

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES
Y PUERTOS Y DE INGENIERÍA DE MINAS**

MÁSTER EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL AGUA Y DEL TERRENO



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**Optimización hidráulica de balsas en línea y su adaptación como Solución Basada
en la Naturaleza para mitigar el riesgo de inundación. Caso de estudio Campo de
Cartagena – TM de San Javier (Murcia)**

Presentado por:

Ing. Ricardo Flores Márquez

Directores:

Dr. Altarejos García, Luis

Dr. García Bermejo, Juan Tomás

2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	8
2.1. Situación del Campo de Cartagena frente a eventos hidrológicos extremos.....	8
2.2. Plan de Vertido Cero	12
2.3. Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN).....	13
3. OBJETIVOS.....	15
4. CASO DE ESTUDIO	15
5. METODOLOGÍA Y BASES DE CÁLCULO	17
5.1. Información de partida y herramientas de cálculo	17
5.2. Ubicación de diques	17
5.3. Dimensionamiento Hidráulico de Balsas	19
5.4. Estudio de sedimentos.....	21
5.5. Planteamiento de Alternativas constructivas de Diques.....	24
5.6. Evaluación de Alternativas según requerimientos de SbN.....	27
5.7. Aspectos complementarios de diseño.....	31
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	32
6.1. Ubicación, número y altura de los diques	32
6.2. Capacidad de retención de sedimentos.....	39
6.3. Evaluación de alternativas.....	47
6.4. Solución propuesta	50

7. CONCLUSIONES	56
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
9. ANEXOS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista aérea del centro poblado San Javier tras el evento de precipitación el 13 – 09 – 2019	8
Figura 2. Comparación temporal del crecimiento antrópico en la zona aledaña al del estudio	9
Figura 3. Comparación de imágenes del satélite Sentinel 2 para el Mar Menor antes y posterior al evento de precipitación en setiembre del 2019.	12
Figura 4. Ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza.	14
Figura 5. Ubicación geográfica de la zona destinada a la implementación de las balsas en línea	16
Figura 6. Análisis visual de ubicación de diques. Ubicaciones tentativas señaladas.	18
Figura 7. Esquema del modelo hidrológico en HEC HMS de la cuenca estudiada.	22
Figura 8. Esquemas de alternativas evaluadas para los diques de balsas.	26
Figura 9. Porcentaje de laminación vs número de diques para distintas configuraciones.	32
Figura 10. Porcentajes de laminación para distintos periodos de retorno a lo largo de las pruebas.	33
Figura 11. Hidrogramas de funcionamiento de balsas en línea para TR: 50 años.	35

Figura 12. Hidrogramas de operación de Dique D1 para balsas en línea (TR: 100 años)..	36
Figura 13. Secciones transversales (A) Dique 1; (B) Dique 2; (C) Dique 3.	36
Figura 14. Información geométrica para simulación hidráulica 2D con base en MDE.....	38
Figura 15. Profundidad de agua para simulación con periodo de retorno de 50 años. Time step 10:00 horas de iniciada la simulación.	39
Figura 16. Flujo instantáneo de sedimentos (ton) total y separado por tamaño de partículas - MPM.	40
Figura 17. Comparativa de volúmenes instantáneos movilizados en cada periodo de tiempo y volúmenes acumulados para el escenario natural y el modificado (integral) – MPM.	41
Figura 18. Sedimentograma comparativo del cauce natural (situación actual) y posterior a la implementación de la propuesta de balsas en línea (integrado) - MPM.	41
Figura 19. Perfil de velocidades y elevación de la lámina de agua para escenario natural en zona de balsas -LC.	42
Figura 20. Flujo instantáneo de sedimentos (ton) total y separado por tamaño de partículas, escenario natura - LCl.	44
Figura 21. Perfil de velocidades y elevación de la lámina de agua para escenario modificado en zona de balsas - LC.	44
Figura 22. Flujo instantáneo de sedimentos (ton) total y separado por tamaño de partículas, escenario modificado - LC.....	45
Figura 23. Sedimentograma comparativo del cauce natural (situación actual) y posterior a la implementación de la propuesta integral de balsas en línea (integrado) - LC.....	46
Figura 24. Ortofotos de la zona de balsas.	52
Figura 25. Velocidades máximas registradas (TR: 50 años).	53
Figura 26. Distribución de especies para revegetación.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de modelo hidráulico en HEC-RAS.	20
Tabla 2. Parámetros del modelo hidráulico para transporte de sedimentos en HEC RAS.	23
Tabla 3. Criterios y subcriterios de análisis.....	29
Tabla 4. Escala de valoración de criterios y alternativas.	29
Tabla 5. Dimensiones hidráulicas de diques.	34
Tabla 6. Efecto de laminación de caudales y retardo al caudal pico para cada escenario.	34
Tabla 7. Efecto de laminación de caudales y retardo al caudal pico para cada escenario.	38
Tabla 8. Porcentajes de retención de sedimentos tras simulación con método Laursen – Copeland.	46
Tabla 9. Pesos de Ponderación por subcriterios.....	47
Tabla 10. Valoraciones de las alternativas constructivas propuestas según subcriterios... ..	48
Tabla 11. Valoraciones globales para las alternativas propuestas.....	49
Tabla 12. Relación Beneficio / Costo para las alternativas propuestas.	50

1. INTRODUCCIÓN

La zona del Campo de Cartagena se caracteriza por un clima semi-árido donde una parte de las precipitaciones se concentran en eventos de corta duración y gran intensidad. En paralelo, el medio físico viene experimentando modificaciones por las actividades agrícolas y urbanísticas, las cuales afectan negativamente la red de drenaje superficial de la cuenca: por la ocupación de llanuras de inundación para actividades agrícolas intensivas, la implementación de hileras de cultivo a favor de la máxima pendiente y la impermeabilización de suelo. La confluencia de estos factores propicia avenidas en las zonas de la cuenca baja cercana al Mar Menor que afectan a la población y al equilibrio ecosistémico de la laguna por el arrastre de sedimentos. Frente a ello, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) ha puesto en marcha el Plan de Vertido Cero con la finalidad de frenar o disminuir la aportación de contaminantes al cuerpo de agua. Para tal fin, se han propuesto una serie de medidas a implementar a distintos niveles con especial énfasis en la aplicación de las denominadas Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). En este contexto, a través de un convenio con la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) desarrolla propuestas que reduzcan el riesgo de inundación en los núcleos urbanos del Mar Menor y que sean compatibles con los objetivos del Plan de Vertido Cero. Enmarcado en ello, se identifica la necesidad de optimizar el diseño de las propuestas de forma que sean coherentes con los fundamentos y objetivos de una SbN.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

2.1. SITUACIÓN DEL CAMPO DE CARTAGENA FRENTE A EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS

Esta zona del sudeste español se caracteriza por tener un clima semi-árido, donde se presentan precipitaciones concentradas de alta intensidad y de pocos eventos durante la época húmeda (invierno), y de nula o muy baja precipitación el resto del año. Esto, aunado a las características del medio moldeado por la intervención antrópica, agudizan el riesgo de inundaciones. Así, entre los años 2015 y 2020 se registraron eventos que terminaron causando inundaciones en los centros poblados de la cuenca baja, cercana al Mar Menor. Cabe mencionar que los casos de mayor importancia vinieron potenciados por fenómenos atmosféricos como la gota fría o DANA (Depresión Aislada a Niveles Altos).

Figura 1. Vista aérea del centro poblado San Javier tras el evento de precipitación el 13 – 09 – 2019.
Fuente: García (2019)

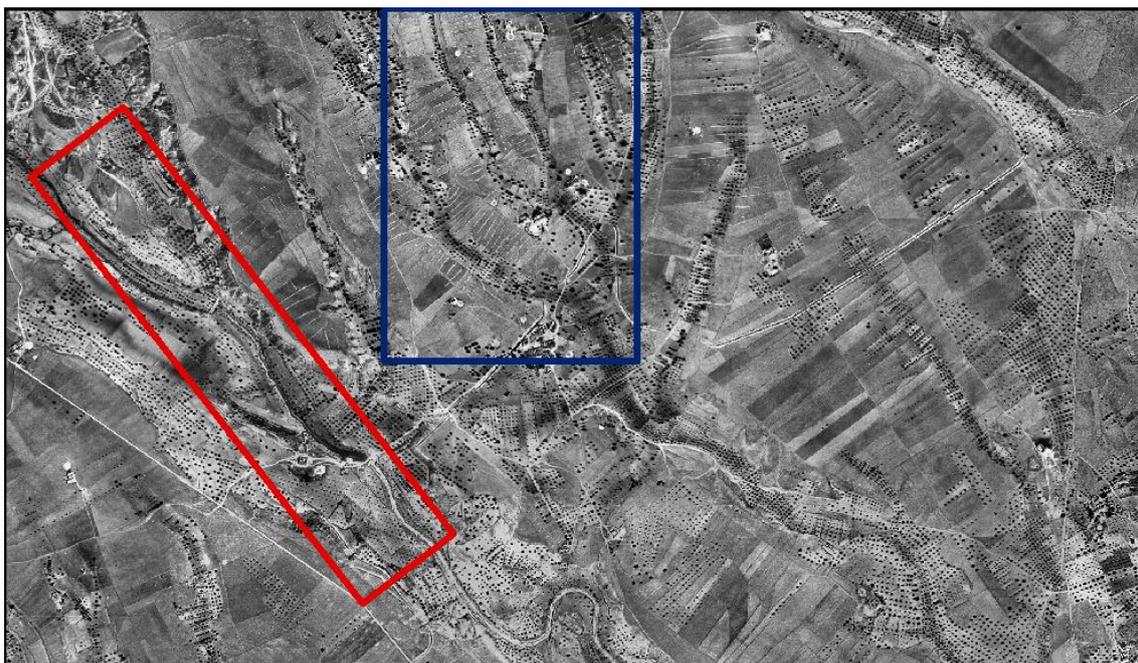


Tras revisar la historia del Campo de Cartagena, podemos identificar cómo el comportamiento de ocupación del territorio ha ido variando con el tiempo. Los principales factores involucrados son el incremento de la disponibilidad hídrica por el Trasvase Tajo – Segura, lo que conllevó a pasar de una agricultura extensiva a una intensiva; y el *boom* inmobiliario para turismo en las zonas cercanas al Mar Menor y La Manga. En todo caso, los nuevos patrones de ocupación implicaron la alteración de la red de drenaje, llegando incluso a la desaparición completa de los cauces en las cuencas media y baja y su consecuente ocupación con fines agrarios o de vivienda (Romero Díaz, Caballero Pedraza, y Pérez Morales, 2017). Estos escenarios son recurrentes a lo largo de las distintas ramblas que desembocan al Mar Menor, pudiendo ser rastreados mediante un análisis temporal de las ortofotos disponibles en el Centro de Descargas del CNIG (Centro-Nacional-de-Información-Geográfica) y el geoportal del SITMURCIA (Sistema-de-Información-Territorial-de-la-Región-de-Murcia). En el estudio realizado por la Confederación-Hidrográfica-del-Segura (2014): “Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación”, se exponen que en algunos casos no es posible aplicar criterios geomorfológicos para definir el Dominio Público Hidráulico (DPH), o incluso para la determinación de cauces, por encontrarse zonas muy alteradas o por haber desaparecido por completo debido a ocupaciones agrícolas / urbanas. Como señala la institución, esta situación dificulta la dinámica fluvial del río y convierte gran parte de estas zonas en áreas con alta susceptibilidad de inundación.

