

PLAN PARCIAL DEL PARQUE EMPRESARIAL
PRADO DEL HOYO

S E G O V I A

ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO
DEL ARROYO VADILLO

DEL PLAN PARCIAL DEL SECTOR UZD-R-
16-H DE SUELO URBANIZABLE, "PARQUE
EMPRESARIAL PRADO DEL HOYO", EN
SEGOVIA

MAYO 2013

**ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DEL ARROYO
DE VADILLO EN LA ZONA DEL FUTURO PARQUE
EMPRESARIAL "PRADO DEL HOYO" EN SEGOVIA.**

1. OBJETO DEL DOCUMENTO	3
2. ESTUDIO HIDROLÓGICO	5
2.1. PROCEDIMIENTO A UTILIZAR EN LA ZONA DE ESTUDIO	5
2.2. PLUVIOMETRÍA.....	6
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA.....	7
2.3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	7
2.3.2. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS	7
2.3.3. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	8
2.4. INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN	8
2.5. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA	9
2.6. CAUDAL DE ESCORRENTÍA DE LA SITUACIÓN ACTUAL	11
2.7. CAUDAL DE ESCORRENTÍA DE LA SITUACIÓN FUTURA	12
2.7.1. OBJETO	12
2.7.2. DETERMINACIÓN DE CAUDALES.....	13
3. ESTUDIO HIDRÁULICO	15
3.1. OBJETO	15
3.2. CAUDALES CIRCULANTES.....	15
3.3. CÁLCULOS HIDRÁULICOS.....	16
3.3.1. METODOLOGÍA DE CÁLCULO.....	16
3.3.2. EL MODELO HEC-RAS: BASES DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....	16
3.3.3. CÁLCULO DEL PERFIL DE LA LÁMINA DE AGUA	21
3.4. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN	22
3.4.1. SITUACIÓN ACTUAL	22
3.4.2. SITUACIÓN FUTURA.....	25
4. CONCLUSIÓN	27

1. OBJETO DEL DOCUMENTO

El objeto del presente documento es realizar el estudio hidrológico e hidráulico del arroyo Vadillo que atraviesa los terrenos referentes al "PLAN PARCIAL DEL SECTOR UZD-R-16-H DEL PARQUE EMPRESARIAL PRADO DEL HOYO DEL PLAN GENERAL DE ORDENACIÓN URBANA DE SEGOVIA" teniendo en cuenta las consideraciones realizadas en el informe emitido por la Confederación Hidrográfica del Duero de número de referencia PP-16253-11-SG.

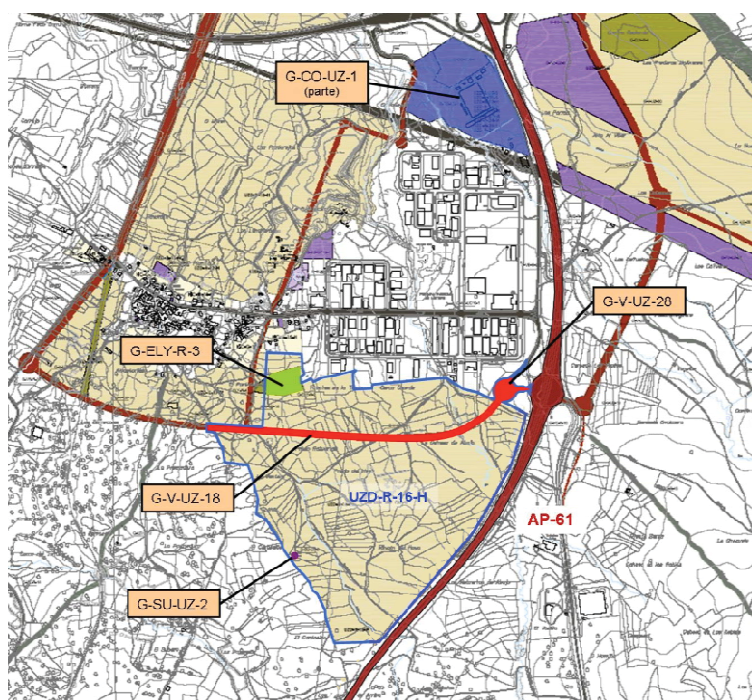
Dicho informe se adjunta en el Apéndice 1 del presente documento. En él se pide la ampliación del estudio hidrológico e hidráulico al arroyo Fuentecilla y a una mayor longitud del arroyo la Huelga porque el estudio hidrológico e hidráulico que originó dicho informe presentaba como zona de actuación los terrenos situados al norte del Sector UZD-R-16-H correspondientes a la ampliación del Centro de Transportes (G-CO-UZ-1, según denominación del Plan General). Indicar que el Centro de Transportes queda fuera de la actuación considerada. Se trata de un sistema general.

El objeto de las actuaciones se circunscribe al sector UZD-R-16-H delimitado en el Plan General de Ordenación Urbana de Segovia.

Esta delimitación diferencia un ámbito principal, donde se localiza el Aprovechamiento Lucrativo, y tres sistemas generales que se adscriben al sector para su obtención:

1. Ámbito principal del sector, dentro del cual cabe distinguir a su vez:
 - a. Suelo neto del sector.
 - b. Sistemas Generales interiores:
 - i. SG-V-UZ-18: Eje viario transversal del sector.
 - ii. SG-V-UZ-2: Depósito de Hontoria.
 - iii. SG-V-UZ-28: Tramo viario de acceso desde el enlace de la AP-61.
2. Dos piezas de Sistemas Generales exteriores adscritos:
 - a. El yacimiento arqueológico G-ELY-R-3 "Fuente del Quintanar", sistema general exterior al sector, clasificado como Suelo Rústico de Protección Cultural.
 - b. Terrenos para la ampliación del Centro de Transportes: Sistema General exterior adscrito, perteneciente a la pieza G-CO-UZ, según denominación del propio Plan General.

En el siguiente plano se detallan los distintos Sistemas Generales adscritos al sector, que se describen a continuación.



1. G-V-UZ-18: Sistema General Viario que atraviesa el sector de Oeste a Este por su mitad norte, constituido en su eje viario principal. Se obtienen sus terrenos y se urbanizan a cargo del sector.

2. G-V-UZ-28: Sistema General Viario correspondiente a la previsión de conexión del sistema general anterior con la autovía de peaje AP-61 al noreste del sector. Se obtienen sus terrenos y se urbanizan a cargo del sector.

