ver la intensidad asociada a dicho intervalo.

Tc (min)	Tc (h)	I (mm/h)
<b>40</b>	0,667	27,883
<b>10</b>	0,167	37,399

Tabla 10: Intensidades asociadas al tiempo de concentración total y al intervalo elegido

Como el intervalo es de 10 minutos (0,167h), se calcula la intensidad de precipitación para esa hora y para 0,333h, 0,500h y 0,667h (ó 20, 30 y 40 minutos respectivamente). Los resultados se pueden ver en la Tabla 11.

A continuación, se obtiene la precipitación multiplicando dicha intensidad por el tiempo correspondiente (es decir, la segunda columna por la primera). A partir de dicha precipitación se calcula la variación de dicha precipitación entre cada intervalo y, por último, se puede obtener también la intensidad asociada dividiendo la variación de precipitación (cuarta columna) entre el tiempo (primera columna).

Tiempo (h)	I (mm/h)	P(mm)	$\Delta P$ (mm)	I (mm/h)
<b>0,167</b>	37,399	6,233	6,233	37,399
<b>0,333</b>	32,641	10,880	4,647	27,883
<b>0,500</b>	29,858	14,929	4,049	24,292
<b>0,667</b>	27,883	18,589	3,660	21,959

Tabla 11: Precipitaciones obtenidas para construir el hietograma de avenida

Por último, en la Figura 35, se muestra el hietograma de diseño construido mediante *Bloques Alternos*. Como se puede ver, emplea los datos de precipitación de la tabla anterior (columna 4).

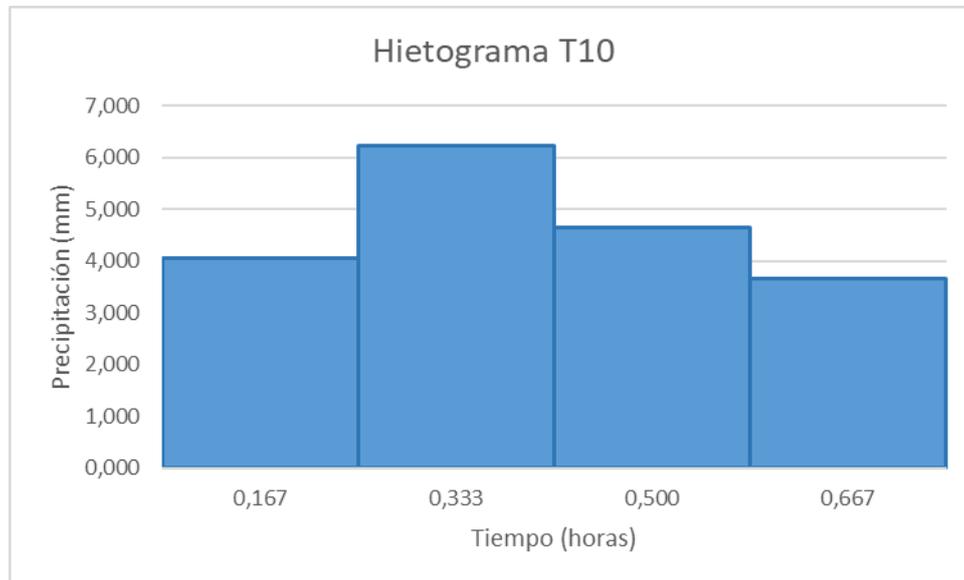


Figura 35: Hietograma de diseño de precipitación

#### 6.1.6. Hidrograma solución

Siguiendo lo indicado en el apartado 5.1, y antes de efectuar el análisis en *HEC- HMS*, el software solicita el tiempo durante el cual se desea estudiar la escorrentía. Se ha elegido un tiempo aleatorio (1h40minutos) lo suficientemente superior al tiempo de concentración de la cuenca para poder estudiar el avance de la escorrentía desde el comienzo hasta que empieza a vaciarse la cuenca.

En la Tabla 12 se pueden ver los resultados realizados tras un primer análisis. En la primera columna se muestran los elementos (subcuencas y puntos de salida del agua de las mismas). En la segunda el área de las subcuencas o la suma de áreas de las subcuencas de las que procede el agua en el caso de los puntos de salida. En la tercera y en la cuarta columna se muestra el caudal pico de agua y el momento en el que ocurre respectivamente (tomando como referencia las 00:00 del 1 de enero de 2000). Por último, en la quinta columna se muestra el volumen de agua que pasa por cada punto en milímetros.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
C3	0,8198	5,1	01ene2000, 00:39	12,66
C2	0,6222	3,4	01ene2000, 00:46	12,57
SalidaC2C3	1,4420	8,4	01ene2000, 00:42	12,62
C4	0,5095	2,4	01ene2000, 00:52	12,24
SalidaC3C4	1,9515	10,5	01ene2000, 00:44	12,52
C5	0,4207	3,2	01ene2000, 00:22	12,67
SalidaC4C5	2,3722	12,7	01ene2000, 00:41	12,55
C1	0,5412	4,2	01ene2000, 00:21	12,67
SalidaGlobal	2,9134	15,7	01ene2000, 00:40	12,57

Tabla 12: Resultados del primer análisis en HEC-HMS

El siguiente gráfico (Figura 36) muestra el hidrograma solución que se ha obtenido tras el primer análisis. Como se puede ver el caudal pico correspondiente a la salida global de la cuenca se encuentra próximo a los 16 m<sup>3</sup>/s.

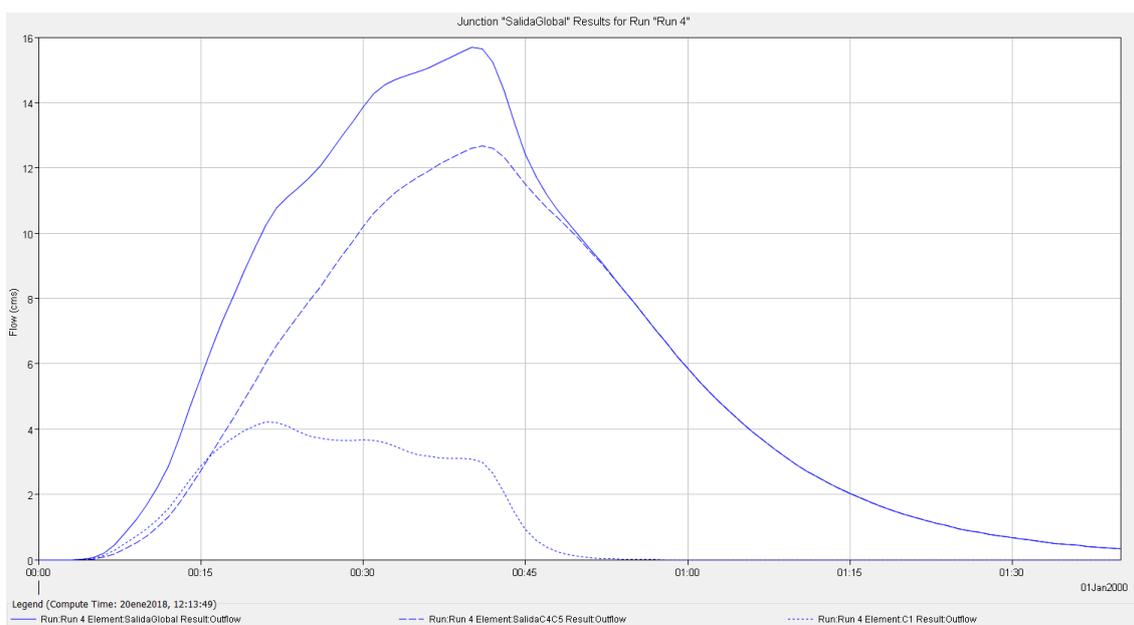


Figura 36: Hidrograma de salida tras el primer análisis en HEC-HMS

Debido a que el resultado es alto de cara a captar dicha escorrentía con un único elemento de drenaje sostenible como es un depósito de detención, se plantea una alternativa consistente en desviar los caudales de las subcuencas C1 y C2 directamente al río por su tamaño y cercanía al mismo y, de esta forma, reducir considerablemente el caudal de escorrentía que se conducirá hacia el depósito de detención. En la Figura 37 se muestra un esquema del desvío de agua hasta el río.