Figura 2. Comparación temporal del crecimiento antrópico en la zona aledaña al del estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de imágenes del CNIG y SITMURCIA

(A) Ortofoto año 1956. Las zonas agrícolas no intervenían sobre los cauces efímeros.



(B) Ortofoto año 1984. Las zonas de cultivo comienzan a nivelar los cauces para su uso.



(C) Ortofoto año 1999. Los cauces han sido degradados por completo. Al lado derecho se observa la presencia de viveros y zonas recubiertas.

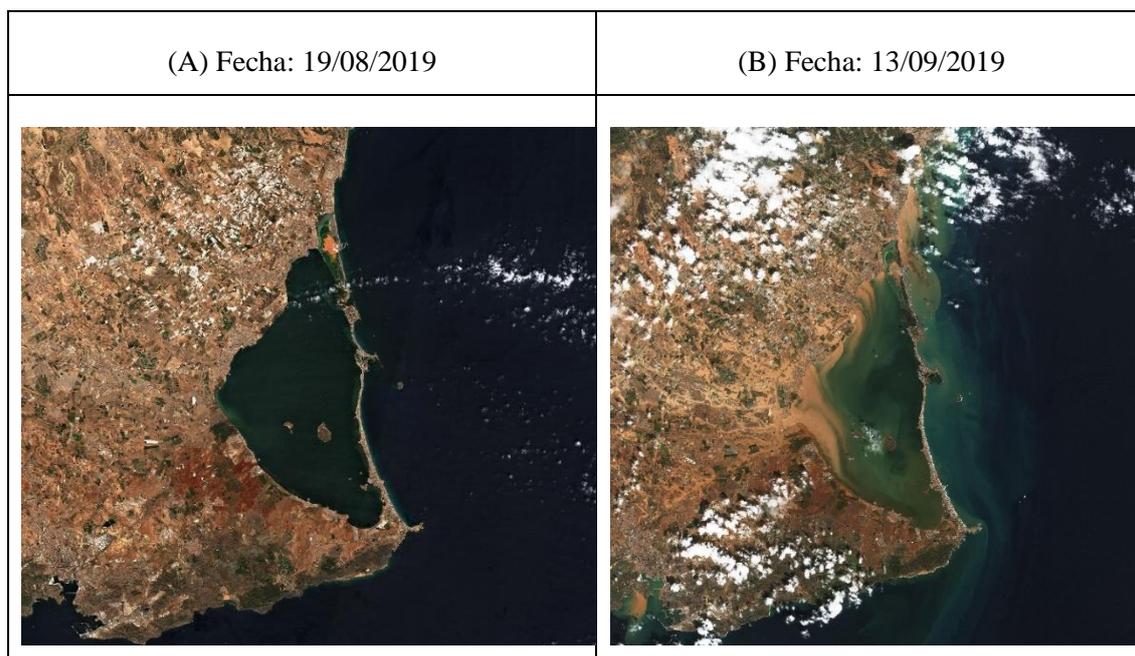


(D) Ortofoto año 2020. Cauces efímeros degradados. Agricultura intensiva con parcelas con hileras a favor de la máxima pendiente. Incremento de zonas recubiertas con plástico.



La afección al medio no se limitó a los cauces, por el contrario, un análisis integral de las cuencas trae a colación cambios en los sentidos de siembra favoreciendo la escorrentía superficial, la disminución de zonas inundables naturales para su transformación en superficies agrícolas, y el incremento de nutrientes y sustancias químicas en el suelo que alcanzan el Mar Menor. Todo ello incrementa la escorrentía superficial y la susceptibilidad de los suelos a la erosión, generando flujos de sedimentos y sustancias contaminantes (nutrientes y agroquímicos) que ingresan a los cauces efímeros y terminan desembocando en el Mar Menor, cuerpo de agua que muchas veces ha visto superada su capacidad auto depuradora. Uno de los escenarios más recientes y visibles sucedió en setiembre del 2019 cuando, posterior a una precipitación de temporada, se observó un gran ingreso de sedimentos a la laguna, acelerando los problemas de eutrofización, anoxia y contaminación que ya venía registrando.

Figura 3. Comparación de imágenes del satélite Sentinel 2 para el Mar Menor antes y posterior al evento de precipitación en setiembre del 2019. Fuente: Copernicus-Sentinel-Data (2019)



2.2. PLAN DE VERTIDO CERO

Sobre esta relación intrínseca entre el Campo de Cartagena y el Mar Menor, varios estudios han sido desarrollados desde el gobierno central, el gobierno regional y local, la Confederación Hidrográfica, la Comunidad de Regantes y actores de la sociedad civil. El MITECO (2019) ha puesto en marcha el Plan de Vertido Cero con el objetivo de evitar, o reducir al máximo posible, los aportes hídricos contaminados que alcanzan la laguna, ya sea de manera superficial o subterránea, y que han contribuido durante décadas a su eutrofización. El plan presenta una serie de actuaciones propuestas a implementar a diferentes escalas y de acuerdo con los distintos problemas identificados. Un grupo está focalizado en el control de los procesos erosivos por escorrentías superficiales y transporte de sedimentos contaminados, incluyendo entre sus propuestas, actuaciones constructivas de diques y de recuperación de cauces. Acorde a ello, uno de los últimos informes presentados por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) para el MITECO reitera la recomendación de trabajar con Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) (Ruiz *et al.*, 2020). Se mencionan la recuperación ambiental y funcional de los cauces y del conjunto de la red hidrográfica de la cuenca, actuaciones para reducir la erosión ligado al manejo del suelo y revegetación, y la recuperación y formación de humedales. Este documento expone dos aspectos importantes: el primero es que el efecto inercial de la situación actual llevará consigo una continuidad negativa sobre el medio, por lo que acciones paliativas y de recuperación deben

ser implementadas conjuntamente; y lo segundo, es la necesidad de un enfoque holístico que priorice las actuaciones por su eficacia para el cumplimiento de los objetivos.

Como parte de un convenio con la Demarcación Hidrográfica del Segura (CHS), la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) está llevando a cabo un estudio sobre las medidas de mitigación del riesgo de inundación compatible con los objetivos del Plan de Vertido Cero para recuperar el Mar Menor. El estudio se centra en el Término Municipal de San Javier – Región de Murcia, muy afectado por los episodios de lluvias torrenciales acaecidos en el periodo 2015 - 2020, pero con un historial importante de inundaciones; siendo la Rambla de Cobatillas el principal cauce relacionado con dichos eventos. Entre las medidas planteadas por el grupo de trabajo, a nivel de cuenca media se tiene el uso de balsas de laminación en línea por su potencial capacidad para proporcionar una detención transitoria del agua durante las crecidas y la consiguiente atenuación de caudales picos para luego vaciarse automáticamente al final de esta.

2.3. SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA (SbN)

Los beneficios que trae la protección del ambiente a la sociedad son nociones ampliamente estudiadas, sin embargo, el concepto de la Solución Basada en la Naturaleza (SbN) se presenta como una alternativa nueva frente a problemas actuales de índole multisectorial. Es así como, a inicios del siglo XXI, tras la presentación del término por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el Banco Mundial, las SbN son adoptadas y adecuadas a los objetivos de la Agenda 2030 por ser notoria su potencial contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Como indican Wild *et al.* (2020), la Comisión Europea (CE) las define como soluciones que están inspiradas y soportadas por la naturaleza, y que proveen simultáneamente beneficios y resiliencia ambiental, social y económica mediante adaptaciones locales, intervenciones sistémicas y de uso eficiente de los recursos. Como recogen (Somarakis *et al.*, 2019), desde el 2013 las SbN han sido ampliamente adoptadas e impulsadas a través de Políticas de Investigación e Innovación de la Unión Europea como medida para promover sinergia entre la naturaleza, la sociedad y la economía; siendo trasladadas al contexto español en la Agenda Urbana Española en el 2019. Terêncio, Fernandes, Cortes, Moura, y Pacheco (2020) rescatan las propuestas de la Comunidad Europea de trabajar en base a soluciones basadas en la naturaleza porque aportan sustentabilidad a partir de la integración y protección ambiental, con la salvedad de que deben ser estudiadas para cada situación específica. Siguiendo esta línea, en el repositorio <https://oppla.eu> podemos encontrar diversos casos de estudios enmarcados en la reducción del riesgo de inundación a partir de soluciones basadas en la naturaleza tales como las Balsas de

Retención de Avenidas del Río Lura – Milano – Italia¹, Combinación de protección contra inundaciones y restauración de hábitats en Seattle – USA² y Reservorio de Retención de Aguas en Podutik – Eslovenia³.

Figura 4. Ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza.

(A) Balsa de retención en la cuenca del río Lura, Milano – Italia. Fuente: Etatec-Studio-Paoletti (2017)



(B) Combinación de medidas de protección y restauración de riberas en Seattle – USA. Fuente: Osborn-Consulting-Incorporated (2013)



¹ <https://networknature.eu/casestudy/19515> Consultado el 07 de marzo de 2021.

² http://www.aboutvalues.net/data/case_studies/values_case_study_flood_protection_usa.pdf Consultado el 07 de marzo de 2021.

³ <https://networknature.eu/casestudy/17577> Consultado el 07 de marzo del 2021.

3. OBJETIVOS

Con todo lo expuesto anteriormente, el objetivo principal de esta investigación es optimizar el diseño de las balsas de retención como medida de laminación de picos en eventos extremos.

Para ello, se espera:

- Comprobar la efectividad de las balsas en línea como medidas de laminación de avenidas y evaluar su comportamiento frente a precipitaciones con distintos periodos de retorno.
- Proponer y evaluar alternativas de optimización técnica, económica y constructiva a partir del concepto de balsas en línea.
- Evaluar las alternativas propuestas según las características y objetivos de una Solución basada en la naturaleza.