3. G-SU-UZ-2: Sistema General de Servicios Urbanos perteneciente a un depósito de regulación de agua potable para el núcleo urbano de Hontoria. Este S.G. ya existente, se localiza en el límite Oeste del ámbito junto al camino de Hontoria a Revenga.

4. G-CO-UZ-1: Sistema General de Equipamientos exterior al sector, localizado al norte del polígono industrial de Hontoria. Está destinado a ampliación del Centro de Transportes del Ayuntamiento. Se adscriben al sector únicamente 6.193 m² del equipamiento, repartiéndose el resto entre otros sectores. Al tratarse de un Sistema General adscrito exterior sólo se obtienen sus terrenos para cederlos al Ayuntamiento pero no se urbanizan por lo que no se producirá la transformación física de estos terrenos.

5. G-ELY-R-3: Sistema General de Espacios Protegidos (art. 41-c.5^o LUCyL), correspondiente a parte del yacimiento arqueológico "Fuente del Quintanar", situado al noroeste del sector. Se trata de suelos exteriores al ámbito, clasificados como Suelo Rústico de Protección Cultural que se obtendrán para su cesión pero no se urbanizarán.

Así pues, los 6.193 m² correspondientes al Sistema General G-CO-UZ-1, que forman una pequeña parte del conjunto de terrenos que se cederán por parte de todos los sectores de suelo urbanizable al Ayuntamiento de Segovia para la futura ampliación del Centro de

Transportes de esa Administración, **NO** serán urbanizados en el desarrollo del sector UZD-R-16-H, por lo que **NO** se afectará a los terrenos naturales en su configuración actual. Por ello, el presente estudio hidrológico e hidráulico se limita al arroyo Vadillo.

2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

Con el estudio hidrológico se pretende determinar los caudales correspondientes a las siguientes avenidas:

- Máxima crecida ordinaria tal y como se establece en el artículo 4º del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que servirá para delimitar el dominio público hidráulico.
- Avenidas extraordinarias previsibles para 100 y 500 años de período de retorno con objeto de delimitar las zonas inundables por dichas avenidas.
- Avenidas previsibles para diferentes períodos de retorno con objeto de analizar la afección provocada por los caudales de pluviales desaguados desde la red de saneamiento de la zona del futuro Parque Empresarial "Prado del Hoyo".

2.1. PROCEDIMIENTO A UTILIZAR EN LA ZONA DE ESTUDIO

En el Arroyo Vadillo no existen Estaciones de Aforo a partir de las que determinar los diferentes valores de caudales tanto para la máxima crecida ordinaria como para las avenidas extraordinarias de diferentes períodos de retorno. De igual manera no se localizan estaciones en otros cauces que, por su proximidad o similitud, puedan asemejarse al de estudio.

Considerando por lo tanto que el cauce en estudio es un tramo no aforado se hace preciso seguir un procedimiento de cálculo alternativo con el que estimar en la zona de actuación los valores de caudales mencionados.

En este sentido el Estudio Hidrológico se va a fundamentar en la utilización de métodos hidrometeorológicos.

Puesto que las características de la cuenca de estudio responden a aquellas en las que es válido el método racional, la metodología de cálculo de caudales de avenida que se emplea a continuación es la recogida en la Instrucción de Carreteras 5.2-IC "Drenaje Superficial", basada en dicho método.

El caudal Q en el punto de desagüe de la cuenca se obtiene mediante la fórmula:

$$Q = \frac{C * I * A}{K}$$

en la que:

C = coeficiente medio de esorrentía de la cuenca vertiente correspondiente al periodo de retorno considerado.

I = intensidad media de precipitación correspondiente al período de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración.

A = superficie de la cuenca vertiente considerada.

K = coeficiente que depende de las unidades en que se expresen Q , A e I y que incluye un aumento del 20% del valor de Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación.

2.2. PLUVIOMETRÍA

Aunque existen diversas estaciones pluviométricas en la zona tales como:

- La granja de San Ildefonso.
- Segovia "Observatorio"
- Otero de Herreros
- Ortigosa del Monte.

El estudio pluviométrico se realiza considerando la información obtenida de la publicación "Máximas lluvias diarias en la España Peninsular", del Ministerio de Fomento, de la que se puede deducir la precipitación máxima diaria.

Para la zona de estudio se deduce una precipitación máxima diaria anual de $P = 40$ mm y un coeficiente de variación de $C_v = 0,34$.

Para poder obtener las precipitaciones previsibles para diferentes períodos de retorno se hace preciso realizar un ajuste estadístico mediante una distribución de tipo extremal como la SQRT.

Para ello es necesario conocer los cuantiles Y_t de la mencionada Ley extremal, también denominados Factores de Ampliación K_T que proporciona la publicación antes mencionada "Máximas lluvias diarias en la España Peninsular".

Una vez conocidos los factores de ampliación en función del coeficiente de variación de la zona de estudio se pueden deducir las precipitaciones previsibles para distintos períodos de retorno multiplicando la precipitación máxima diaria por el factor correspondiente.

De esta forma se deducen las precipitaciones siguientes para cada período de retorno:

T = 2 años	P = 37 mm
T = 5 años	P = 48.5 mm
T = 10 años	P = 56.9 mm
T = 25 años	P = 68.7 mm
T = 50 años	P = 77.2 mm
T = 100 años	P = 87 mm
T = 200 años	P = 97.4 mm
T = 500 años	P = 111.4 mm

De los valores anteriores se selecciona como precipitación para determinar la máxima crecida ordinaria el correspondiente a la precipitación máxima de 40 mm.

El mapa correspondiente a la zona de estudio del que se obtienen los valores de P y Cv así como la tabla resumen de los cuantiles o Factores de Ampliación, KT, correspondientes a cada período de retorno, T, y para distintos coeficientes de variación, Cv, se encuentran recogidos en los apéndices correspondientes.

2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

2.3.1. Descripción general

El arroyo del Vadillo converge por la Margen Izquierda en el denominado Arroyo de la Fuentecilla, discurriendo por los términos municipales de Hontoria y Revenga.

El arroyo recoge las aguas de una parte del núcleo de población de Hontoria y de los terrenos situados entre las zonas urbanas de Hontoria y Revenga.

2.3.2. Características Topográficas

Las características topográficas y geométricas de la cuenca del Arroyo de Vadillo se han deducido de la Cartografía 1:25.000 del Mapa Topográfico Nacional.

Se ha considerado un punto de control coincidente con el cruce del arroyo bajo la Avenida Principal del actual Polígono de Hontoria.