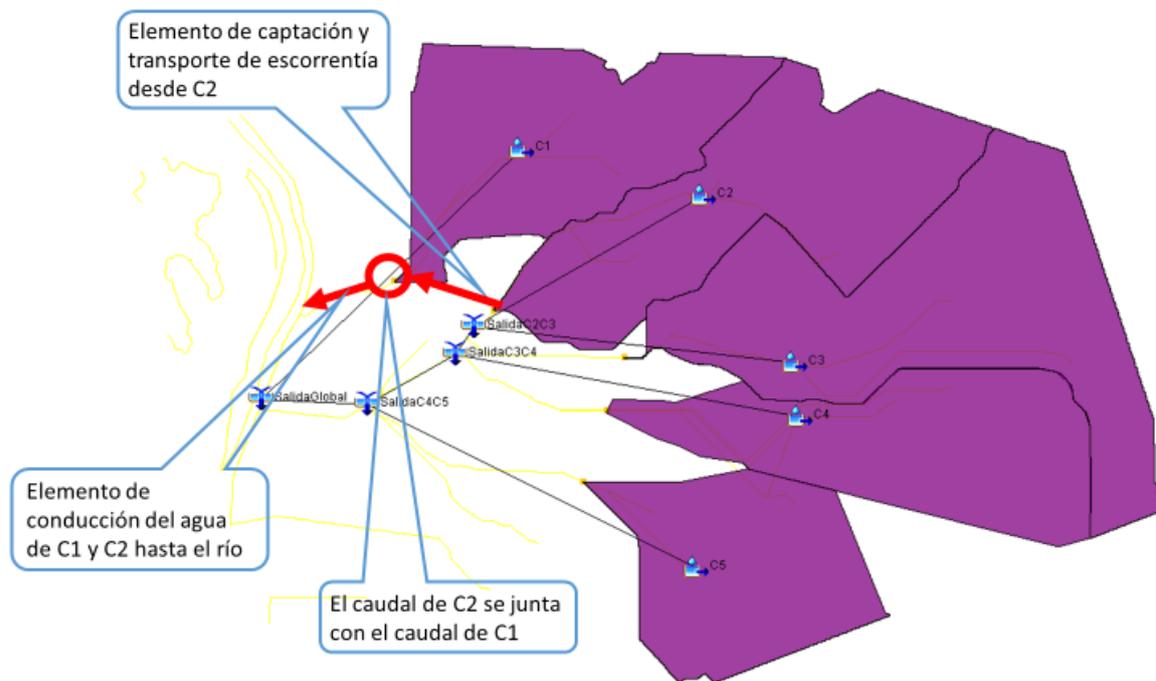


Figura 37: Esquema de la conducción de agua de las subcuencas C1 y C2

Por tanto, el segundo análisis, y definitivo, considera únicamente las cuencas C3, C4 y C5. Para obtener de nuevo los resultados, lo único que ha habido que hacer de cara al software es introducir una superficie nueva próxima a los 0 km<sup>2</sup> para las subcuencas que ya no se desean tener en cuenta. En la Tabla 13 se muestra la solución para este segundo análisis y, en la Figura 38, se muestra el nuevo hidrograma de salida. Como se puede ver, gracias a la decisión tomada, el caudal pico es mucho menor (9,4 m<sup>3</sup>/s) lo que hace mucho más viable la construcción de un depósito de detención y el desvío del agua desde el mismo hasta el río.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
C3	0,8198	5,1	01ene2000, 00:39	12,66
C2	0,0010	0,0	01ene2000, 00:46	12,57
SalidaC2C3	0,8208	5,1	01ene2000, 00:39	12,66
C4	0,5095	2,4	01ene2000, 00:52	12,24
SalidaC3C4	1,3303	7,1	01ene2000, 00:43	12,50
C5	0,4207	3,2	01ene2000, 00:22	12,67
SalidaC4C5	1,7510	9,4	01ene2000, 00:41	12,54
C1	0,0010	0,0	01ene2000, 00:21	12,67
SalidaGlobal	1,7520	9,4	01ene2000, 00:41	12,54

Tabla 13: Resultados del segundo análisis en HEC-HMS

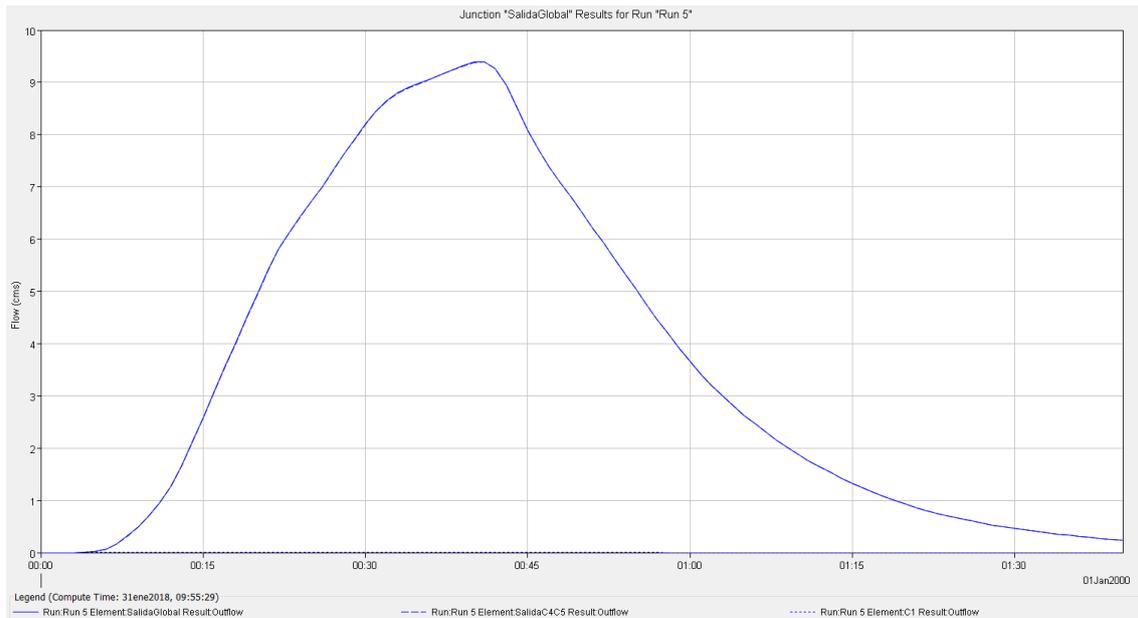


Figura 38: Hidrograma de salida tras el segundo análisis en HEC-HMS

## 6.2. Resultados del estudio de laminación

A continuación, se exponen los resultados obtenidos dentro del estudio de laminación del depósito de almacenamiento de agua siguiendo la metodología que se especificó en el apartado 5.2.

### 6.2.1. Ubicación del depósito y superficie disponible

En primer lugar, se ha recurrido a una imagen aérea del área de estudio para poder llevar a cabo un análisis visual de las posibles ubicaciones para el sistema de almacenamiento de agua. Al tratarse de una zona densamente poblada, no existen grandes terrenos sin construir. Sin embargo, si es posible distinguir dos zonas con espacio aparentemente grande para poder construir el sistema. Sobre la Figura 39 se puede distinguir en color verde la zona sobre la que se quiere trabajar para encauzar la escorrentía urbana y en rojo dos de los terrenos que se han localizado para ubicar el tanque de detención.

Para seleccionar terrenos válidos para instalar el tanque se han seguido los siguientes criterios:

- Espacios sin casas construidas
- Cercanos exteriormente a la zona de *Pueblo Nuevo*

- Próximos a los puntos de salida de la escorrentía de la cuenca



Figura 39: Posibles ubicaciones del tanque de detención (Fuente: Google Earth e IH Cantabria)

En la Figura 40 se ofrece una vista más en detalle de las dos posibles soluciones. Como se puede ver no existen edificaciones sobre ninguna de ellas, aunque en ambos casos se ubican en recintos con edificios colindantes.

- Solar 1: 2.700m. El espacio disponible es menor pero está más cerca de la zona límite de estudio y, por tanto, del punto que se consideró como salida de la cuenca así que los datos con los que se trabajarían serían más realistas.
- Solar 2: 4.400m<sup>2</sup>. El espacio es mayor pero por el contrario está bastante antes del punto de salida de la cuenca así que a esa altura no se habría alcanzado el caudal pico considerado.



Figura 40: Vista en detalle de las posibles ubicaciones del tanque de detención (Fuente: Google Earth e IH Cantabria)

Teniendo en cuenta las ventajas arriba mencionadas para cada opción, se ha seleccionado la primera de ellas debido a que la superficie que ofrece es suficiente para las dimensiones que se estima que el sistema necesitará.