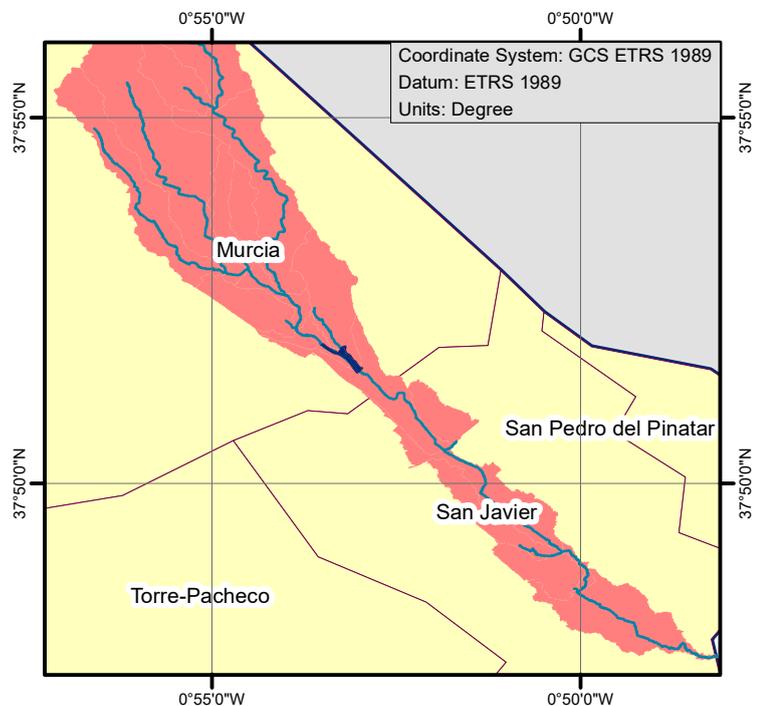
4. CASO DE ESTUDIO

El presente estudio se desarrolló teniendo como ámbito de trabajo la Rambla de Cobatillas en la zona aledaña al centro poblado Casa Blanca, perteneciente al Término Municipal (TM) de San Javier en la Región de Murcia al sudeste de España. A partir de la información proporcionada a través del convenio entre la CHS y la UPCT, el área ubicada en la Latitud $37^{\circ}51'40.69''\text{N}$ y Longitud $0^{\circ}53'6.88''\text{W}$ fue definida como zona potencial para la instalación de las balsas de laminación por sus características físicas:

- Presenta un encauzamiento “natural” con taludes de pendiente aproximada 2:1 en ambos márgenes que definen desniveles de 5 metros en promedio entre la zona baja y las terrazas de cultivos.
- A pesar de encontrarse modificado por la actividad agrícola, se identifica que la zona es parte del cauce original, por lo cual, la cuenca drena naturalmente sin necesidad de encauzamientos adicionales.
- Se encuentra en la cuenca media, por lo que, la medida permitiría laminar los caudales máximos de avenidas y su tiempo de llegada a la zona urbana en la cuenca baja.
- Los taludes en ambos márgenes, probablemente formados por movimiento de tierras para definir las terrazas de cultivo, han sido colonizados por vegetación arbustiva y herbácea sin patrón establecido de manejo. Por su parte, la zona baja tiene funcionalidad agrícola con el sentido de siembra a favor de la línea de máxima pendiente.



Ubicación de cuenca de la rambla Cobatillas en referencia a la Demarcación Hidrográfica y la Región de Murcia



Ubicación de cuenca de la rambla Cobatillas en referencia a la Demarcación Hidrográfica y la Región de Murcia

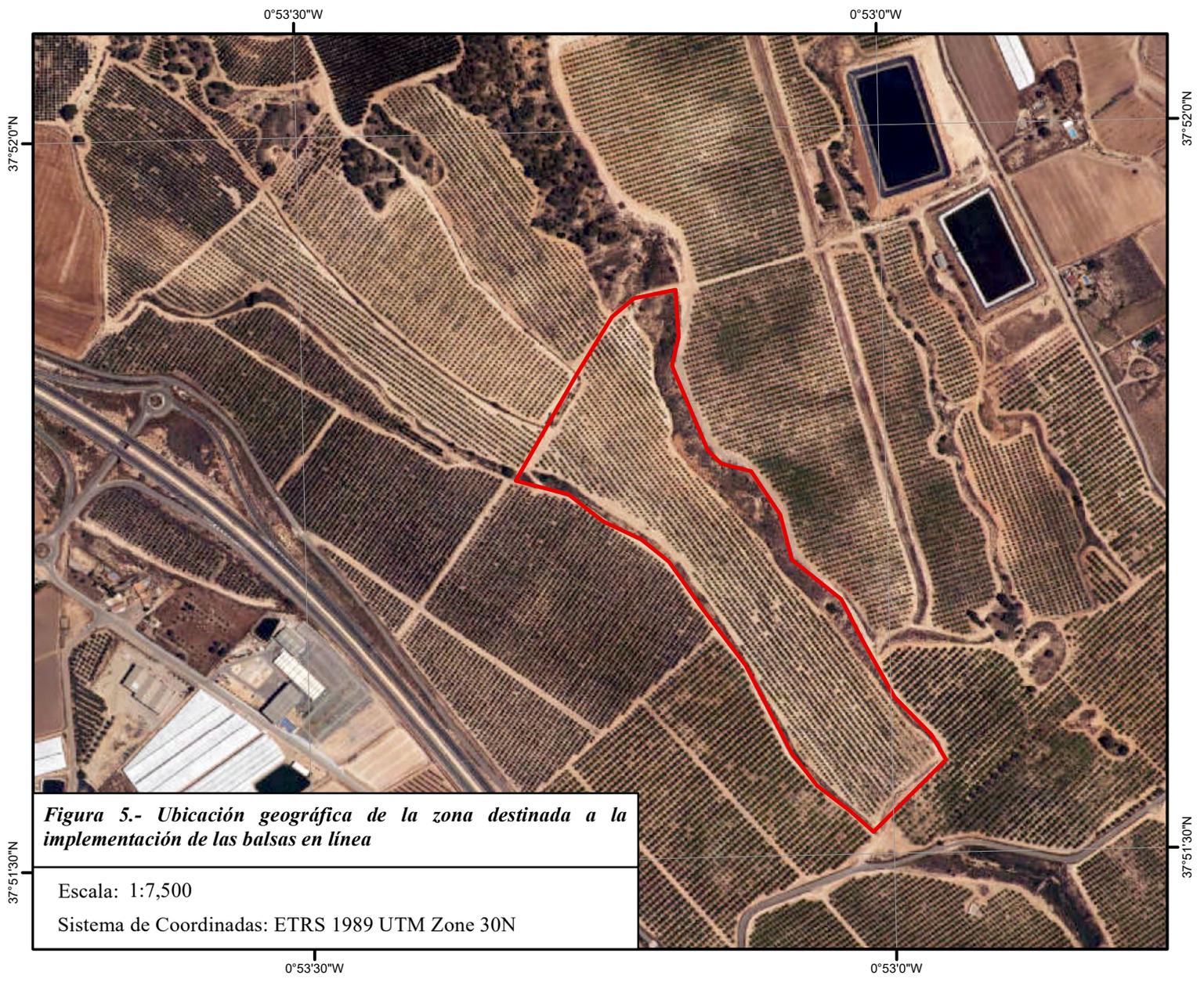


Figura 5.- Ubicación geográfica de la zona destinada a la implementación de las balsas en línea

Escala: 1:7,500
Sistema de Coordinadas: ETRS 1989 UTM Zone 30N

5. METODOLOGÍA Y BASES DE CÁLCULO

5.1. INFORMACIÓN DE PARTIDA Y HERRAMIENTAS DE CÁLCULO

Para el desarrollo de la investigación se empleó una serie de insumos digitales, listados a continuación junto con las herramientas que permitieron su manejo y procesamiento:

- Hidrogramas de diseño para periodos de retorno (TR) de 5, 10, 25, 50 y 100 años proporcionados por a través del convenio entre la CHS y la UPCT.
- Hidrogramas sintéticos generados para el punto de trabajo a partir de precipitaciones reales registradas durante los eventos de diciembre del 2016, setiembre del 2019 y marzo del 2020 en la cuenca de estudio.
- Modelo Digital de Elevación (MDE) con precisión espacial de 2 m para la zona de estudio obtenido del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana – España.
- Ortofotos históricas de la zona de estudio obtenidas del Centro Nacional de Información Geográfica del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana – España.
- Software HEC RAS 5.0.7 y visor HEC-DSSVue 3.2.3 desarrollados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos.
- Plataforma AutoCAD
- Plataforma QGIS 3.18.3
- Plataforma Microsoft Office

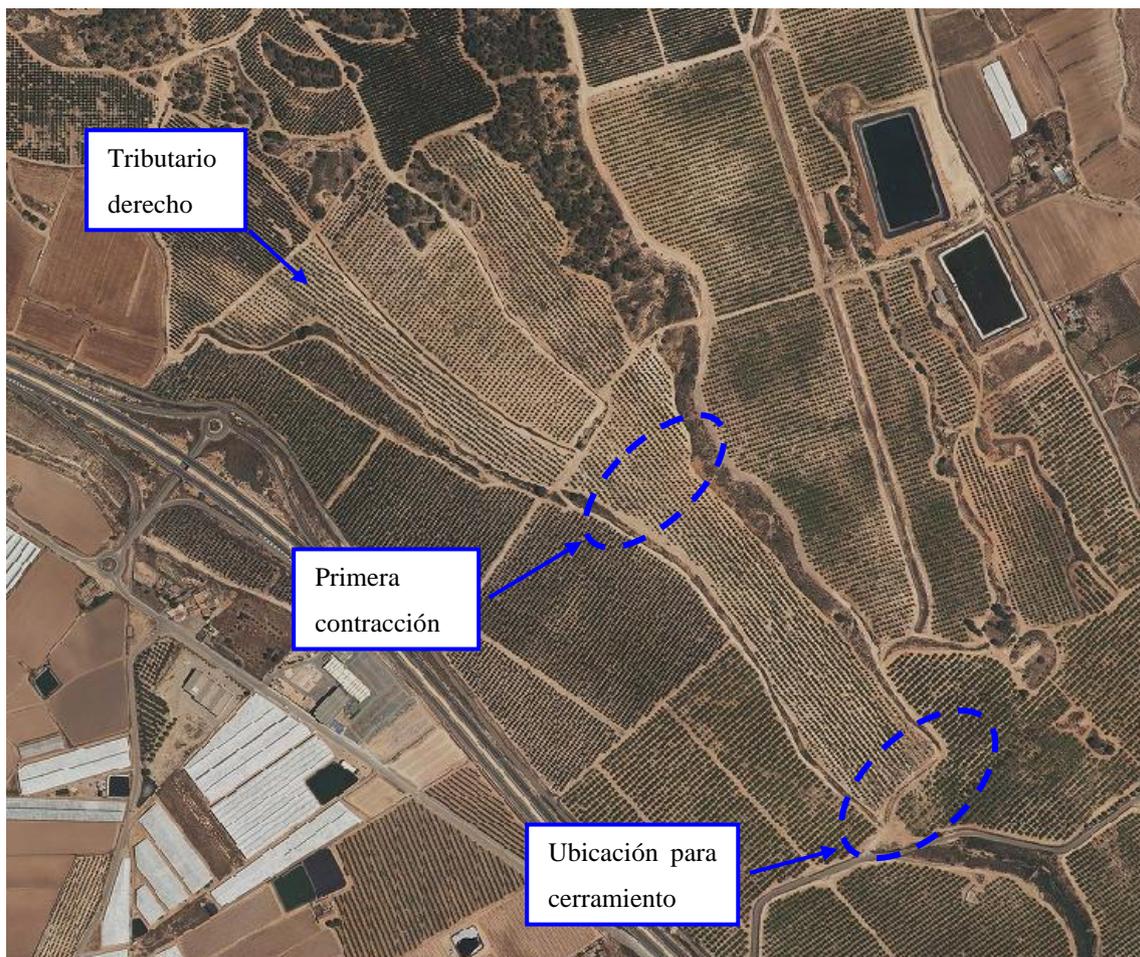
5.2. UBICACIÓN DE DIQUES

Empleando la plataforma QGIS se procesó el MDE para generar curvas de nivel cada 0.5 metros. Geológicamente la cuenca se ubica sobre glaciares de origen terciario. Se han identificado suelos de dominio arcilloso, destacando los calcisoles háplicos de buenas aptitudes agrícolas, pero cuya principal limitación está ligada al contenido de carbonatos. Estas formaciones determinan un drenaje imperfecto en la zona. (Centro-Nacional-de-Información-Geográfica, 2015; Díaz y Serrato, 2011; Marin y Castillo, 2011). Se identifican los desniveles y patrones de ensanchamiento y contracción a lo largo del cauce que puedan definir naturalmente un mayor volumen de retención. Aguas arriba a la zona de trabajo se identifica la confluencia de dos cauces, donde el principal aporte proviene del tributario derecho, el cual mantiene la característica de tramo encausado. Esto permitiría considerar dicha zona como susceptible de inundación, incrementando la capacidad de retención de la primera balsa. Para determinar si esta zona estaría recomendada