Las características del punto de control:

- Superficie de la cuenca 7,069 Km²
- Longitud del cauce principal 5,146 Km
- Desnivel máximo 398 m
- Pendiente media 0,077 m/m

2.3.3. Tiempo de concentración

Para determinar el tiempo de concentración de una cuenca de las características que nos ocupa se considera válida la fórmula de Témez expresada a continuación:

$$T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76}$$

En la que L representa la longitud del cauce principal (en Km) y J es la pendiente media del cauce (en m/m).

En el caso del Arroyo del Vadillo, con una longitud del cauce principal de 5,146 Km y una pendiente media de 0,077 m/m, se obtiene, mediante la aplicación de la expresión anterior, un tiempo de concentración de 1,69 horas en el punto de control.

El método hidrometeorológico que se va a emplear resulta apropiado para cuencas pequeñas y en particular para aquellas en las que el tiempo de concentración es inferior a seis horas, que es el caso del presente estudio.

2.4. INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN

La intensidad media de precipitación a emplear será aquella que provoque la avenida de estudio en cada caso.

La intensidad de precipitación a emplear en la estimación de caudales se podrá obtener por medio de la fórmula siguiente:

$$I_t = I_d \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

siendo en la anterior expresión:

I_d expresada en mm/h representa la intensidad media diaria de precipitación correspondiente a la lluvia máxima que puede provocar la avenida. Se obtiene a partir de la precipitación máxima diaria, P_d , dividiendo su valor entre las 24 horas del día.

P_d expresada en mm, representa la precipitación total diaria correspondiente a la lluvia que puede provocar la avenida.

I_1 representa la intensidad horaria de precipitación correspondiente a la misma lluvia. El valor de la razón I_1/I_d se podrá tomar de la figura que se acompaña en el apéndice correspondiente. En el presente caso su valor es igual a 10.

t representa la duración de la precipitación mencionada. Una hipótesis de cálculo usual es suponer que la duración del aguacero coincide con el tiempo de concentración de la

cuenca y suponer que la precipitación se reparte de forma uniforme en este período. Se expresa en horas.

En este caso se considera que la precipitación Pd corresponde a los valores obtenidos en los puntos anteriores, con los que se puede deducir los correspondientes de intensidad Id en mm/hora, resultando los siguientes valores:

- Punto de control.

M.C.O.	I = 11,49 mm/h
T = 2 años	I = 10,62 mm/h
T = 5 años	I = 13,94 mm/h
T = 10 años	I = 16,35 mm/h
T = 25 años	I = 19,73 mm/h
T = 50 años	I = 22,17 mm/h
T = 100 años	I = 24,98 mm/h
T = 200 años	I = 27,97 mm/h
T = 500 años	I = 32,00 mm/h

2.5. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

El coeficiente de escorrentía define la proporción de la intensidad de precipitación que discurre por superficie. Depende tanto de la precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno considerado como del umbral de escorrentía P0 a partir del cual se inicia ésta.

De forma general el valor del coeficiente de escorrentía C se puede obtener a partir de la expresión siguiente:

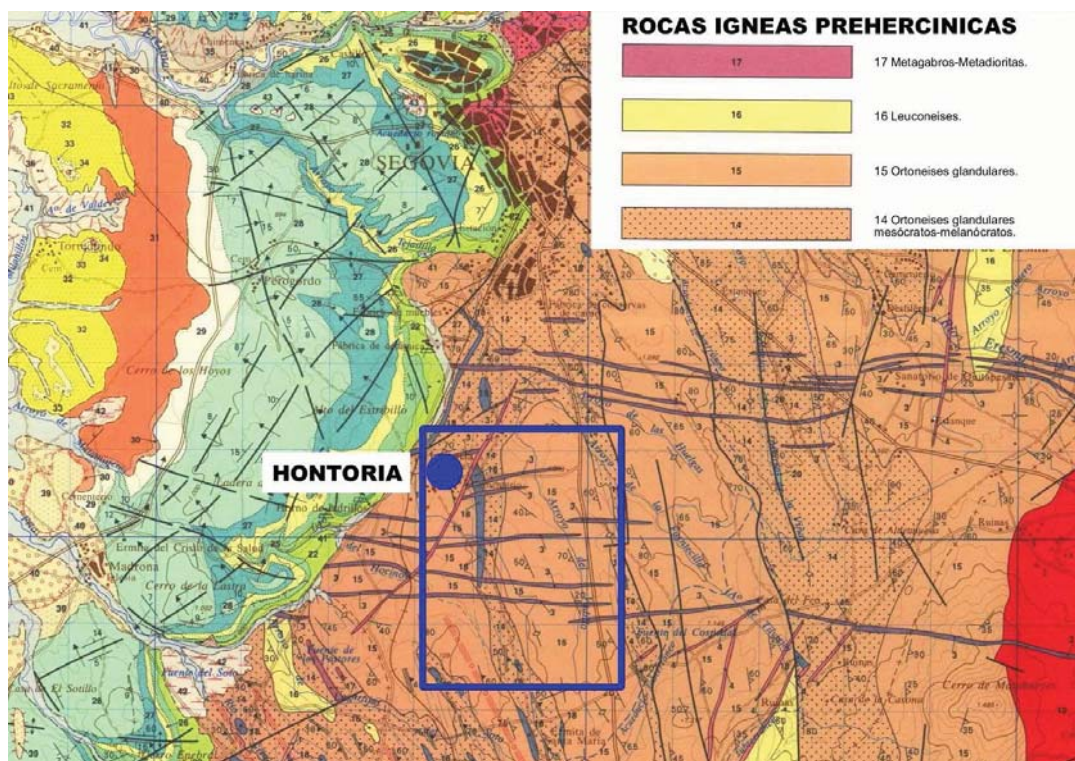
$$C = \frac{\left(\frac{P_d}{P_0} - 1\right) * \left(\frac{P_d}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_d}{P_0} + 11\right)^2}$$

En el caso de cuencas heterogéneas, éstas deberán dividirse en áreas parciales cuyos coeficientes de escorrentía se calcularán por separado en función del valor de P0 que le corresponda a cada una de ellas. Posteriormente se calculará la media ponderada del coeficiente de escorrentía que será el que se aplique a la totalidad de la superficie de la cuenca.

El umbral de escorrentía P0 se obtiene a partir de las características hidrológicas y topográficas de la cuenca, del uso de la tierra y el tipo de suelo que la conforma.