#### 6.2.2. Caudal de salida del depósito y dimensionamiento previo

En la actualidad, la capacidad de desagüe del sistema aguas abajo de la zona donde se pretende ubicar la estructura de regulación es de  $1,5\text{m}^3/\text{s}$ . Dicho dato es muy importante de cara al diseño del depósito de detención, ya que limitará el máximo caudal de salida del mismo.

Por otro lado, antes de hacer los cálculos correspondientes al hidrograma de laminación, con el que se podrá obtener la altura a la que llegará a estar la lámina de agua en el depósito, se ha realizado en sencillo cálculo previo para saber el volumen que deberá almacenar aproximadamente si el caudal de la tubería de salida es de  $1,5\text{ m}^3/\text{s}$ . Dicho cálculo consiste en calcular el área entre la curva del hidrograma que ya se tiene y una línea horizontal correspondiente a la salida del agua del depósito (sin laminación). En la Figura 41 se muestra la gráfica con las curvas y el área contenida.

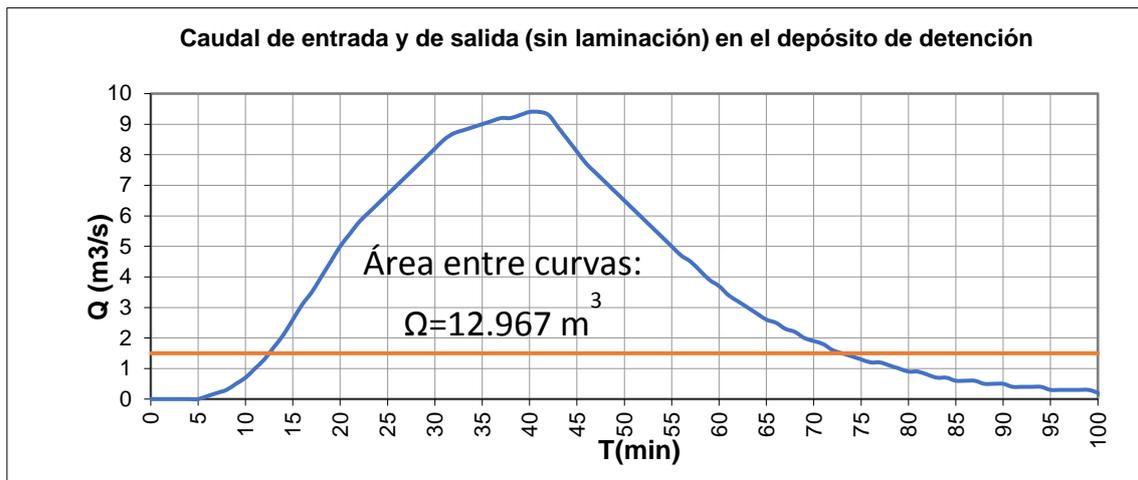


Figura 41: Gráfico para el cálculo aproximado del volumen necesario del depósito de detención

Teniendo en cuenta el volumen que se prevé que se tendrá que almacenar y el área del solar, se estima una altura inicial del depósito de 6,5m.

### 6.2.3. Hidrograma de laminación

La laminación del agua en el depósito de detención atiende a la formulación de desagüe por orificio y es la siguiente:

$$Q = Cd \cdot S \cdot \sqrt{2gh}$$

Donde:

- $Q$  ( $m^3/s$ ) es el caudal de salida
- $S$  ( $m^2$ ) es la sección del orificio de salida
- $h$  (m) es la altura de la lámina de agua sobre la rasante del orificio de salida
- $Cd$  es el coeficiente de desagüe y adopta el valor de 0,6

Teniendo en cuenta que el máximo caudal de salida del depósito está limitado por el caudal que puede transportar la red de drenaje actual y que, como se ha dicho en el apartado previo, aguas abajo del depósito es de  $1,5m^3/s$  aproximadamente, con la formula anterior de desagüe por orificio se calcula el diámetro máximo que debe tener

la sección de salida del depósito. Se considera para el caso más crítico, que es el depósito lleno y, por tanto, 6,5 metros de altura de agua.

$$S = \frac{Q}{Cd \cdot \sqrt{2gh}} = \frac{1,5}{0,6 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 6,5}} = 0,22m^2 \rightarrow D = 0,53m$$

Empleando las ecuaciones propias del método *Puls Modificado* para el cálculo de la laminación que se explicaron en el apartado 5.2, se ha podido construir el hidrograma de salida del depósito de detención (Figura 42). La curva de color azul corresponde al hidrograma de entrada del agua en el sistema de almacenamiento mientras que la de color naranja es la de salida.

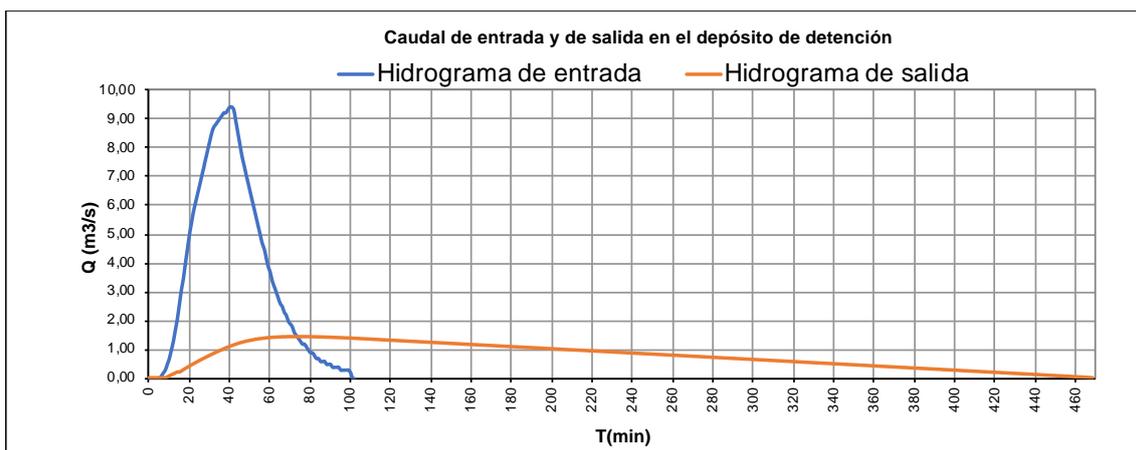


Figura 42: Hidrogramas de entrada y salida en el depósito de detención

En la Figura 43, se muestra una gráfica con la variación de la altura de la lámina de agua en el depósito a lo largo de 7h50 minutos. En esta gráfica se puede ver la máxima altura que alcanzará el agua (aproximadamente 6,25m).

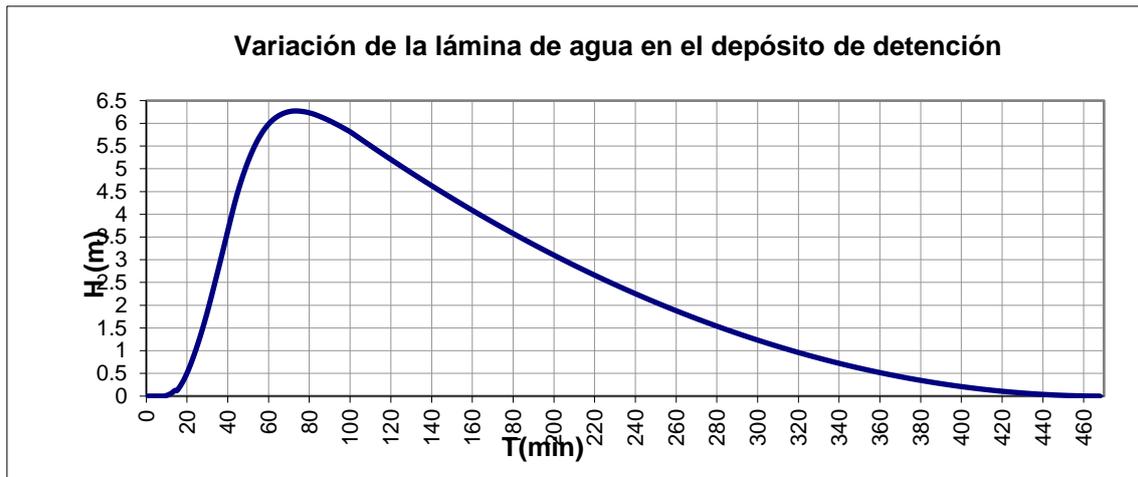


Figura 43: Variación de la altura de la lámina de agua en el depósito de detención

#### 6.2.4. Verificación mediante SWMM

Como ya se explicó en el apartado 5.2, SWMM es un modelo adecuado para llevar a cabo verificaciones desde el punto de vista dinámico de este tipo de sistemas.