para ser intervenida se debe realizar un modelamiento del escenario actual y determinar la profundidad de inundación que se alcanzaría para el periodo de retorno con el que se diseñe. Se busca definir como zona de trabajo aquella donde el calado durante avenidas sea similar en ambos escenarios (con modificaciones y en el escenario cero).

Respecto a la ubicación de los diques para generar los recintos de balsas, se observa que la zona posterior a la confluencia anteriormente mencionada determina una contracción natural de la rambla. En ella se define una primera ubicación probable para una obra transversal. Adicionalmente, se prevé que el sistema de balsas debe contar con una acción de “cerramiento” que permita aprovechar el volumen final. Para ello, se debe identificar una sección que mantenga – en la medida de lo posible – el desnivel entre el cauce central y los laterales hacia el final del tramo.

Figura 6. Análisis visual de ubicación de diques. Ubicaciones tentativas señaladas. Fuente: Elaboración propia.



5.3. DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE BALSAS

Tomando como referencia lo indicado por Tech (2013) para el diseño de balsas secas de detención, una primera aproximación es determinar embalses considerando una relación longitud/ancho mínima de 2:1. Así, teniendo un ancho medio de 120 m. y un largo aproximado de 650 m. partimos definiendo entre dos o tres espacios de laminación. Sumado a dicho criterio, se toma en consideración el análisis del medio físico desarrollado previamente para las ubicaciones potenciales de los diques. Respecto a la altura de éstos, de forma análoga al análisis desarrollado por Terêncio *et al.* (2020) para evaluar embalses de detención sostenible, tomamos como referencia la clasificación planteada por Scholz y Sadowski (2009) para embalses de retención, donde alturas máximas de dique entre 3.5 y 5.5 m son consideradas “medidas sostenible”. Por lo tanto, se prevé no sobrepasar dicho margen en cuanto las estructuras se adecúen a las cotas del terreno.

Las características físicas del cauce se ven representadas por el coeficiente de rugosidad de Manning (por ser la ecuación empleada para los cálculos hidráulicos), por lo que debe expresar el efecto compuesto de retardo del flujo en los distintos escenarios a los que se encuentre expuesto el medio y ajustado en base al tamaño medio de las partículas, grado de irregularidad, variación de las secciones transversales, obstrucciones, vegetación y meandros que puedan formarse (Phillips y Tadayon, 2006). Ello implica conocer las características del medio y realizar ajustes de validación para el caso específico. Para el presente trabajo se recopiló información de estudios realizados en zonas cercanas como los de Marin y Castillo (2011) y Marco, Marin, y Castillo (2016). De ello, se adopta el valor 0.03 como coeficiente de rugosidad.

En referencia a la hidrología aportante al sistema, se cuenta con hidrogramas sintéticos de diseño generados para lluvias con periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Se decide comenzar el dimensionado con 50 años.

Tras lo expuesto, se genera un modelo hidráulico a través del módulo de análisis bidimensional de HEC-RAS considerando los parámetros indicados en la Tabla 1. Sobre la base de la data espacial, se generaron las geometrías necesarias para modelizar la presencia de diques transversales (DT) con sus respectivos drenajes:

- Se parte con una misma altura de 4 m. para los diques probando configuraciones de 2, 3, 4 y 5 unidades. En todos los casos se propuso una misma abertura del drenaje en la parte baja de la estructura y, que de ocurrir un sobrevertido, éste ocupe el ancho total de la corona. De esta forma se pretende disminuir el caudal específico sobre el dique.

- Se comprueba para qué configuración se consigue mayor laminación del caudal pico.
- Posteriormente, para la configuración seleccionada se proponen y modelan distintas ubicaciones y alturas de dique buscando optimizar el porcentaje de laminación.
- Finalmente, se trabaja sobre los drenajes: dimensiones, configuraciones y alturas sobre los DT. En todos los casos siempre se mantiene una abertura en la parte inferior que garantice el vaciado inmediato de la balsa.

Tabla 1. Parámetros de modelo hidráulico en HEC-RAS. Fuente: elaboración propia.

Análisis hidráulico	Bidimensional
Ráster de Terreno	MDE para zona de estudio
Tamaño de Celda de Análisis	5 m x 5 m
Número de Manning Asociado	0.03
Análisis de Flujo	Flujo No Estacionario
Periodo de Análisis	24 horas
Condiciones de Contorno	IN: Hidrogramas OUT: Pendiente Normal
Caudal mínimo de tránsito ⁴	1 m ³ /s
Intervalo de tiempo computacional	12 seg
Intervalo de tiempo de hidrograma de salida	30 min
Intervalo de tiempo de hidrograma de salida	10 min

⁴ Para evitar inestabilidad en el modelo de simulación.

5.4. ESTUDIO DE SEDIMENTOS

Las obras de balsas en línea tienen como principal objetivo la laminación de la intensidad del flujo durante un evento de avenida, así como el retardo en la “llegada del caudal máximo”. Para ello, se genera la detención temporal del volumen de agua circulante, pero evitando su retención por un periodo prolongado. Sin embargo, como parte del trabajo se ha decidido realizar un análisis de cómo se vería afectado el transporte de sedimentos en el cauce luego de implementar las actuaciones propuestas. Para ello, se utilizó el módulo de Análisis de Sedimentos del HEC-RAS según lo descrito a continuación.

El transporte de sedimentos por el cauce proviene de dos fuentes: el arrastre de partículas de la superficie de la cuenca a través de la escorrentía superficial hacia los cauces, y el arrastre de las partículas de fondo del cauce efímero; ambas ligadas a eventos de precipitaciones. En este sentido, los volúmenes movilizados y su comportamiento temporal son proporcionales a la intensidad de la lluvia.

Como insumo primario se contó con información hidrológica de la cuenca modelada en HEC-HMS según el esquema mostrado en la Figura 7. Con el propósito de tener resultados de volúmenes y concentraciones comparables, se decidió realizar evaluaciones con una lluvia de diseño de 100 años de periodo de retorno. Se obtuvo la siguiente información:

- Variación temporal de aporte de sedimentos de las distintas subcuencas delimitadas con intervalo temporal de 30 minutos.
- Características granulométricas de las aportaciones de sedimentos desde las subcuencas y las correspondientes para el lecho del cauce.
- Hidrogramas de aporte desde cada subcuenca con intervalo temporal de 30 minutos.

Para la topografía se emplearon los MDE disponibles en el Centro de Descargas del CNIG del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana – España. Fueron procesadas en plataforma GIS para eliminar elevaciones puntuales de mínima extensión que no guarden relación con el entorno. Se culminó generando un mosaico en formato ráster para evaluar la situación actual y otro incluyendo las actuaciones propuestas.

Con dicha información, se construyó un modelo hidráulico en el módulo de Sedimentos de HEC-RAS considerando las características de la Tabla 2 y los diques según corresponda.

Figura 7. Esquema del modelo hidrológico en HEC HMS de la cuenca estudiada. Fuente: Elaboración propia.

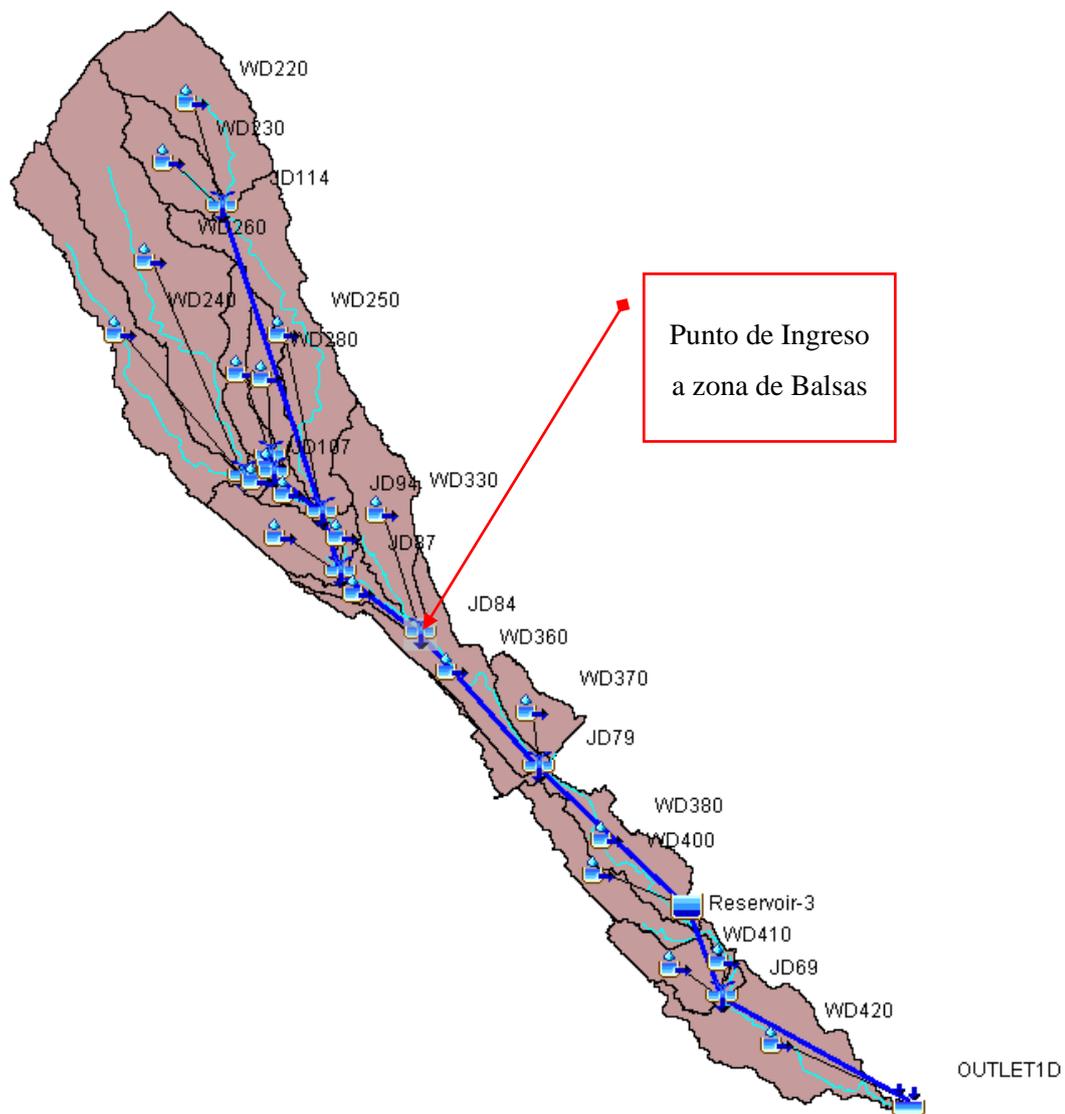


Tabla 2. Parámetros del modelo hidráulico para transporte de sedimentos en HEC RAS. Fuente: elaboración propia.