En el caso que se analiza se ha considerado que la cuenca de aportación está fundamentalmente cubierta por monte bajo o matorral, terreno claro con y sin árboles, bosque frondoso y mixto. En los planos nº 3 y 4 “Cuencas vertientes” se representan las superficies de la cuenca del Arroyo Vadillo sobre el mapa de usos del suelo y cultivos.

Los materiales que afloran en la cuenca de aportación, como se refleja en la figura adjunta, son ortoneises glandulares que previsiblemente se encontrarán meteorizados por lo que corresponden a suelos tipo C.



Teniendo en cuenta las características descritas y consultando la tabla de estimación inicial del umbral de escorrentía contenida en la Instrucción y que se recoge en el apéndice correspondiente, se obtienen valores de éste comprendidos entre 8 y 43 mm.

Estos valores se deben multiplicar por el coeficiente corrector que se deduce de la figura que se adjunta en el apéndice correspondiente, siendo para la zona de estudio 2,3. Este coeficiente refleja la variación regional de la humedad habitual en el suelo al comienzo de aguaceros significativos, e incluye una mayoración (del orden del 100%) para evitar sobrevaloraciones del caudal de referencia a causa de ciertas simplificaciones del tratamiento estadístico del método hidrometeorológico.

Por lo tanto, una vez aplicado el coeficiente corrector, los valores del umbral de escorrentía adoptados se encuentran comprendidos entre 18,40 y 98,90 mm.

Aplicando la expresión del coeficiente de escorrentía antes reflejada se obtiene éste para cada valor de P_0 y calculando su media ponderada se obtienen los siguientes valores para cada periodo de retorno:

M.C.O.	$C = 0,038$
T = 2 años	$C = 0,029$
T = 5 años	$C = 0,059$
T = 10 años	$C = 0,082$
T = 25 años	$C = 0,119$
T = 50 años	$C = 0,144$
T = 100 años	$C = 0,173$
T = 200 años	$C = 0,202$
T = 500 años	$C = 0,238$

En el apéndice 7: "Cálculo de caudales" se recoge de forma detallada la división en áreas parciales que se realiza de cada cuenca en función del valor de P_0 que se les asigna, el cálculo de cada coeficiente de escorrentía asociado a cada valor de P_0 y la obtención del coeficiente de escorrentía medio de aplicación a la totalidad de la superficie de cada cuenca para cada periodo de retorno.

2.6. CAUDAL DE ESCORRENTÍA DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Como ya se ha expuesto anteriormente, el método utilizado es el recogido en la Instrucción de Carreteras 5.2-IC "Drenaje Superficial", que emplea una metodología de cálculo de caudales de avenida basada en el método racional.

La ecuación para el cálculo del caudal Q en el punto de desagüe de la cuenca adopta la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C * I * A}{K}$$

en la que:

C = coeficiente medio de escorrentía de la cuenca vertiente correspondiente al periodo de retorno considerado.

I = intensidad media de precipitación correspondiente al período de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración.

A = superficie de la cuenca vertiente considerada.

K = coeficiente que depende de las unidades en que se expresen Q, A e I y que incluye un aumento del 20% del valor de Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. Para el caso de Q en m³/s, A en Km² e I en mm/h el valor de K es 3.

En los apartados anteriores se ha indicado el valor de la superficie de la cuenca y se han calculado los valores tanto de las intensidades medias de precipitación como los valores de los coeficientes de escorrentía medios.

El caudal de escorrentía para cada período de retorno deducido aplicando la expresión anterior se recoge a continuación:

M.C.O.	Q = 1,015 m ³ /s
T = 2 años	Q = 0,735 m ³ /s
T = 5 años	Q = 1,939 m ³ /s
T = 10 años	Q = 3,162 m ³ /s
T = 25 años	Q = 5,528 m ³ /s
T = 50 años	Q = 7,527 m ³ /s
T = 100 años	Q = 10,172 m ³ /s
T = 200 años	Q = 13,281 m ³ /s
T = 500 años	Q = 17,968 m ³ /s

2.7. CAUDAL DE ESCORRENTÍA DE LA SITUACIÓN FUTURA

2.7.1. Objeto

En el presente apartado se pretende determinar los caudales de las avenidas previsibles en la situación futura cuando la cuenca de aportación se vea modificada en la superficie afectada por el futuro Parque Empresarial "Prado del Hoyo".

Tras el desarrollo del Parque Empresarial la cuenca de aportación del arroyo de Vadillo se verá modificada, en primer lugar, como consecuencia de la variación en el suelo que provoca un incremento del coeficiente de escorrentía superficial. En segundo lugar, se produce una modificación en cuanto a que los terrenos urbanizados dispondrán de sus redes de recogida de aguas pluviales que transportarán los caudales producidos hacia el arroyo en forma diferente a la actual.

En el presente apartado se pretende, por tanto, determinar los caudales previsibles en el tramo de arroyo que discurre por la urbanización una vez desarrollada. Se adoptarán los correspondientes a lluvias extraordinarias y en concreto para 500 años de período de retorno.

2.7.2. Determinación de caudales

Para la obtención de los caudales de escorrentía correspondientes a la situación futura todos los cálculos realizados en los apartados anteriores son válidos excepto los de los coeficientes de escorrentía.

Esto es así debido a que ciertas características de la cuenca del Arroyo Vadillo no se ven afectadas por la actuación del futuro Parque Empresarial. Es el caso de la superficie, la longitud del cauce principal y su pendiente media, por lo que el tiempo de concentración, que depende de estos valores, y la intensidad media de precipitación, que depende del tiempo de concentración, no varían.

Los coeficientes de escorrentía medios correspondientes a cada periodo de retorno considerado sí varían puesto que a la superficie que se ve afectada por la actuación le corresponden nuevos valores de umbral de escorrentía P_0 . Estos valores se adoptan atendiendo a la siguiente tabla:

	SUPERFICIE		P_0 inicial (mm)	P_0 x factor correc. (mm)
	%	m ²		
Zona industrial	55	584.286,20	3	6,9
Zonas pavimentadas	25	265.584,64	1,5	3,5
Zonas verdes	20	212.467,71	19	43,7
Superficie total ámbito de actuación		1.062.338,55		

La superficie de la cuenca que no se ve afectada por la actuación presentará los mismos valores de P_0 que en la situación actual, es decir, valores comprendidos entre 8 y 43 mm, resultando una vez multiplicados por el coeficiente corrector (2,3) valores entre 18,40 y 98,90 mm.