Se ha introducido en el programa el esquema de la red utilizando los siguientes elementos:

- **Nodo inicial:** se ha colocado un nodo antes de la entrada al depósito.
- **Depósito:** se ha introducido un depósito de 2700 m<sup>2</sup> de superficie, que es la superficie del terreno que se seleccionó para ubicar el depósito, así como una altura de 6,5 metros.
- **Nodos y conductos:** se ha trazado una posible ruta de la tubería desde la salida del depósito hasta el punto de enlace con la red (no se poseen planos de la red de drenaje de la ciudad). Se ha considerado que la tubería sale del fondo del depósito (a 4 metros de profundidad) y alcanza los 3 metros por debajo del terreno (respecto la cota del fondo de la tubería), a unos 600 metros, aproximadamente. Los datos de las coordenadas de la tubería se extraen gracias al modelo digital del terreno que se posee de la ciudad.

Como no se tiene información del trazado de la red de drenaje de Santiago de los Caballeros, aunque sí se sabe que el caudal máximo que puede transportar la red en ese entorno de la ciudad es de 1,5 m<sup>3</sup>/s, se ha dibujado un posible recorrido de la tubería

hasta el punto de conexión con la red de la ciudad. En la Figura 44, se muestra de forma esquemática este recorrido y a continuación, en la Tabla 14, se puede ver la información de las coordenadas de los puntos, introducidos como nodos en SWMM.



Figura 44: Esquema de la tubería que va desde el depósito hasta el punto de enlace con la red de la ciudad

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z Terreno	X relativa	Y relativa	Z tubería
1	321261.15	2152514.67	165.29	0	0	158.79
2	321192.03	2152548.07	162.70	-69.12	33.40	158.70
3	321177.47	2152521.28	162.97	-83.67	6.61	158.61
4	321103.35	2152512.45	161.17	-157.80	-2.22	157.20
5	321054.93	2152500.01	160.27	-206.22	-14.66	156.27
6	320971.59	2152527.79	156.62	-289.56	13.13	154.68
7	320869.99	2152559.54	154	-391.16	44.88	152.70
8	320773.94	2152596.85	153.03	-487.21	82.18	150.79
9	320677.10	2152630.98	151.85	-584.05	116.31	148.85

Tabla 14: Datos de entrada a SWMM

Tras introducir todos los datos que se han especificado en el modelo, se realiza la simulación y se obtienen los resultados. En primer lugar, se observa que la máxima profundidad de la lámina de agua en el depósito es de 5,71 m. Es decir, una altura de las paredes del depósito de 6,5 m, como se ha planteado, podría recoger perfectamente el

volumen de escorrentía esperado. Por otro lado, el espacio de tiempo que pasa desde que comienza a llenarse el depósito hasta que se vacía por completo es de 8 horas, por tanto, resulta prácticamente similar a la del análisis empleando *Puls Modificado* (eran 7h50minutos).

A continuación, en la Tabla 15, se muestran una comparativa con los resultados obtenidos para ambos modelos:

Estudio de laminación	Estático ( <i>Puls Modificado</i> )	Dinámico (SWMM)
<b>Profundidad máxima de agua en el depósito</b>	6,25 m	5,70 m
<b>Tiempo de vaciado</b>	7h 50minutos	8 horas
<b>Hora pico (máxima profundidad)</b>	1h 10minutos	1h 15minutos
<b>Máximo caudal de salida</b>	1,5 m <sup>3</sup> /s (limitado por la capacidad de la red aguas abajo)	

Tabla 15: Comparativa de los resultados del estudio de laminación con *Puls Modificado* y con SWMM

En las siguientes dos imágenes (Figura 45 y Figura 46), se muestra la comparativa de los resultados de ambos modelos de forma gráfica. En azul se muestra la línea correspondiente a *Puls Modificado* mientras que en naranja a SWMM. En la primera imagen se pueden ver los hidrogramas de salida del depósito para ambos modelos. En el caso del SWMM, el caudal máximo de salida se mantiene durante más tiempo y luego cae bruscamente, mientras que para *Puls Modificado* la línea es más tendida. En la segunda imagen se puede ver la variación de la lámina de agua para los dos modelos y también se observa diferencias en la forma de la curva, pues la de SWMM tiene menos pendiente.

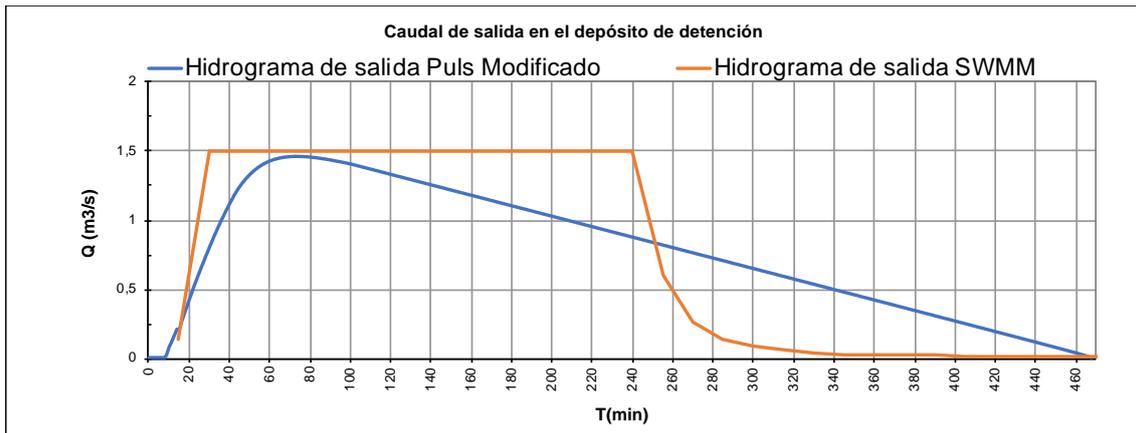


Figura 45: Comparativa de los hidrogramas de salida obtenidos con los dos modelos

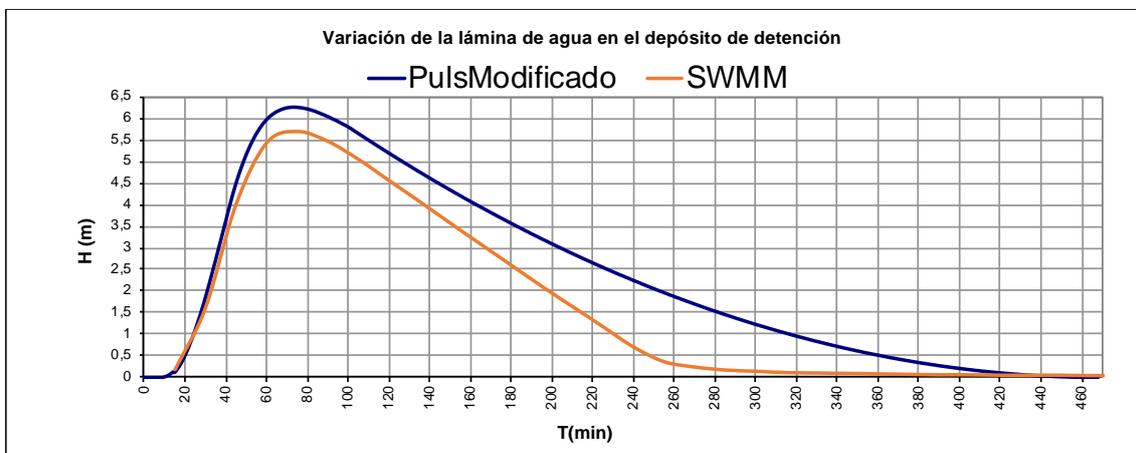


Figura 46: Comparativa de las alturas en la lámina de agua obtenidas con los dos modelos

Una ventaja de mantener los 6,5 m de altura, a pesar de que el análisis con SWMM permite pensar que no se superarán los 5,70 m, es que no hay que considerar el volumen real del depósito (hay que tener en cuenta que, al tratarse de una cancha, habrá elementos propios de la misma en el interior) puesto que hay un amplio margen de volumen disponible.

La Figura 47 corresponde al perfil de elevación del agua en el sistema. En concreto, en la figura se puede ver el instante en que el agua adquiere la máxima cota en el depósito.