Análisis hidráulico	Unidimensional
Topografía	MDE para zona de estudio
Separación entre secciones transversales	20 metros.
Número de Manning Asociado	0.03
Análisis de Flujo	Flujo Cuasi Estacionario
Duración de flujo	30 min
Incremento computacional	0.01 horas
Periodo de Análisis	36 horas
Condiciones de Contorno Hidrológicas	IN: Hidrogramas por cada subcuenca analizada OUT: Pendiente Normal en único punto de salida del modelo
Condiciones de Contorno Sedimentos	IN: Carga de sedimentos en función del tiempo para cada subcuenca analizada

5.5. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS CONSTRUCTIVAS DE DIQUES

Tras haber definido la cantidad y las características generales de los diques, en esta etapa se proponen alternativas constructivas según la literatura revisada. Siendo que el alcance del proyecto no contempla un análisis exhaustivo de los requerimientos estructurales, se realiza una revisión de experiencias con estructuras de similares características y manuales de diseño para proponer un pre-dimensionamiento que permita analizar sus costes y beneficios acorde al objetivo del proyecto. Se plantean cinco (05) alternativas:

- Alternativa 1: Dique de gaviones con tuberías de concreto como desagües.
Tomando como referencia de diseño el manual de Pequeñas Presas y Vertederos de Tierra y Gaviones de la Land-and-Water-Division (2001), definimos que tanto el talud aguas arriba como aguas abajo sean escalonados. A pesar de que el desnivel en cada dique es superior a los 3 m, el riesgo de afectación a los gaviones ya sea por la turbulencia al caer el agua o por el desgaste abrasivo de la malla son mínimos. Se ha calculado el caudal específico a transitar menor a 1 m³/s y se estima que la carga de sedimentos de sobrevertidos no llevará consigo materiales particulados de gran tamaño por la altura de sobrevertido. Luego, considerando una analogía válida entre el funcionamiento de muros de contención de gaviones y pequeñas presas con el mismo método constructivo, se propone una separación entre escalones de 50 cm y que la primera fila esté bajo el nivel del terreno trabajando como cimiento (Dirección-General-de-Desarrollo-Rural-Innovación-y-Formación-Agroalimentaria, 2020).
- Alternativa 2: Dique de gaviones con tuberías de concreto como desagües con talud revegetado de tierra aguas arriba.
Para esta propuesta se toman las mismas consideraciones que la Alternativa 1 respecto a los gaviones, a lo cual se adiciona un relleno de tierra sobre el talud aguas arriba. Se propone revegetar dicho espacio con especies locales. Para definir el talud se toma como referencia las recomendaciones de la Dirección-General-de-Desarrollo-Rural-Innovación-y-Formación-Agroalimentaria (2020) en relación al uso de mantas orgánicas y de Tech (2013) en relación a la trabajabilidad para el mantenimiento de taludes situando un rango recomendado entre 2:1 a 3:1. Se define talud 2.5:1.
- Alternativa 3: Dique de gravedad con concreto convencional.
Siendo el uso de concreto una opción ampliamente difundida para presas de gravedad, se hace una revisión de las dimensiones consideradas para actuaciones similares en el entorno del proyecto. La Confederación-Hidrográfica-del-Segura mantiene de libre

disponibilidad en formato digital los planos de secciones transversales típicas de las presas dentro de su jurisprudencia; de las cuales, filtrando las más recientes, de menor tamaño, de hormigón y de gravedad, se revisaron las construidas y en funcionamiento en las ramblas – cauces de Doña Ana, El Cárcabo, El Morrón, José Bautista Martín, La Risca, Los Charcos y Moratalla. A partir de ello, se plantea como sección típica una presa de perfil Creager con talud aguas arriba de 0.5:1 y aguas abajo de 0.75:1.

- Alternativa 4: Dique de gravedad de concreto ciclópeo.

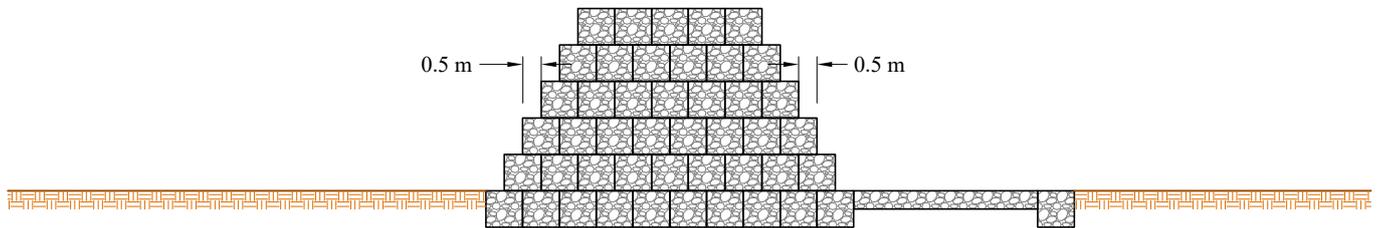
Se toman en cuenta las mismas consideraciones de taludes definidas para la Alternativa previa: aguas arriba 0.5:1 y aguas abajo de 0.75:1. Constructivamente el concreto ciclópeo admite el tamaño máximo de los bolos entre 6 y 12 pulgadas representando aproximadamente el 40% del volumen de la estructura.

- Alternativa 5: Dique construido con suelo-cemento (SC)

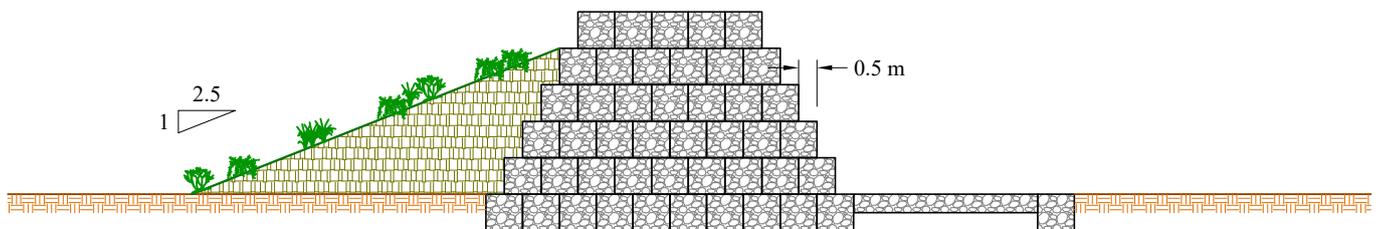
Según lo expuesto por Richard y Hadley (2006) en la Guía para aplicaciones del suelo cemento para recursos hídricos, indica que las pendientes para reservorios normalmente se manejan entre 2.5:1 y 4:1; mientras que Jia, Lino, Jin, y Zheng (2016) recoge valores entre 1:1 a 1.5: determinada en ambos casos según la estabilidad en la construcción. Siendo que no se espera pre-dimensionar una estructura de gran tamaño, se considera el talud 1.5:1 simétrico. Se entiende que el proceso constructivo implicará la compactación de capas horizontales.

Figura 8. Esquemas de alternativas evaluadas para los diques de balsas. Fuente: elaboración propia.

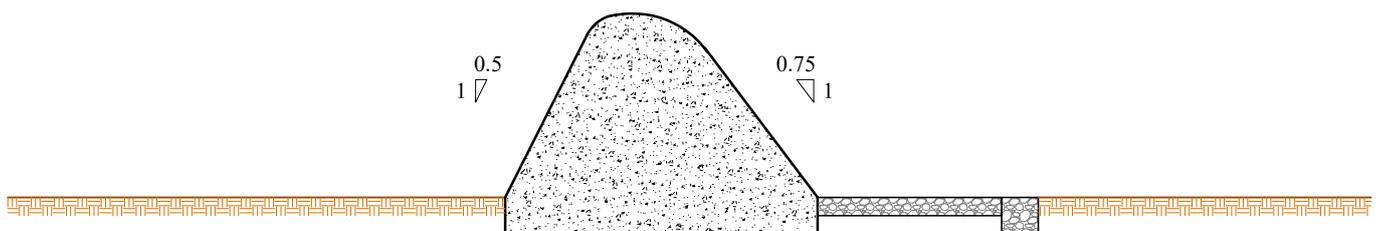
(A) Alternativa de dique de gaviones



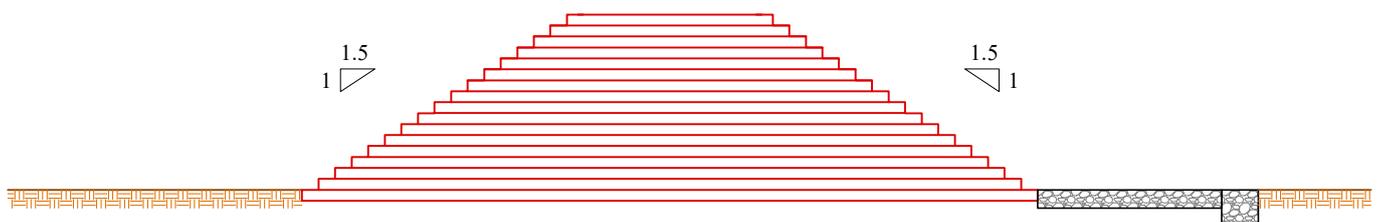
(B) Alternativa de dique de gaviones con talud revegetado aguas arriba.



(C) Alternativas de dique de concreto.