Aplicando la expresión del coeficiente de escorrentía antes reflejada se obtiene éste para cada valor de P_0 y calculando su media ponderada se obtienen los siguientes valores para cada periodo de retorno:

Coeficientes de Escorrentía obtenidos para la cuenca del Arroyo del Vadillo. Situación Futura

M.C.O.	$C = 0,091$
T = 2 años	$C = 0,081$
T = 5 años	$C = 0,116$
T = 10 años	$C = 0,142$
T = 25 años	$C = 0,179$
T = 50 años	$C = 0,204$
T = 100 años	$C = 0,232$

$$T = 200 \text{ años} \quad C = 0,260$$

$$T = 500 \text{ años} \quad C = 0,295$$

Una vez obtenidos los coeficientes de escorrentía medios para cada periodo de retorno, se aplica la misma expresión que en el apartado anterior para la obtención de los caudales de escorrentía:

Caudales de Escorrentía obtenidos en el Punto de control del Arroyo del Vadillo. Situación Futura

M.C.O.	Q = 2,458 m ³ /s
T = 2 años	Q = 2,028 m ³ /s
T = 5 años	Q = 3,811 m ³ /s
T = 10 años	Q = 5,453 m ³ /s
T = 25 años	Q = 8,320 m ³ /s
T = 50 años	Q = 10,658 m ³ /s
T = 100 años	Q = 13,666 m ³ /s
T = 200 años	Q = 17,131 m ³ /s
T = 500 años	Q = 22,256 m ³ /s

En el apéndice nº 7: "Cálculo de caudales" se recoge de forma detallada la división en áreas parciales que se realiza de la cuenca en función del valor de P_0 que se les asigna, el cálculo de cada coeficiente de escorrentía asociado a cada valor de P_0 y la obtención del coeficiente de escorrentía medio de aplicación a la totalidad de la superficie de la cuenca para cada periodo de retorno.

Los cálculos de los caudales se han mantenido conforme a los del estudio hidrológico e hidráulico que motivó el informe de la Confederación Hidrográfica del Duero que sirve de base al presente estudio ya que, según ese informe, "*..los caudales obtenidos para el arroyo Vadillo se pueden considerar aceptables, dentro de los rangos de validez para las condiciones teóricas propuestas y de acuerdo a las hipótesis y limitaciones propias de la metodología empleada en el análisis.*"

3. ESTUDIO HIDRÁULICO

3.1. OBJETO

El objeto del estudio hidráulico es conocer, por un lado, la superficie inundable provocada por la avenida correspondiente a la máxima crecida ordinaria. Esta superficie delimitará la zona de dominio público hidráulico. A partir de esa zona, se definirá la zona de servidumbre y de policía del arroyo de Vadillo. Por otro lado, se determinará la superficie inundable originada por avenidas extraordinarias, en concreto para la avenida de 500 años, tanto en la situación actual, como después de hacer las obras de urbanización.

3.2. CAUDALES CIRCULANTES

Los caudales circulantes empleados en el cálculo son el resultado del estudio hidrológico presentado en el punto anterior y se recogen a modo de resumen a continuación:

Arroyo del Vadillo

Situación actual

M.C.O.	Q = 1,015 m ³ /s
T = 100 años	Q = 10,172 m ³ /s
T = 500 años	Q = 17,968 m ³ /s

Situación futura

M.C.O.	Q = 2,458 m ³ /s
T = 100 años	Q = 13,666 m ³ /s
T = 500 años	Q = 22,256 m ³ /s

Como se ha modelizado una longitud de unos 2.300 m, a la hora de realizar los cálculos hidráulicos, se ha considerado que el caudal no es constante en todo el tramo sino que va aumentando hasta alcanzar el valor calculado para el punto de control. Para ello se han tomado cuatro puntos intermedios, P1, P2, P3 y P4 y se ha obtenido el caudal aportado por la cuenca en cada uno de ellos.

La situación de los tres primeros puntos considerados es tal que el valor de los caudales Q1, Q2 y Q3 calculado para cada uno de ellos coincide en la situación actual y futura, ya que se encuentran localizados en zonas que no se verán afectadas por la actuación del futuro Parque Empresarial. La variación entre los caudales correspondientes a

la situación actual y futura se produce a partir del último punto siendo en cada caso el calculado en el punto de control.

Los caudales obtenidos y que se emplean en los cálculos hidráulicos realizados son los siguientes:

	SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA			SITUACIÓN ACTUAL	SITUACIÓN FUTURA
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄ = Q pto. control	Q ₄ = Q pto. control
MCO	0,08	0,40	0,64	1,02	2,46
T 100	1,46	4,60	7,25	10,17	13,67
T 500	2,63	8,18	12,98	17,97	22,26

En el apéndice nº 7 "Cálculo de caudales" se recoge de forma detallada el cálculo de estos caudales intermedios y en los planos nº 3 y 4 "Cuencas vertientes" se representan los puntos intermedios en los que se producen los aumentos de caudal.

3.3. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

3.3.1. Metodología de cálculo

Conocidos los caudales circulantes, se comprueba la capacidad hidráulica del arroyo de Vadillo mediante el programa HEC- RAS, tanto para la situación actual, como para la situación futura resultante tras la urbanización del sector.

El modelo HEC-RAS ha sido creado por el Cuerpo de Ingenieros Hidráulicos de la Armada de los Estados Unidos (U.S Army Corps of Engineers del Hidrologic Center) teniendo como predecesores los modelos HEC-2 (para flujo permanente en ríos) y HEC-6 (para transporte de sedimentos) creados también por el mismo cuerpo, y calcula en su actual configuración el perfil de la superficie libre en un río o canal en régimen permanente gradualmente variado, según la metodología conocida como paso a paso (step-method).

3.3.2. . El modelo HEC-RAS: Bases de funcionamiento y características principales.

Bases de cálculo

En esencia, el modelo resuelve la ecuación diferencial de primer grado de los perfiles en lámina libre (curvas de remanso):

$$-I = -I_0 + \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} \right)$$

$$-I = -I_0 + \frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{Q \cdot B}{g \cdot S^3} \right)$$

$$H = y + z + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{d}{dx} \left(y + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)$$

Obteniendo finalmente la ecuación 1:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I_0 - I}{1 - F^2}$$

donde:

H: Energía específica.

Q: Caudal a través de la sección, el cual se supone constante.

S: Sección mojada.

B: Ancho de la sección.

F: Número de Froude.