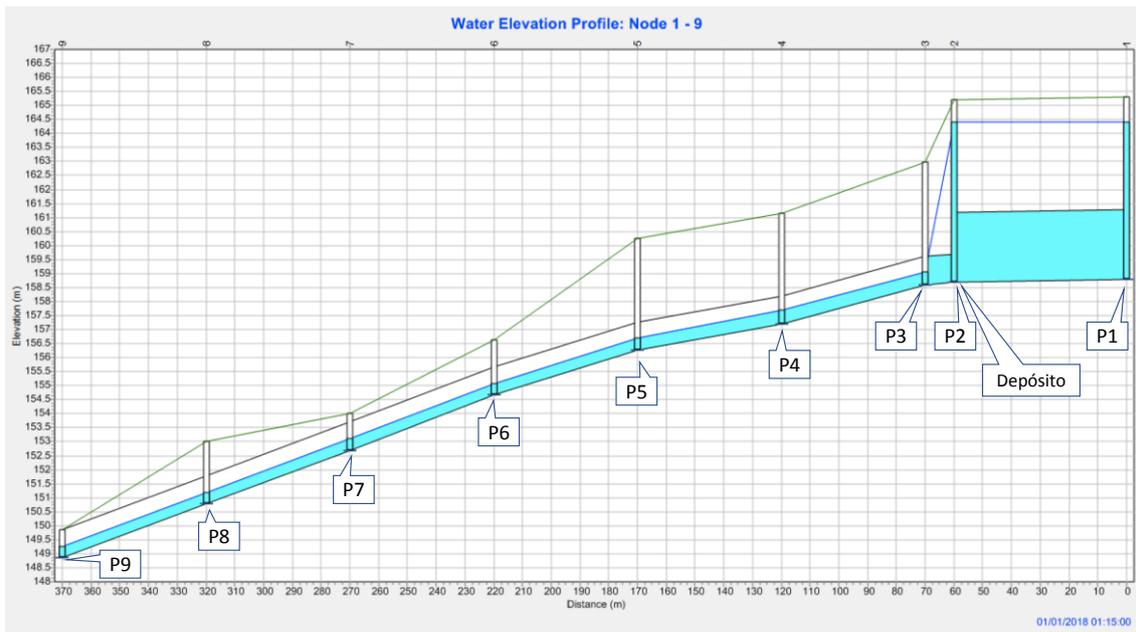


Figura 47: Perfil de elevación del agua en el sistema

### 6.3. Dimensiones de la solución propuesta

Una vez finalizado el estudio de laminación, se ha procedido a dimensionar el depósito de almacenamiento de agua. Tal y como se indicó en el apartado 4.4, cualquier solución que se elija llevar a cabo debe considerar el problema de los residuos sólidos en la ciudad para evitar colmataciones y con ellas, posibles gastos elevados de mantenimiento. En el caso de la salida del depósito y la entrada a la conducción a presión es recomendable la colocación de rejillas.

En la Tabla 16, se recogen los datos relacionados con el sistema de drenaje sostenible que se plantea como solución a este trabajo. El depósito de detención de agua propuesto consiste en un graderío a lo largo de tres de las cuatro paredes del perímetro, así como un espacio central suficientemente grande para la práctica de actividades culturales y deportivas. La instalación se completa con un escenario para posibles actuaciones musicales, teatrales, etc. Precisamente, aprovechando el espacio bajo el escenario se ha creado un depósito menor, donde se dirigirá el agua en primer lugar, de tal forma que si la tormenta es pequeña y el caudal no es suficiente para llenar el depósito se pueda almacenar en ese espacio y así evacuarlo con más facilidad, sin que la cancha quede inutilizada. Una vez que este depósito se llena, el agua pasa a través de unas rejillas y ocupa el resto de la cancha. A su vez, el agua sale de la cancha a través de

unas válvulas clapetas que conducen el flujo hasta debajo del escenario de nuevo y de ahí al exterior por dos conductos. Un aliviadero ayuda a evacuar el agua cuando el volumen que entre sea superior a aquel para el cual está dimensionada la cancha.

<b>Tipo de SUDS</b>	<b>Depósito de detención</b>
<b>Uso</b>	Cultural y deportivo (escenario, gradas, canastas)
<b>Superficie exterior</b>	2700 m <sup>2</sup> (67.5x40)
<b>Altura paredes</b>	6,5 m

*Tabla 16: Características del depósito de almacenamiento del agua de escorrentía*

Con una superficie de 2.700 m<sup>3</sup> y una profundidad de 6,5 m, se espera que el depósito sea capaz de almacenar el agua de escorrentía correspondiente a un periodo de retorno de 10 años. El agua entrará en el depósito a través de dos tuberías ubicadas bajo las gradas, de 1,5 metros de diámetro cada una. El volumen aprovechable para almacenar el agua de lluvia es prácticamente el total de la cancha ya que el espacio de graderío y escenario, como ya se ha explicado, también será aprovechado para introducir tuberías, así como para crear un depósito menor. En la Figura 48, se puede ver una recreación de cómo sería el depósito y en el Anejo a este documento se pueden ver los planos de detalle del depósito con sus elementos principales.

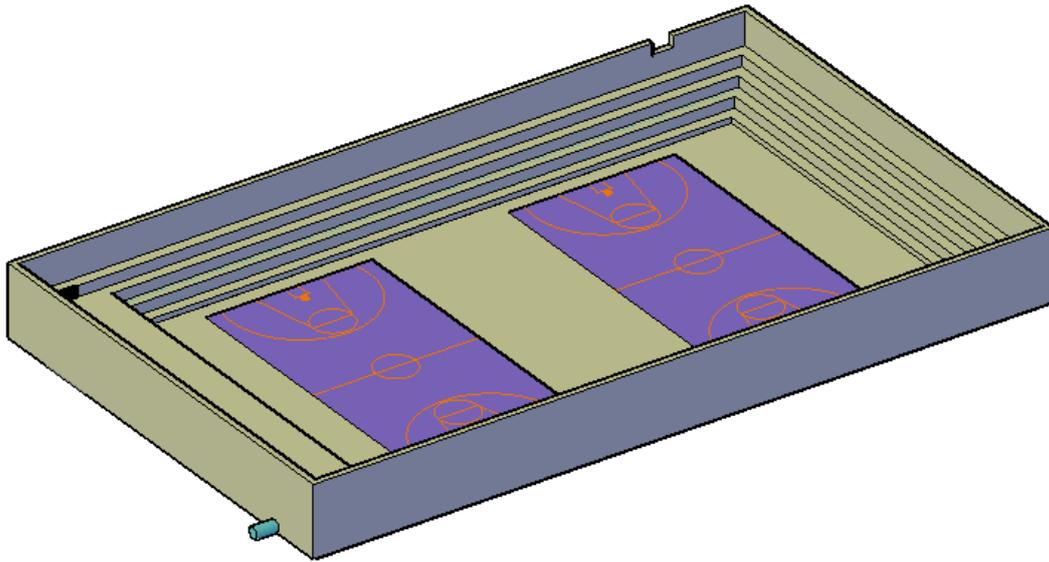


Figura 48: Depósito de detención

Por último, desde el depósito saldrá una tubería de 1 metro de diámetro que recorrerá 595,5 metros hasta el punto de enlace con la red de la ciudad. Entre el depósito y la tubería se colocará una válvula de mariposa, que aumente o disminuya la sección de paso del agua, de tal forma que el caudal no sobrepase  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los problemas de inundación constituyen hoy en día uno de los riesgos naturales que limitan el desarrollo de muchas ciudades en el mundo, en especial ciudades emergentes que están experimentando un rápido crecimiento en áreas como Iberoamérica. Dichos problemas de inundación se deben principalmente a dos cosas: la propia pluviometría de la zona (caracterizada por lluvias muy intensas) y un desarrollo urbano totalmente desordenado que ha ocupado los terrenos que antes servían para el desagüe de las crecidas de las quebradas y de los ríos. Santiago de los Caballeros es un ejemplo de ciudad en la que se producen procesos de inundación en el centro urbano causados por ese desarrollo incontrolable.