(D) Alternativa de dique con suelo - cemento



5.6. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS SEGÚN REQUERIMIENTOS DE SbN

Como recogen Dumitru y Wendling (2021) de la literatura, las SbN ofrecen soluciones integrales y multifuncionales a los principales retos sociales mediante el uso de la naturaleza y los procesos naturales, proveyendo a su vez beneficios ambientales y bienestar humano de forma simultánea. Es decir, para optimizar este tipo de actuaciones, es necesario analizar tanto los beneficios directos, los colaterales y los posibles *tradeoffs* derivados. En tal sentido, tras reconocer que la construcción de diques es la acción crítica que permite dar forma a la idea de “balsas en línea”, observamos que supone también la mayor inversión de recursos y, por consiguiente, es la que podría generar mayor afectación al medio. Por lo tanto, se decide evaluar las alternativas constructivas propuestas para los diques con el objetivo de definir cuál de ellas se adecúa de la mejor manera a los parámetros de sostenibilidad esperados para que las “balsas en línea” sean consideradas como una SbN.

Para la evaluación de alternativas se utilizó el Proceso Analítico de Jerarquización (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) como técnica de decisión multicriterio.

- Definición del Objetivo
Se plantea jerarquizar las opciones en función de quién aporte mayor beneficio al proyecto según la perspectiva de una SbN.
- Definición de criterios de evaluación
A partir de la revisión de literatura, para definir los criterios de análisis se tomó como referente el estándar planteado por la IUCN (2020a) y el *handbook* de Dumitru y Wendling (2021) para evaluación de SbN. Se incluyeron a su vez los documentos realizados para el proyecto “Análisis de soluciones para el objetivo del vertido cero al Mar Menor proveniente del Campo de Cartagena” (MITECO, 2019). Se definieron siguientes criterios:
 - Resiliencia climática (Dumitru y Wendling, 2021)
En referencia a la capacidad que deben tener las soluciones para proveer resiliencia a los impactos del cambio climático a través de servicios ecosistémicos y acciones para combatir el cambio climático. Los indicadores propuestos están en referencia al impacto directo e indirecto de las soluciones sobre los gases de efecto invernadero (GEI), con énfasis en el carbono, pues, como señala la OMM (2019), el dióxido de carbono (CO₂) es considerado el principal gas de efecto invernadero por su larga duración en el medio en relación con las actividades humanas. Por tal motivo, es un indicador importante de la

capacidad de contaminación o descontaminación que aporta una actividad – estructura – funcionamiento. Por lo tanto, los subcriterios considerados son:

- Carbono removido / almacenado
 - Huella de carbono
- Gestión adaptativa: Adaptabilidad (IUCN, 2020b)
- Tomando en cuenta las potenciales consecuencias positivas y/o negativas de una actuación sobre el medio, se remarca la necesidad de que las actuaciones sean lo suficientemente flexibles y adaptables frente a nuevas situaciones evidenciadas durante la vida útil del proyecto, pues, a través de procesos de monitoreo y aprendizaje iterativo se debe ir mejorando el balance entre los beneficios de carácter social y ecológico.
- Diseño Escalar: Integración con el entorno (IUCN, 2020b)
- El diseño de las SbN debe tener un enfoque paisajístico, entendido éste como la consideración de las interacciones que tenga con el medio y que ocurran a diferentes escalas sociales y ecológicas dentro del espacio en el que se implementen. Por lo tanto, si bien una medida puede ser planificada a escala local, lo ideal será que forme parte de un paquete integral de actuaciones a nivel macro. Así, durante la etapa de planificación y diseño es relevante buscar e identificar las potenciales sinergias que puedan contribuir en abordar necesidades socioeconómicas y ambientales.
- Ganancia neta de biodiversidad (IUCN, 2020b)
- Sin importar cuál sea el reto social por superar, toda SbN debe conseguir un impacto neto positivo en la biodiversidad e integridad ecológica del entorno. Para ello, se requiere – como mínimo – conservar el ámbito de influencia, mejorar o restaurar el entorno evitando simplificaciones y considerando los servicios y conectividades ecosistémicas. Por lo tanto, los subcriterios considerados son:
- Conectividad ecosistémica
 - Gestión de residuos durante ejecución
 - Gestión de residuos durante / posterior funcionamiento
- Regeneración del medio: Percepción ambiental (Dumitru y Wendling, 2021; IUCN, 2020b)
- Las SbN tienen el potencial de contribuir a la conservación, mejora y/o regeneración sostenible del lugar. Frente a ello, la conexión, participación y

percepción social respecto a las mejoras ambientales alcanzadas juega un papel importante en cuanto al involucramiento y empoderamiento de los actores con las medidas adoptadas.

Tabla 3. Criterios y subcriterios de análisis. Fuente: elaboración propia

Criterios	Subcriterio	Abreviatura
Resiliencia Climática	Carbono removido/almacenado	RC-cr
	Huella de carbono	RC-hc
Gestión adaptativa	Adaptabilidad	GA-a
Diseño escalar	Integración Paisajística	DE-ip
Ganancia neta de biodiversidad	Conectividad Ecosistémica	GnB-ce
	GR Ejecución	GnB-gr
	GR Funcionamiento	GnB-grf
Regeneración del Medio	Percepción ambiental	RM-pa

- Ponderación de criterios

Siguiendo con la metodología recogida por Baker *et al.* (2001), se genera una matriz de comparación pareada a nivel de criterios, calificando con valores entre 1 y 9 según su grado de importancia para el objetivo (se consideraron también valores enteros intermedios). De forma similar, los apartados con subcriterios fueron sometidos internamente a comparación pareada para obtener una calificación global a nivel de las alternativas.

Tabla 4. Escala de valoración de criterios y alternativas. Fuente: Baker *et al.* (2001).

Valoración	Descripción
1	Igual grado de importancia o preferencia
3	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Importancia fuerte o esencial de uno
7	Importancia muy fuerte o demostrada
9	Importancia extrema de uno sobre otro

- Evaluación de alternativas según cada criterio

Seguidamente se evaluaron el grupo de alternativas según cada subcriterio propuesto utilizando matrices de comparación pareada. Para aminorar la subjetividad de este paso, se buscó información que respalde la valorización del investigador. Como fuente principal se usó el artículo “Evaluación del ciclo de vida de muros de retención de tierra: una comparación ambiental” de Pons, Penadés-Plà, Yepes, y Martí (2018), pues, se acepta que las solicitaciones estructurales y por lo tanto dimensionamientos de este tipo de estructuras pueden asemejarse con pequeñas presas. Como mencionan los autores, la evaluación del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés *life cycle assessment*) permite evaluar el impacto causado tanto por el proceso constructivo de una estructura como por su estadía a lo largo de su vida. En este artículo se analizan cuatro tipos de muros de contención de los cuales 3 de ellos directamente son similares a las estructuras propuestas: muro de gravedad de concreto (*gravity wall*), muro de mampostería (*masonry wall*) y muro de gaviones (*gabion wall*). Adicionalmente, se consideraron las investigaciones de Liu, Ahn Changbum, An, y Lee (2013) y Van den Heede y De Belie (2012) respecto al LCA del concreto y la construcción de presas. Por otro lado, para analizar los trabajos con suelo-cemento tomamos como referencia la guía desarrollada por Richard y Hadley (2006) para su uso en aplicaciones sobre los recursos hídricos y el estudio presentado por Jia *et al.* (2016) sobre sus características y perspectivas constructivas en presas. En todos los casos en que se construyeron matrices de comparación se realizaron análisis de consistencia. Se comprobó que la relación de consistencia sea menor a 0.1, obteniéndose los vectores propios para cada subcriterio.

- Consolidación de matrices de evaluación

Finalmente, se consolida una única matriz de 5x8 con las valoraciones de cada alternativa según cada criterio. Ésta será multiplicada matricialmente por una matriz de 1x8 que contiene los pesos asignados a nivel de subcriterio. El resultado será la matriz de calificaciones globales para el objetivo esperado, jerarquizando con los mayores valores las mejores alternativas.

- Relación Beneficio / Coste

En base a los pre-dimensionamientos realizados en el apartado 5.4 para las alternativas propuestas, se estimaron los volúmenes de materiales a emplear. Con ello, de manera orientativa se presentan costes de construcción tomando como referencia los valores expuestos por CYPE-Ingenieros-SA y Richard y Hadley (2006). Los valores obtenidos son adimensionalizados para calcular las respectivas relaciones beneficios / coste.

5.7. ASPECTOS COMPLEMENTARIOS DE DISEÑO

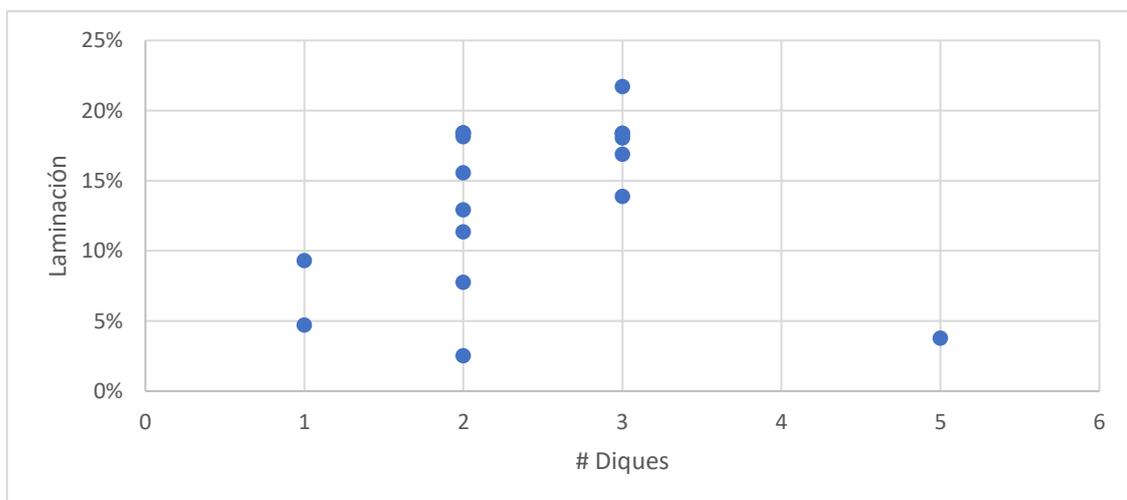
Tras haber revisado y analizado la alternativa constructiva de diques que se adecúa mejor al concepto de SbN, en esta etapa se desarrolla una propuesta integral respecto al conjunto “balsas en línea”. Es decir, se busca una propuesta coherente en todos los aspectos de la actuación: taludes, cauce de aguas bajas, cauce de inundación, revegetación, manejo y mantenimiento, entre otros. Para ello se revisan las guías de diseño, autoevaluación y soporte de decisiones propuestas tanto por la IUCN como por la Comisión Europea. En paralelo, se analiza visualmente la evolución temporal del ámbito de trabajo a partir de ortofotos históricas disponibles en el Centro de Descargas del CNIG (Centro-Nacional-de-Información-Geográfica). El objetivo es encontrar patrones naturales del cauce en la zona de estudio que se hayan perdido por la ampliación de la frontera agrícola, que aporten beneficios ambientales y que sean susceptibles de recuperar (taludes, llanuras de inundación, vegetación autóctona, etc.)