F < 1 el flujo es lento

F = 1 el flujo es crítico

F > 1 el flujo es rápido

I₀: Pendiente del terreno.

I: Pendiente de fricción representativa (variación unitaria de energía)

dy/dx: Variación del calado en la dirección longitudinal del flujo.

Esta ecuación diferencial de 1er orden exige una única condición de contorno para poder resolverla.

Para resolver la ecuación 1, el método usa las ecuaciones de conservación de la energía entre las secciones 1 y 2 (ecuación 2), la de Manning y la ecuación 3.

Ecuación 2:

$$y_1 + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = y_2 + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta H_{1 \rightarrow 2}$$

donde:

Y: Calado (m).

V: Velocidad media del agua (m/s).

α : Coeficiente de velocidad de Coriolis.

$\Delta H_{1 \rightarrow 2}$: Pérdidas de carga, tanto locales como continuas o de fricción (pendiente motriz).

Ecuación 3:

$$\Delta H_{1 \rightarrow 2} = I \cdot L + \text{Pérdidas} = \frac{n^2 \cdot Q^2}{S^2 \cdot R_h^{4/3}} \cdot L + \text{Pérdidas} = \frac{Q^2}{K^2} \cdot L + C \cdot \left(\frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \right)$$

donde:

n: Número de Manning, representativo de la fricción.

Rh: Radio Hidráulico de la sección (Rh= Sección mojada/perímetro mojado)

K: Parámetro que caracteriza la sección (es una agrupación de parámetros)

L: Longitud del tramo 1 al 2, que en canales sinuosos se calcula como un promedio de las longitudes según la margen izquierda, derecha y el cauce principal, ponderando según el caudal por cada una de las zonas:



$$L = \frac{Q_{izq} \cdot L_{izq} + Q_{der} \cdot L_{der} + Q_r \cdot L_{der}}{Q}$$

De esta forma el modelo resuelve de forma iterativa la ecuación 1 mediante las ecuaciones 2 y 3, necesitando para ello una única condición de contorno.

Las principales características del modelo son:

Calcula perfiles en lámina libre para flujo gradualmente variado.

Realiza un tratamiento unidimensional del flujo.

Considera la variabilidad de la velocidad a lo largo de una sección transversal. Por ello obtiene la distribución de velocidades en la sección.

Analiza el flujo para todo tipo de regímenes (lento, rápido o mixto). En caso de régimen lento la condición de contorno se impone en la sección de aguas abajo y en caso de régimen rápido se impone en la sección de aguas arriba.

Localiza el resalto hidráulico, aplicando la ecuación de cantidad de movimiento y admite el cálculo a través de un régimen crítico.

Trata el flujo dividido y en uniones.

Analiza el efecto que producen las estructuras inmersas en el cauce del río (puentes o drenajes transversales).

La precisión del cálculo es muy alta, del orden de 1 cm.

Para determinar el calado crítico, el modelo minimiza la expresión de la energía específica.

El modelo requiere la entrada de dos tipos de datos.

Datos de las características geométricas del cauce o canal.

Geometría de las distintas secciones que se quieran considerar, las cuales se definirán por puntos (desde la margen izquierda a la derecha y vistas desde aguas arriba a aguas abajo) indicando la distancia entre secciones (esta distancia dependerá de la precisión que se quiera conseguir). Las secciones se tomarán perpendicularmente al cauce y se debe indicar no sólo la distancia siguiendo el eje sino también siguiendo los extremos de cada una de las márgenes (muy importante en tramos curvos). En el caso en que una sección sea sensiblemente constante en cuanto a su geometría, no hace falta repetir su definición. Basta con indicar que la geometría de la anterior debe ser usada. Del mismo modo, se pueden elevar las cotas hasta un cierto nivel mínimo. Sobre una sección base se pueden aplicar variaciones, como obstrucciones al flujo, terraplenes, etc.

Datos de las características hidráulicas del flujo.

- Tipo de régimen.

Rápido. En este caso el cálculo se realizará desde aguas arriba a aguas abajo.

Lento. En este caso el cálculo se realizará desde aguas abajo a aguas arriba.

Mixto. Siempre y cuando se prevean cambios de régimen.

- Calado inicial

Calado crítico.

Calado conocido.

Indicar que se obtendrá una curva de gasto para la sección, que deberá suministrarse. En función del caudal, el modelo calculará sobre dicha curva cuál es el calado que corresponde.

- Caudal. El programa admite la variación de caudal en cada sección de cálculo.
- Coeficiente de fricción o número de Manning. El programa admite valores diferentes dentro de una misma sección.
- Coeficientes de contracción o expansión.

Resultados

Para poder entender correctamente la tabla que aparece en el apéndice 8 se presentan previamente las variables que en ella aparecen:

Reach: Nombre de la subcuenca

River Sta: Número de la sección

Qttotal: Caudal de cálculo

Min Ch El: Cota mínima de la sección

W.S. Elev: Elevación de la superficie libre de la lámina de agua

Crit. W.S.: Elevación de la línea de calados críticos

E.G. Elev: Elevación de la línea de energía

E.G. Slope: Pendiente de la línea de energía

Vel Chnl: Velocidad media

Flow Area: Sección mojada

Top Width: Ancho en superficie libre

Froude · Chl: Número de Froude

Una de las variables más interesantes de la tabla es el número de Froude, el cual nos indica si el flujo es rápido ($F > 1$) o lento ($F < 1$).

En el apéndice 8 se muestran las secciones que se han usado para caracterizar geométricamente el cauce a lo largo de toda su traza. Además de la forma de la propia sección, aparecen también representadas las líneas de energía, superficie de la lámina de agua y la cota del calado crítico. Estas líneas son las que se obtienen para el caudal de avenida, el correspondiente al periodo de retorno de estudio.

3.3.3. Cálculo del perfil de la lámina de agua

3.3.3.1. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Se ha analizado una longitud de arroyo de 2.158 m. La geometría del cauce del arroyo Vadillo se ha definido a partir de 27 secciones transversales obtenidas de la cartografía escala 1:1000 disponible para la zona de la actuación. En el apéndice nº9: Planos se incluye una planta de las secciones transversales empleadas para el estudio.