La solución para este tipo de problemas se puede encontrar en el diseño de unos elementos de drenaje urbano que transporten un mayor volumen de agua o en la búsqueda de soluciones sostenibles que minimicen las escorrentías y laminen las crecidas aprovechando la capacidad de almacenamiento de zonas naturales o de estructuras artificiales, como son los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

En el caso de Pueblo Nuevo, en la ciudad de Santiago de los Caballeros, existe en la actualidad una red de drenaje en la zona urbana de muy poca capacidad. La ampliación de su capacidad supondría actuar sobre una trama urbana muy consolidada en la que existe muy poco espacio para construir colectores enterrados de gran tamaño. Esto se une a la existencia en esa zona de muchos servicios, estructuras de saneamiento, etc. que complicarían más la actuación en el subsuelo. Sin embargo, en la periferia de esa zona existen unos espacios todavía no consolidados que se podrían utilizar para el almacenamiento de los caudales pico generados por las crecidas de los ríos y quebradas que por allí pasan.

En este estudio se plantea el análisis hidrológico de la cuenca que drena a la zona de Pueblo Nuevo mediante el modelo hidrológico *HEC-HMS* y, a partir de él, se calculan los caudales de crecida para un periodo de retorno de 10 años. Con dichos caudales se analiza la posibilidad de construir infraestructuras de almacenamiento que puedan

laminar esas puntas hasta los caudales que hoy en día es capaz de admitir la red de drenaje de la localidad.

De este trabajo se deduce que hay una serie de cuencas periféricas a la zona de Pueblo Nuevo que pueden desviarse hacia el río de forma directa a través de una actuación que se denomina “descabezado” de quebradas. Para el caudal restante, que no se puede desviar de forma directa al río que pasa por esa zona, se buscan posibles ubicaciones de elementos que puedan almacenar los picos de las crecidas. Evidentemente, en una trama urbana tan consolidada la búsqueda de ese tipo de soluciones persigue también definir espacios que puedan ofrecer un servicio a la ciudad cuando no sean utilizados para la laminación de avenidas. Por ejemplo, zonas deportivas o espacios para actividades culturales y de ocio. Este tipo de soluciones de drenaje sostenible reciben el nombre de tanques o depósitos de detención.

En la zona periférica o de aguas arriba existen dos posibles ubicaciones de 2.700 y 4.400 metros cuadrados respectivamente. La primera parcela es preferible frente a la segunda debido a que está más próxima al punto de salida de la cuenca. A partir de la definición de la ubicación de la zona y de los caudales se calcula, mediante la aplicación del método *Puls Modificado*, el volumen necesario de almacenamiento, que resulta ser de 16.875 metros cúbicos de capacidad. Por ello, se propone la construcción de una cancha deportiva y de ocio enterrada en el terreno, aunque no cubierta, que almacene los caudales de escorrentía que lleguen a la misma por gravedad y que sea capaz de evacuar el caudal almacenado, también por gravedad, a través de la red de colectores existentes.

Los caudales calculados mediante *Puls Modificado* se contrastan con SWMM, un modelo dinámico de simulación de precipitaciones que tiene en cuenta las características de la conducción aguas abajo del depósito. De esta forma se puede garantizar que el volumen de almacenamiento calculado es el adecuado.

En definitiva, en una cuenca como ésta, que se caracteriza por unas pendientes muy fuertes en la periferia urbana, lo más conveniente es aprovechar alguna parte del tejido urbano menos consolidado para generar sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS) y reducir así la escorrentía. Una futura línea de trabajo consistiría en buscar nuevas áreas para construir más depósitos o infraestructuras que retengan el exceso de

caudal en la zona, así como “descabezar” más arroyos para dirigir parte del caudal directamente hacia el río.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Banco Interamericano de Desarrollo. Banco Interamericano de Desarrollo. [En línea] 13 de 05 de 2017. <http://www.iadb.org/es/temas/ciudades-emergentes-y-sostenibles/dando-respuesta-a-los-desafios-de-desarrollo-urbano-de-las-ciudades-emergentes,6690.html>.
2. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Vivienda y Desarrollo Urbano, Sector de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible. *Guía metodológica. Iniciativa ciudades emergentes y sostenibles*. ND : ND, 2016.
3. IH Cantabria; IDOM. *Estudios base para Santiago de los Caballeros, República Dominicana*. ND : ND, 2015.
4. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*. ND : United Nations, 2014.
5. Horacio Terraza, y otros. *Santiago de los Caballeros. Ciudad Sostenible*. BID. Santiago de los Caballeros : BID publicaciones, 2016.
6. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). *Gestión del Riesgo Climático*. Naciones Unidas. Nueva York : Naciones Unidas, 2010.
7. Herrera Moreno, Alejandro y Orrego Ocampo, Juan Carlos. *Revisión del Estado de la Situación de Riesgo Climático y su Gestión en República Dominicana*. International Institute for Sustainable Development. Santo Domingo : Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible, 2011.
8. CIRIA (Construction Industry Research and Information Association). *Sustainable urban drainage systems. Design manual for England and Wales. CIRIA C522*. Londres : CIRIA, 2001.
9. CIRIA . *Sustainable drainage systems. Hydraulic, structural and water quality advice. CIRIA C609*. Londres : CIRIA, 2004.
10. Rodríguez Díaz, Héctor Alfonso. *Drenaje urbano. Elementos de diseño: Drenaje urbano no convencional*. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería , 2015.

11. Castro Fresno, Daniel, y otros. Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). s.l. : Interciencia, 2005, Vol. 30.
12. Perales Momparler, Sara y Andrés-Doménech, Ignacio. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia. s.l. : Publiteca, 2007, págs. 66-67.
13. Parkinson, Jonathan y Mark, Ole. *Urban Stormwater Management in Developing Countries*. Londres : IWA Publishing, 2006.
14. Hin, Dr Lai Sai, Azamathulla, Dr Md Hazi y Abu Hasan, Zorkeflee. Research and Innovation. *Universiti Sains Malaysia*. [En línea] 2007. <http://redac.eng.usm.my/html/projects/STG/STG.html>.
15. Ghani, A. Ab, y otros. Bio-Ecological drainage system (BIOECODS): Concept, design and construction. [aut. libro] S.S.Y. Wang, y otros. *Advances in Hydro-Science and Engineering*. Oxford : University of Mississippi, 2004, Vol. VI.
16. Beecham, S. y Fallahzadeh, R. Innovative approaches to urban water management in developing countries. s.l. : WIT Press, 2011, Vol. 150.
17. Uribe, Natalia. *SWAT. Conceptos básicos y guía rápida*. Texas : Grassland Soil and Water Research Laboratory, 2010.
18. HEC USACE. [En línea] [Citado el: 02 de 04 de 2018.] <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.
19. Scharffenberg, W. *Hydrologic modelling system. HEC-HMS User's manual. Version 4.2*. California : US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center, 2016.
20. Álvarez, César. Apuntes de la asignatura Ampliación de Hidrología (Universidad de Cantabria). 2015.
21. EPA United States Environmental Protection Agency. EPA. *Storm Water Management Model (SWMM)*. [En línea] <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.

22. Soil Conservation Service. *Hydrology Training Series. Runoff Curve Number Computations. Study Guide*. s.l. : National Employee Development Staff. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture, 1989.

23. Bayon, Joseba Rodriguez, y otros. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del País Vasco. [En línea] [Citado el: 14 de 05 de 2017.] <http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/Publicaciones%20de%20nuestros%20colegiados/suds>.