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1. UBICACIÓN, NÚMERO Y ALTURA DE LOS DIQUES

Partiendo de los criterios expuestos en la metodología, se probaron diversas configuraciones de balsas en función de la cantidad y ubicación de los diques. Como se observa en la Figura 9, los porcentajes más elevados de laminación se consiguen con la instalación de 3 diques transversales (incluyendo la estructura de cerramiento). Para un menor número de diques el volumen de detención total alcanzado aminora, pues, el desnivel entre el ingreso y la salida de cada recinto es mayor a la elevación disponible para el dique. Por otro lado, de forma general y teórica se comprueba que el incremento del número de diques aumenta el volumen potencial de detención; sin embargo, considerando que el cauce a intervenir tiene una geometría y pendientes variables (tanto en planta como en alzado), el aumento del número de diques, así como la consideración del volumen ocupado por cada una de las estructuras puede funcionar en detrimento del almacenamiento potencial, como se observa en este caso estudiado. Otros factores por tomar en cuenta son el diseño de los orificios de desagüe, que puede determinar casos en que la laminación disminuya al aumentar el número de diques; y el porcentaje de laminación que se gana al incrementar un dique más, pues, puede ser posible que el beneficio no sea superior al costo. Todas estas cuestiones hacen recomendar que se realice un estudio específico de cada caso en función de la geometría del cauce

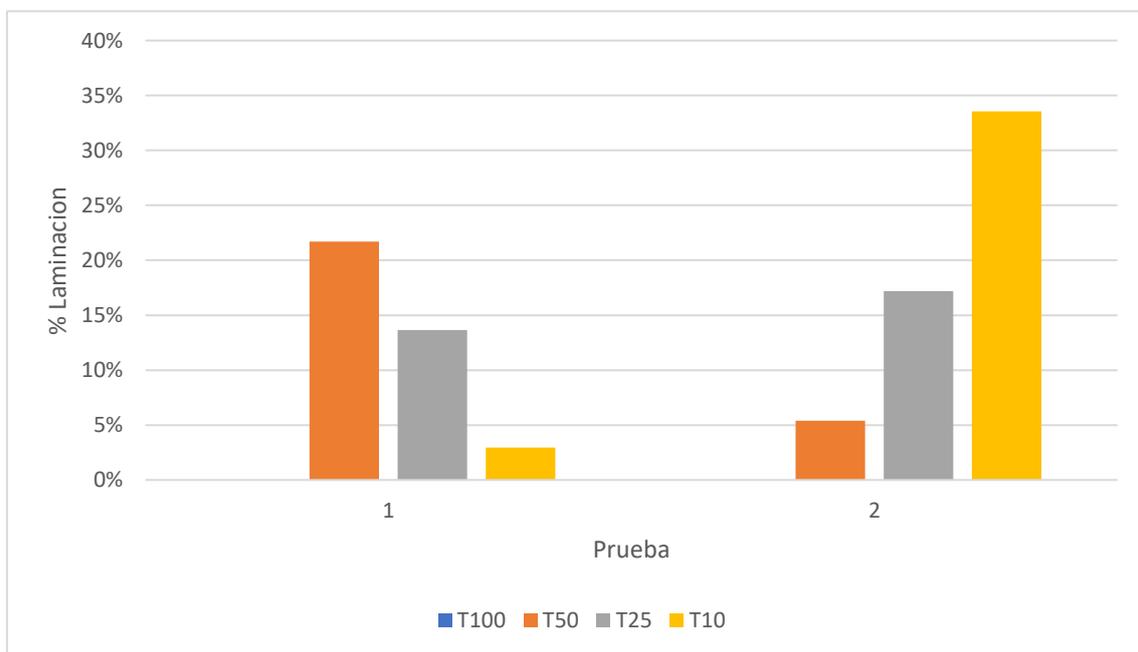
Figura 9. Porcentaje de laminación vs número de diques para distintas configuraciones. Fuente: elaboración propia.



Luego, manteniendo en 3 el número de balsas, se modificaron las características de los diques cambiando las alturas de sobrevertido y las características del desagüe inferior. Se analizó cómo varía la capacidad de laminación en función al periodo de retorno del hidrograma de diseño. Como se observa en la Figura 10, cuando se prioriza el diseño respecto al periodo de retorno de 50 años, la laminación para 10 años es inferior al 5%; ocurriendo lo contrario al invertir las prioridades. Ello sucede porque el conseguir laminación de bajos caudales implica que los desagües inferiores sean de menor tamaño, por consiguiente, frente a eventos de mayor envergadura se incrementa la rapidez de llenado de cada recinto. Entonces, para decidir con qué caudal de diseño continuar se revisa el contexto y las características en las que las balsas en línea trabajarán. Para el presente trabajo, éstas son parte de un proyecto de gestión a nivel de cuenca para la reducción de riesgos de desastres y donde se espera acercarse a los conceptos de SbN. Por lo tanto, considerando que las SbN pueden tener capacidades de mitigación limitadas pero que aportarán co-beneficios adicionales en comparación con las medidas “grises” clásicas (Dumitru y Wendling, 2021), se acepta continuar diseñando para TR:50 años.

Figura 10. Porcentajes de laminación para distintos periodos de retorno a lo largo de las pruebas.

Fuente: elaboración propia.



Tras las pruebas respectivas, se optó por la siguiente configuración:

- Número de Balsas: 03, cada una definida por 01 dique.
- Características hidráulicas de dique: En todos los casos, en caso de generarse sobre vertido, sucedería por todo el largo posible de la estructura para aminorar el caudal específico y la consiguiente capacidad erosiva del agua. El ancho de coronación en el modelo ha sido considerado en 10 m para todos los casos para asumir detalles constructivos posteriores.

Tabla 5. Dimensiones hidráulicas de diques. Fuente: elaboración propia.

Dique	Coronación		Desagüe		
	Cota (msnm)	Altura (m)	Área Total (m2)	Ancho (m)	Alto (m)
D1	100.50	4.50	10.00	10.00	1.00
D2	97.50	4.00	12.00	12.00	1.00
D3	96.00	3.50	12.00	12.00	1.00

Se consiguieron los siguientes porcentajes de laminación para diferentes periodos de retorno:

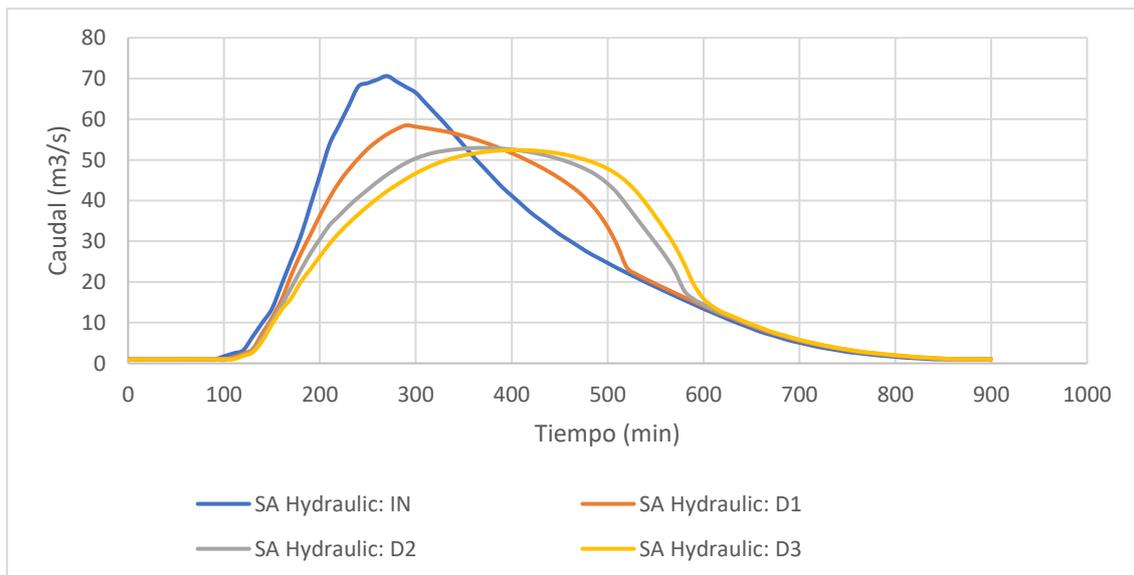
Tabla 6. Efecto de laminación de caudales y retardo al caudal pico para cada escenario. Fuente: elaboración propia.

Periodo de Retorno	(años)	10	25	50	100
Laminación	(%)	2	13	26	15
Retardo	(min)	30	110	140	70

Como se observa en la Figura 11 para TR:50 años se consigue una disminución gradual del caudal de ingreso a medida que va copando cada recinto⁵. Se ha identificado que la laminación más importante ocurre cuando el agua pasa a través de los orificios, mientras que, cuando existe sobrevertido, el comportamiento tipo vertedero replica el crecimiento rápido hacia el caudal máximo. Adicionalmente, se considera la influencia de las características del desagüe:

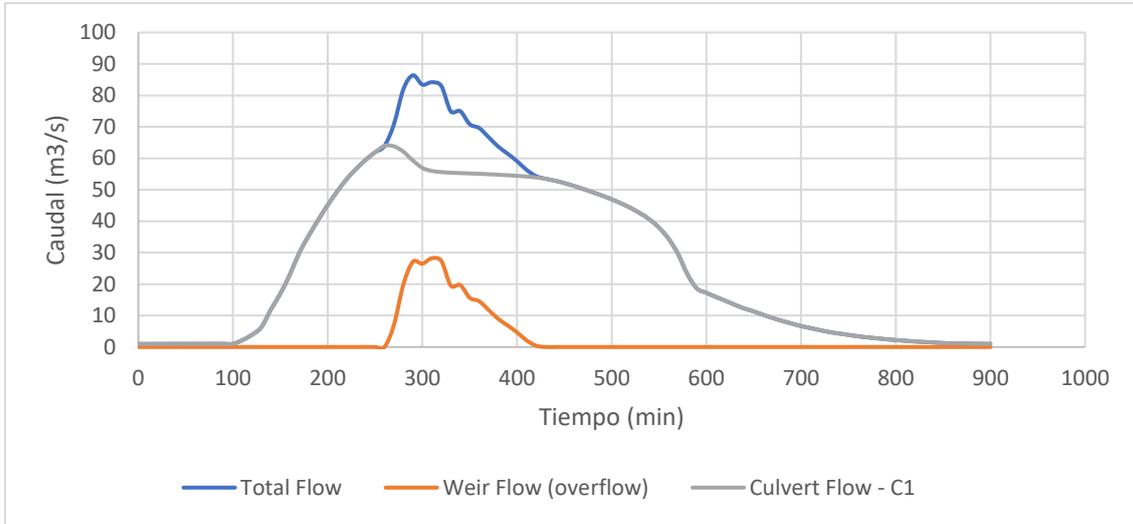
- Para una misma altura, mayores anchos generan más área de drenaje, y por consiguiente la desaceleración del volumen ingresante inicia con caudales más cercanos al máximo. Por el contrario, si el ancho se contrae en exceso, la balsa pierde rápidamente su capacidad de almacenamiento.
- Para un mismo ancho, se consigue mejor laminación sin incrementar en demasía la altura del desagüe y permitiendo que éste se comporte como orificio. Esto se explica debido a que la dependencia del caudal respecto a la carga de agua para el vertedero es potencia de 3/2, mientras que para el orificio es 1/2.
- Para una misma sección transversal, a medida que el orificio va incrementando su cota de instalación tendrá menor capacidad de desagüe, pues, la diferencia de altura de agua sobre él será siempre menor. Por lo tanto, ello acelera que la balsa colme su volumen de detención y se generen sobrevertidos.