En la situación actual se han modelizado cuatro obras de fábrica correspondientes a los siguientes cruces:

- Cruce Autovía AP-61 con el arroyo Vadillo (RS54): Se trata de un marco de hormigón armado de 3 x 2 m.
- Cruce vía de servicio autovía con el arroyo Vadillo (RS47): Se trata de una batería de cuatro tuberías de sección rectangular de dimensiones 0.6 x 0.5 m.
- Cruce de un camino rural con el arroyo Vadillo (RS7): Se trata de dos tuberías de hormigón de 400 mm de diámetro.
- Cruce de la calle Gremio de los Canteros con el arroyo Vadillo (RS3): Se trata de dos tubos de hormigón de 1.800 mm de diámetro.

En la situación futura se han modelizado cinco obras de fábrica correspondientes a los siguientes cruces:

- Cruce Autovía AP-61 con el arroyo Vadillo (RS54): Se trata de un marco de hormigón armado de 3 x 2 m.
- Cruce vía de servicio autovía con el arroyo Vadillo (RS47): Se trata de una batería de cuatro tuberías de sección rectangular de dimensiones 0.6 x 0.5 m.
- Cruce vial acceso al polígono desde la rotonda este con el arroyo Vadillo (RS15.5): Se trata de un marco de hormigón armado de dimensiones 3 x 2 m.
- Cruce vial acceso al polígono desde la calle Gremio de los Canteros con el arroyo Vadillo (RS9.5): Se trata de un marco de hormigón armado de 3.5 x 3 m.

3.3.3.2. CAUDALES CIRCULANTES

Como resumen de los apartados anteriores se recogen los caudales empleados en la modelización, tanto para la situación actual, como para la futura:

	SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA			SITUACIÓN ACTUAL	SITUACIÓN FUTURA
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄ = Q pto. control	Q ₄ = Q pto. control
MCO	0,08	0,40	0,64	1,02	2,46
T 100	1,46	4,60	7,25	10,17	13,67
T 500	2,63	8,18	12,98	17,97	22,26

3.3.3.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Los coeficientes de rugosidad empleados han sido:

- Para la zona de los cauces mas degradada y sin acondicionar: $n=0.050$.
- Para las márgenes de los cauces: $n = 0.040$.
- Para las obras de fábrica: $n = 0.020$.
- Coeficiente de pérdidas a la entrada: $K_e = 0.5$.
- Coeficiente de pérdidas a la salida: $K_s = 1.0$.
- Condiciones de contorno: Calado uniforme.

3.4. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN

3.4.1. Situación actual

Con los datos descritos anteriormente se han obtenido los resultados que se incluyen en el apéndice 8. La cota de la lámina de agua resultante de la modelización correspondiente a cada avenida se recoge en el cuadro adjunto:

LÁMINA DE AGUA. ARROYO VADILLO. ESTADO ACTUAL

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)
Polígono	100	MCO	0.08	1089.31	Polígono	60	MCO	0.64	1069.33
Polígono	100	T=100	1.46	1089.46	Polígono	60	T=100	7.25	1070.84
Polígono	100	T=500	2.63	1089.46	Polígono	60	T=500	12.98	1071.46
Polígono	95	MCO	0.08	1085.13	Polígono	55	MCO	0.64	1069.29
Polígono	95	T=100	1.46	1085.18	Polígono	55	T=100	7.25	1070.74
Polígono	95	T=500	2.63	1085.25	Polígono	55	T=500	12.98	1071.46
Polígono	90	MCO	0.08	1083.13	Polígono	54		Culvert	
Polígono	90	T=100	1.46	1083.24					
Polígono	90	T=500	2.63	1083.41	Polígono	50	MCO	0.64	1069.22
					Polígono	50	T=100	7.25	1070.61
Polígono	85	MCO	0.4	1076.64	Polígono	50	T=500	12.98	1070.89
Polígono	85	T=100	4.6	1076.87					
Polígono	85	T=500	8.18	1076.89	Polígono	47		Culvert	
Polígono	80	MCO	0.4	1071.15	Polígono	46	MCO	0.64	1068.92
Polígono	80	T=100	4.6	1071.33	Polígono	46	T=100	7.25	1069.38
Polígono	80	T=500	8.18	1071.45	Polígono	46	T=500	12.98	1069.69
Polígono	75	MCO	0.4	1069.52	Polígono	45	MCO	0.64	1068.39
Polígono	75	T=100	4.6	1070.86	Polígono	45	T=100	7.25	1068.56
Polígono	75	T=500	8.18	1071.47	Polígono	45	T=500	12.98	1068.57
Polígono	70	MCO	0.64	1069.37	Polígono	40	MCO	0.64	1068.09
Polígono	70	T=100	7.25	1070.86	Polígono	40	T=100	7.25	1068.31
Polígono	70	T=500	12.98	1071.47	Polígono	40	T=500	12.98	1068.41
Polígono	65	MCO	0.64	1069.36	Polígono	37	MCO	0.64	1068.02
Polígono	65	T=100	7.25	1070.84	Polígono	37	T=100	7.25	1068.22
Polígono	65	T=500	12.98	1071.46	Polígono	37	T=500	12.98	1068.3

LÁMINA DE AGUA. ARROYO VADILLO. ESTADO ACTUAL

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)
Polígono	35	MCO	0.64	1067.8	Polígono	6	MCO	1.02	1060.19
Polígono	35	T=100	7.25	1067.96	Polígono	6	T=100	10.17	1061.85
Polígono	35	T=500	12.98	1068.04	Polígono	6	T=500	17.97	1062
Polígono	30	MCO	0.64	1067.02	Polígono	5	MCO	1.02	1059.41
Polígono	30	T=100	7.25	1067.17	Polígono	5	T=100	10.17	1060.53
Polígono	30	T=500	12.98	1067.24	Polígono	5	T=500	17.97	1061.43
Polígono	25	MCO	0.64	1066.37	Polígono	4	MCO	1.02	1059.08
Polígono	25	T=100	7.25	1066.54	Polígono	4	T=100	10.17	1060.45
Polígono	25	T=500	12.98	1066.62	Polígono	4	T=500	17.97	1061.42
Polígono	20	MCO	0.64	1064.89	Polígono	3		Culvert	
Polígono	20	T=100	7.25	1065.32					
Polígono	20	T=500	12.98	1065.45	Polígono	2	MCO	1.02	1058.57
					Polígono	2	T=100	10.17	1059.3
Polígono	15	MCO	1.02	1063.57	Polígono	2	T=500	17.97	1059.31
Polígono	15	T=100	10.17	1064.17					
Polígono	15	T=500	17.97	1064.32	Polígono	0	MCO	1.02	1058.37
					Polígono	0	T=100	10.17	1059
Polígono	10	MCO	1.02	1061.76	Polígono	0	T=500	17.97	1059.32
Polígono	10	T=100	10.17	1062.94					
Polígono	10	T=500	17.97	1062.29					
Polígono	8	MCO	1.02	1061.69					
Polígono	8	T=100	10.17	1062.94					
Polígono	8	T=500	17.97	1062.01					
Polígono	7		Culvert						

Con la cota de la lámina de agua correspondiente a la máxima crecida ordinaria (MCO) se ha delimitado la zona de dominio público hidráulico.