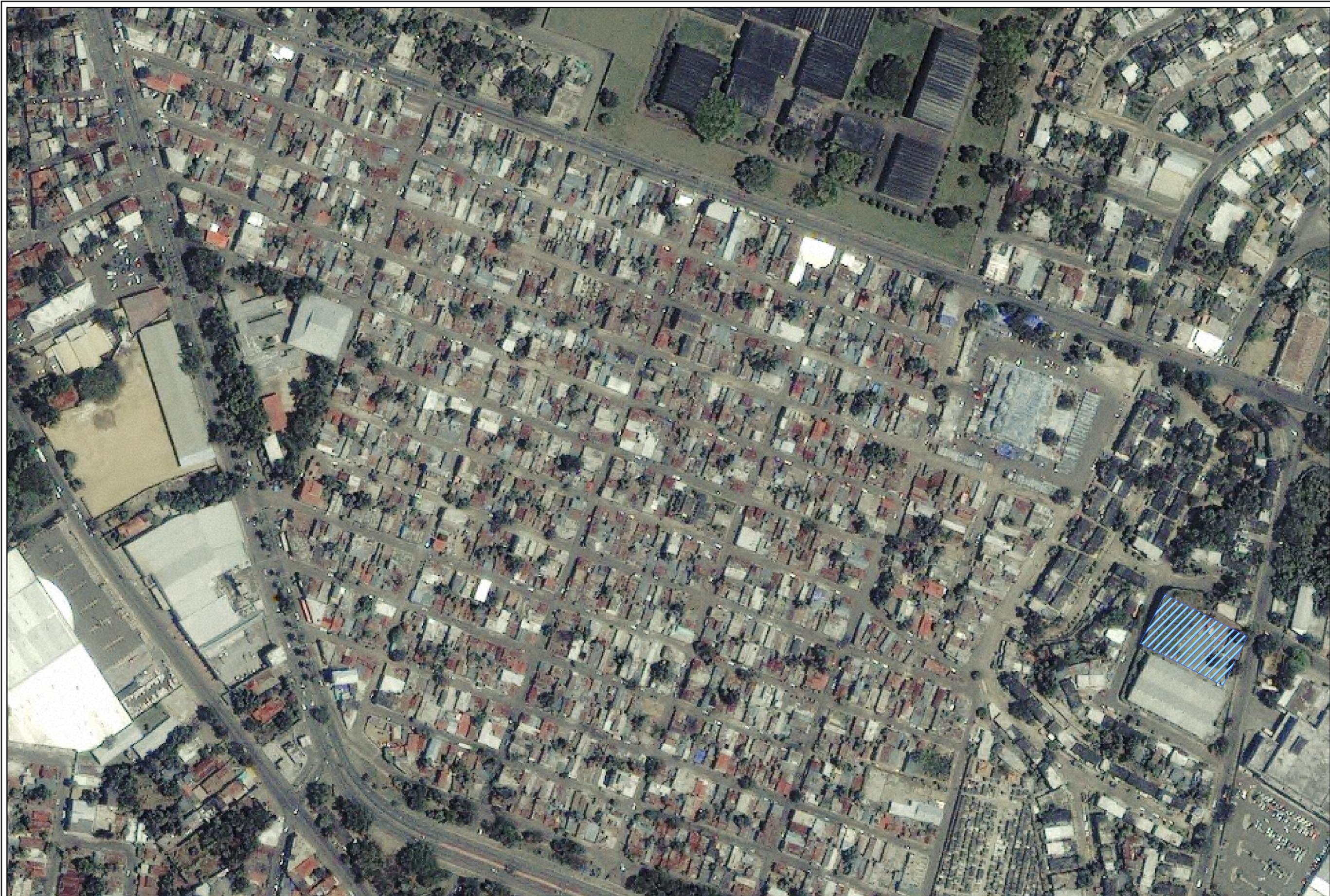
24. Natural Environment Research Council, British Geological Survey. British Geological Survey. [En línea] [Citado el: 15 de 05 de 2017.] <http://www.bgs.ac.uk/research/engineeringGeology/urbanGeoscience/suds/what.html>.

25. Miklas Scholz, Piotr Grabowiecki. Review of permeable pavement systems. s.l. : Elsevier, 2007, Vol. 42, págs. 3830–3836.

# ANEJO: PLANOS

En los planos que se muestran en el presente anejo, se puede ver:

- Situación y emplazamiento de la cancha a escala 1:2500. Se distingue toda la zona de Pueblo Nuevo y, en color azul, el espacio ocupado por el depósito.
- Situación y emplazamiento a escala 1:1000. Se ve completamente la vista en planta de la cancha.
- Plano de detalle de la cancha en los que se distinguen las conducciones de entrada y salida, rejillas, válvulas, gradas, etc. Este plano se compone de cuatro hojas, una con las vistas en alzado y planta a escala 1:250, otra con la vista en alzado con las cotas del terreno a escala 1:200 y otras dos hojas de vistas en perspectiva de la cancha a escala 1:200.