3.4.2. Situación futura

Los resultados de la modelización hidráulica una vez realizada la urbanización se incluyen en el apéndice 8. A continuación se resumen las cotas de la lámina de agua para cada una de las avenidas consideradas para el cálculo:

LÁMINA DE AGUA. ARROYO VADILLO. ESTADO FUTURO

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)
Polígono	100	MCO F	0.08	1089.31	Polígono	46	MCO F	0.64	1068.92
Polígono	100	T=100 F	1.46	1089.46	Polígono	46	T=100 F	7.25	1069.38
Polígono	100	T=500 F	2.63	1089.46	Polígono	46	T=500 F	12.98	1069.69
Polígono	95	MCO F	0.08	1085.13	Polígono	45	MCO F	0.64	1068.39
Polígono	95	T=100 F	1.46	1085.18	Polígono	45	T=100 F	7.25	1068.56
Polígono	95	T=500 F	2.63	1085.25	Polígono	45	T=500 F	12.98	1068.57
Polígono	90	MCO F	0.08	1083.13	Polígono	40	MCO F	0.64	1068.09
Polígono	90	T=100 F	1.46	1083.24	Polígono	40	T=100 F	7.25	1068.31
Polígono	90	T=500 F	2.63	1083.41	Polígono	40	T=500 F	12.98	1068.41
Polígono	85	MCO F	0.4	1076.64	Polígono	37	MCO F	0.64	1068.02
Polígono	85	T=100 F	4.6	1076.87	Polígono	37	T=100 F	7.25	1068.22
Polígono	85	T=500 F	8.18	1076.89	Polígono	37	T=500 F	12.98	1068.3
Polígono	80	MCO F	0.4	1071.15	Polígono	35	MCO F	0.64	1067.8
Polígono	80	T=100 F	4.6	1071.33	Polígono	35	T=100 F	7.25	1067.96
Polígono	80	T=500 F	8.18	1071.45	Polígono	35	T=500 F	12.98	1068.04
Polígono	75	MCO F	0.4	1069.52	Polígono	30	MCO F	0.64	1067.02
Polígono	75	T=100 F	4.6	1070.86	Polígono	30	T=100 F	7.25	1067.17
Polígono	75	T=500 F	8.18	1071.47	Polígono	30	T=500 F	12.98	1067.24
Polígono	70	MCO F	0.64	1069.37	Polígono	25	MCO F	0.64	1066.38
Polígono	70	T=100 F	7.25	1070.86	Polígono	25	T=100 F	7.25	1066.54
Polígono	70	T=500 F	12.98	1071.47	Polígono	25	T=500 F	12.98	1066.62
Polígono	65	MCO F	0.64	1069.36	Polígono	20	MCO F	0.64	1064.84
Polígono	65	T=100 F	7.25	1070.84	Polígono	20	T=100 F	7.25	1065.33
Polígono	65	T=500 F	12.98	1071.46	Polígono	20	T=500 F	12.98	1066.09
Polígono	60	MCO F	0.64	1069.33	Polígono	16	MCO F	0.64	1064.07
Polígono	60	T=100 F	7.25	1070.84	Polígono	16	T=100 F	7.25	1065.36
Polígono	60	T=500 F	12.98	1071.46	Polígono	16	T=500 F	12.98	1066.09
Polígono	55	MCO F	0.64	1069.29	Polígono	15.5		Culvert	
Polígono	55	T=100 F	7.25	1070.74					
Polígono	55	T=500 F	12.98	1071.46	Polígono	15	MCO F	2.46	1063.79
					Polígono	15	T=100 F	13.67	1064.3
Polígono	54		Culvert		Polígono	15	T=500 F	22.26	1064.67
Polígono	50	MCO F	0.64	1069.22					
Polígono	50	T=100 F	7.25	1070.61					
Polígono	50	T=500 F	12.98	1070.89					
Polígono	47		Culvert						

LÁMINA DE AGUA. ARROYO VADILLO. ESTADO FUTURO

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	W.S. Elev (m)
Polígono	10	MCO F	2.46	1061.94
Polígono	10	T=100 F	13.67	1063.26
Polígono	10	T=500 F	22.26	1064.01
Polígono	9.5		Culvert	
Polígono	9	MCO F	2.46	1061.19
Polígono	9	T=100 F	13.67	1061.55
Polígono	9	T=500 F	22.26	1061.91
Polígono	8	MCO F	2.46	1060.31
Polígono	8	T=100 F	13.67	1060.93
Polígono	8	T=500 F	22.26	1061.77
Polígono	6	MCO F	2.46	1060.2
Polígono	6	T=100 F	13.67	1060.93
Polígono	6	T=500 F	22.26	1061.77
Polígono	5	MCO F	2.46	1059.56
Polígono	5	T=100 F	13.67	1060.91
Polígono	5	T=500 F	22.26	1061.76
Polígono	4	MCO F	2.46	1059.4
Polígono	4	T=100 F	13.67	1060.88
Polígono	4	T=500 F	22.26	1061.76
Polígono	3		Culvert	
Polígono	2	MCO F	2.46	1058.81
Polígono	2	T=100 F	13.67	1059.49
Polígono	2	T=500 F	22.26	1059.72
Polígono	0	MCO F	2.46	1058.43
Polígono	0	T=100 F	13.67	1058.96
Polígono	0	T=500 F	22.26	1059.23

En lo que respecta a la obra de paso situada en la calle del Gremio de los Canteros, para la avenida de periodo de retorno de 500 años, hay una diferencia de cota entre el estado actual y el resultante después de la urbanización de 34 cm.

4. CONCLUSIÓN

El presente documento del Estudio Hidrológico e Hidráulico del Arroyo del Vadillo en la zona del futuro Parque Empresarial "Prado del Hoyo" en Segovia, cumple con las Normas vigentes y por tanto queda en condiciones de ser presentado a la aprobación de los distintos Organismos competentes en la materia

En Segovia, a 26 de junio de 2012



Fdo: Fernando Belenguer Mula

Arquitecto colegiado COACV nº 4670