TRABAJO FINAL DE GRADO, GRADO EN INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ANA GÓMEZ COMA

TÍTULO DEL PLANO  
SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

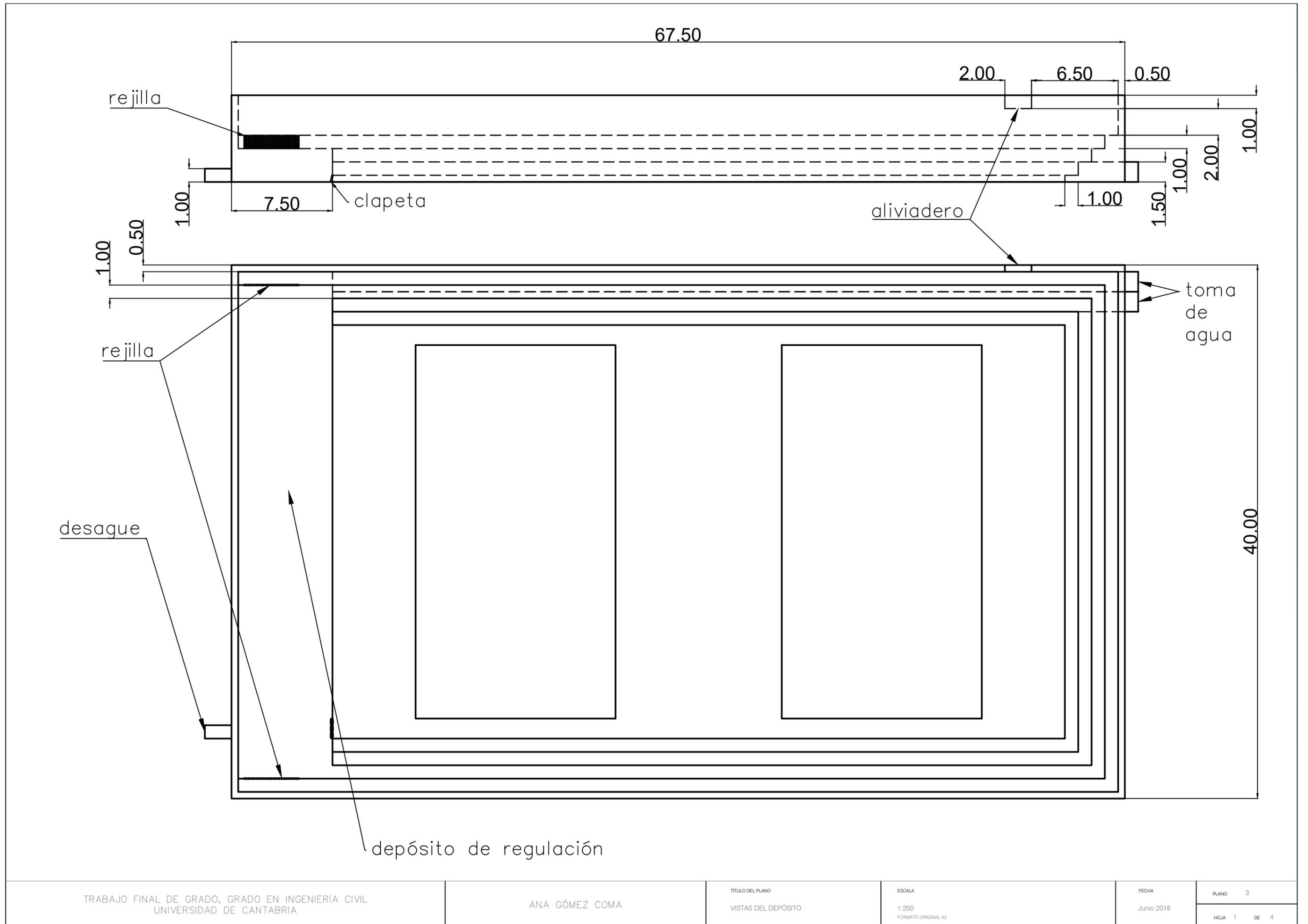
ESCALA  
1:2,500

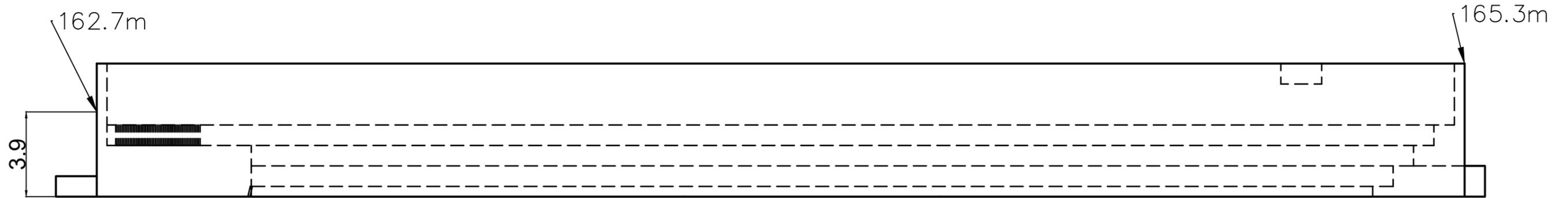


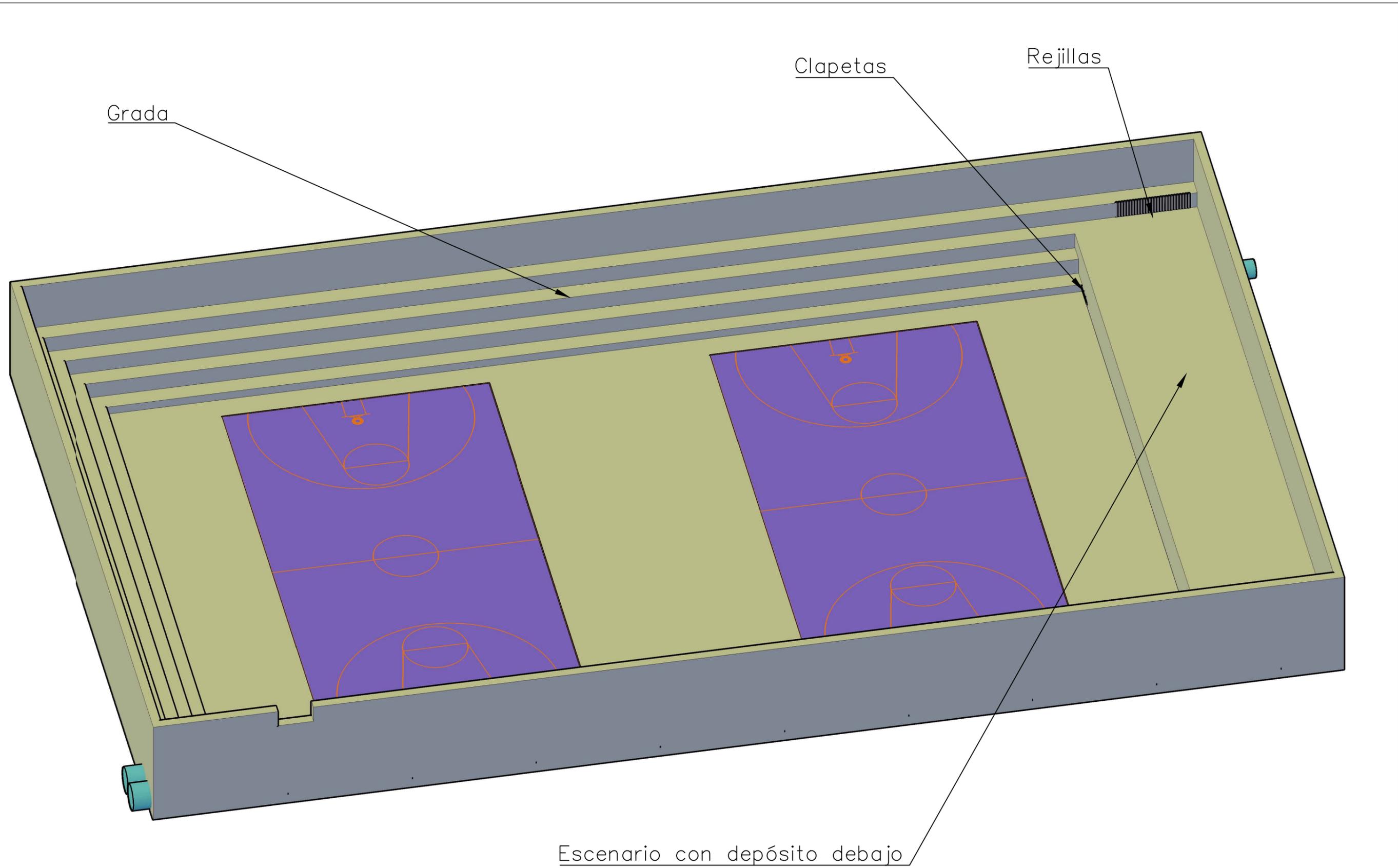
FECHA  
JUNIO 2018

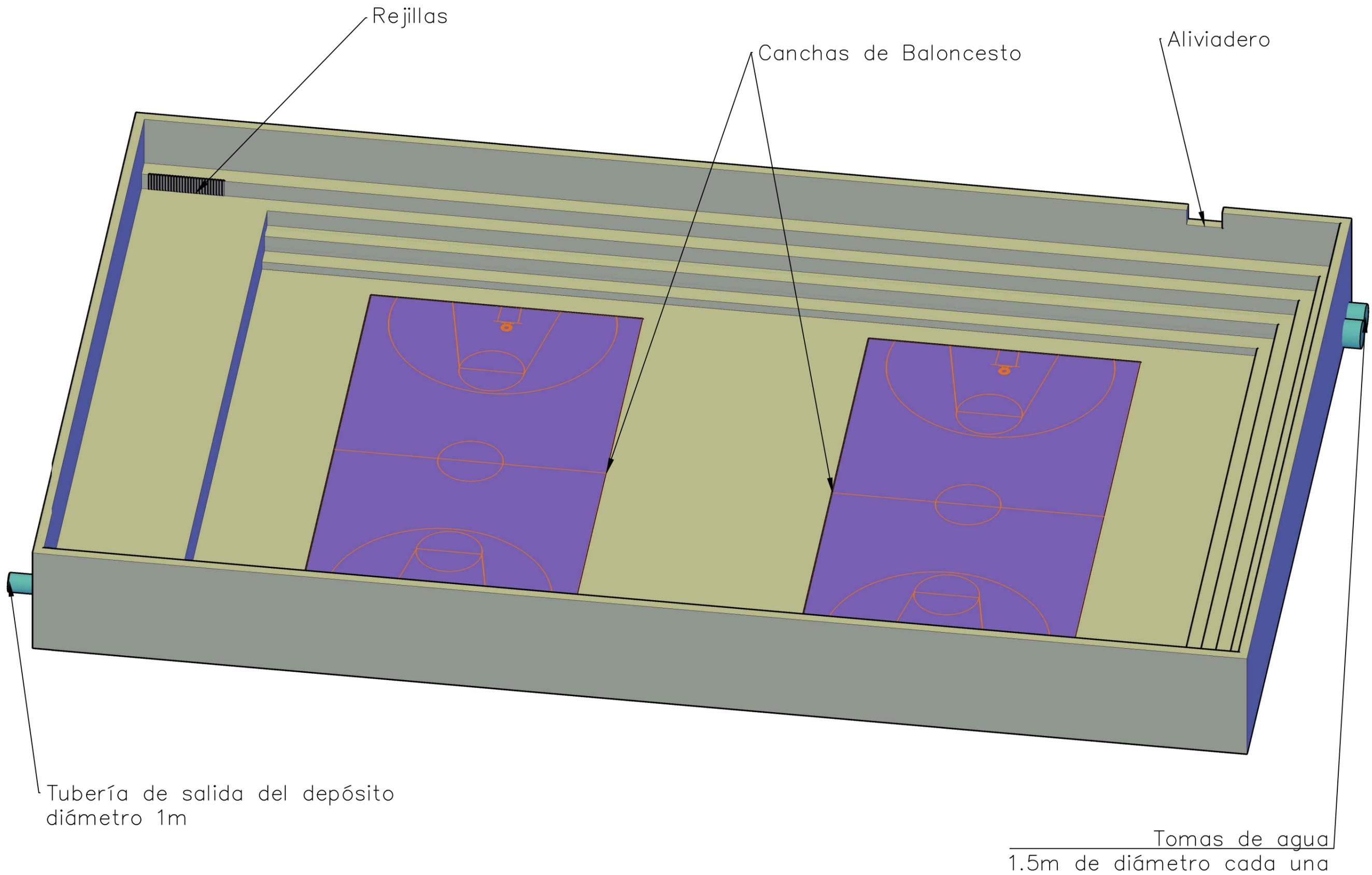
PLANO 1  
HOJA 1 DE 1











Tubería de salida del depósito  
diámetro 1m

Tomas de agua  
1.5m de diámetro cada una

TRABAJO FINAL DE GRADO, GRADO EN INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	ANA GÓMEZ COMA	TÍTULO DEL PLANO RECREACIÓN DE LA CANCHA	ESCALA 1:200 FORMATO ORIGINAL A3	FECHA Junio 2018	PLANO 3 HOJA 4 DE 4
---	----------------	---	--	---------------------	------------------------