Figura 11. Hidrogramas de funcionamiento de balsas en línea para TR: 50 años. Fuente: elaboración propia.



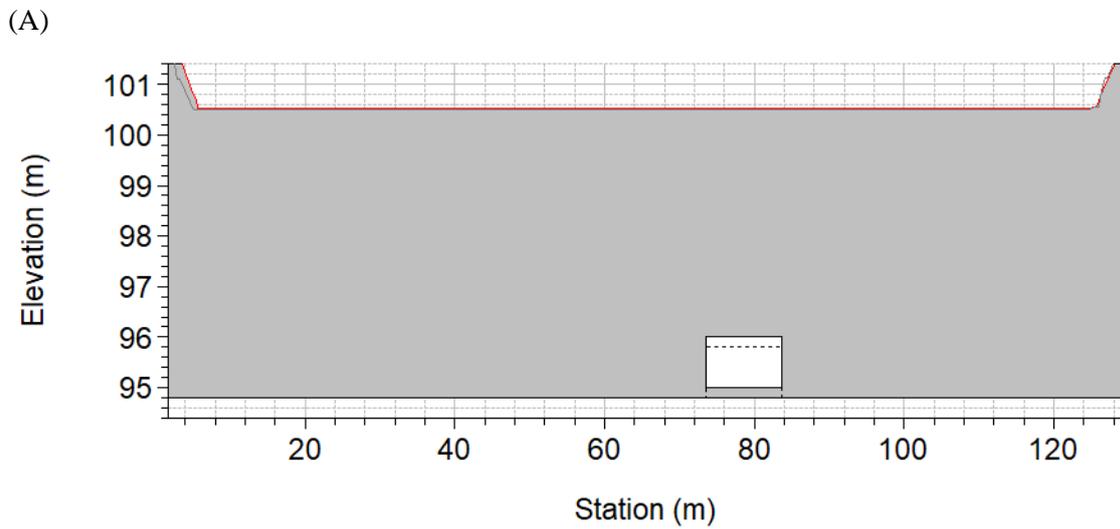
⁵ Anexo 01: hidrogramas de funcionamiento de diques para diferentes periodos de retorno

Figura 12. Hidrogramas de operación de Dique D1 para balsas en línea (TR: 100 años). Fuente: elaboración propia.

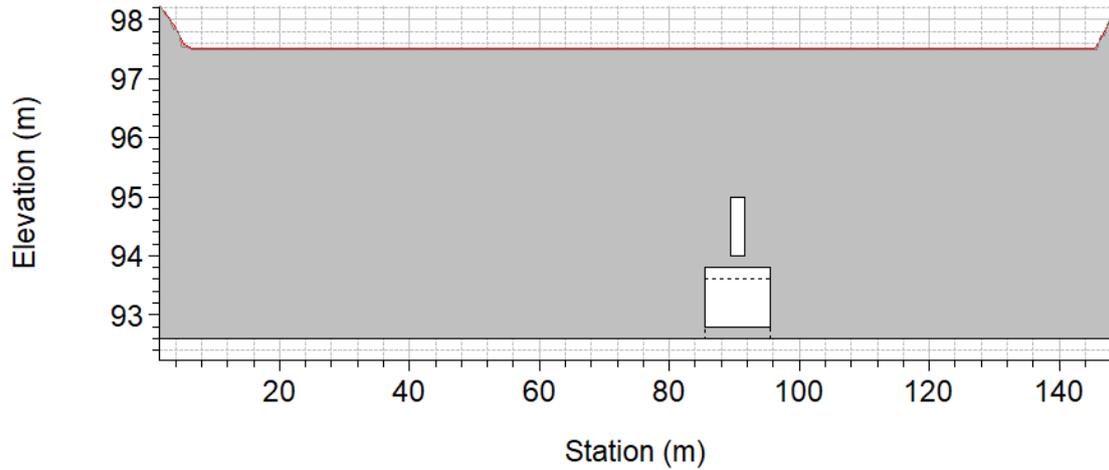


Por lo tanto, se muestran a continuación las secciones transversales de los tres diques propuestos.

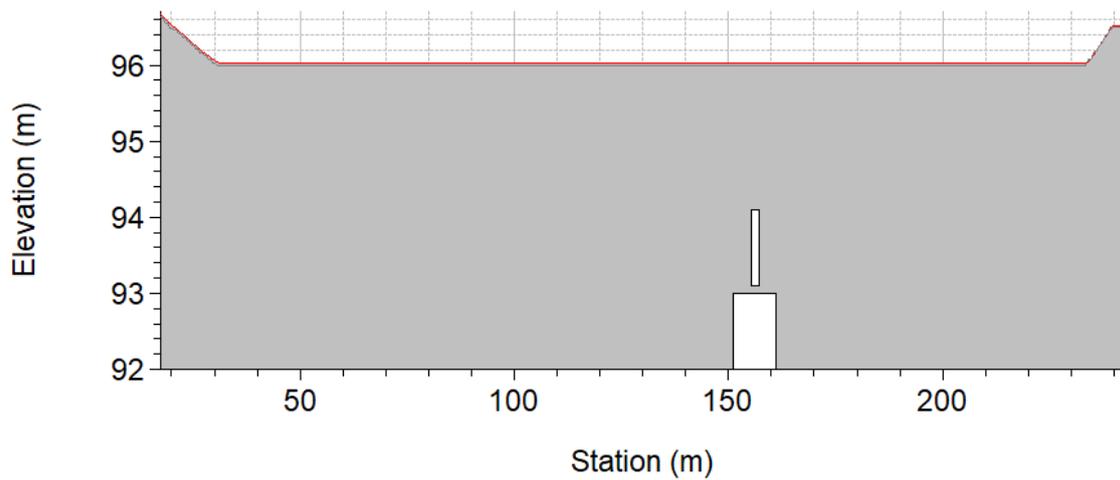
Figura 13. Secciones transversales (A) Dique 1; (B) Dique 2; (C) Dique 3. Fuente: elaboración propia.



(B)



(C)



Se realizó la evaluación del modelo considerando hidrogramas generados a partir de datos pluviométricos registrados durante tres eventos que acaecieron en los últimos 5 años. Los resultados de la Tabla 7 nos muestran que para estos casos no se hubieran conseguido porcentajes importantes de laminación del caudal máximo. Ello se debe a la forma en la que suceden los eventos: un incremento más gradual y sostenido del caudal va ocupando los volúmenes de las balsas, aminorando su capacidad de detención frente a crecidas rápidas de caudal.

Tabla 7. Efecto de laminación de caudales y retardo al caudal pico para cada escenario. Fuente: elaboración propia.

Evento	[fecha]	Diciembre 16	Septiembre 19	Marzo 2020
Laminación	(%)	3	1	0
Retardo	(min)	280	20	10

Se muestran imágenes del modelo generado en HEC-RAS para el desarrollo hidráulico.

Figura 14. Información geométrica para simulación hidráulica 2D con base en MDE. Fuente: elaboración propia.

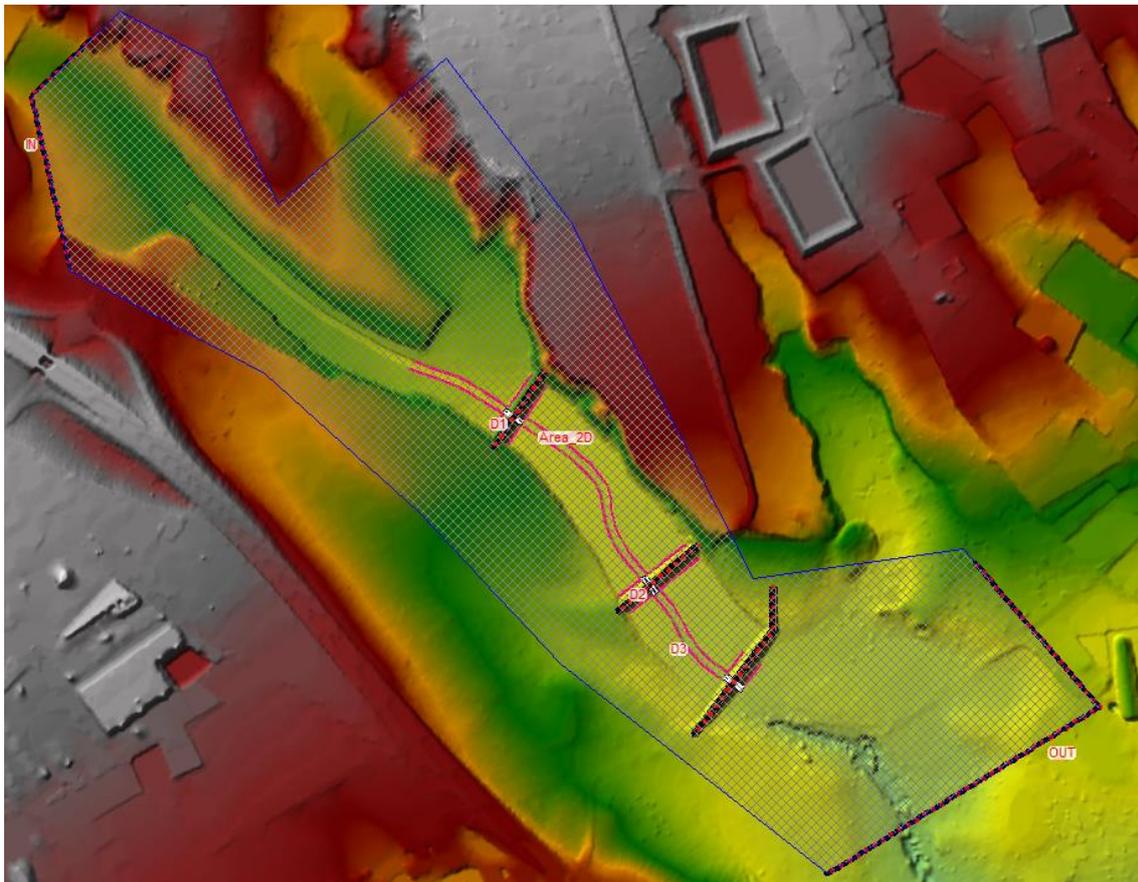
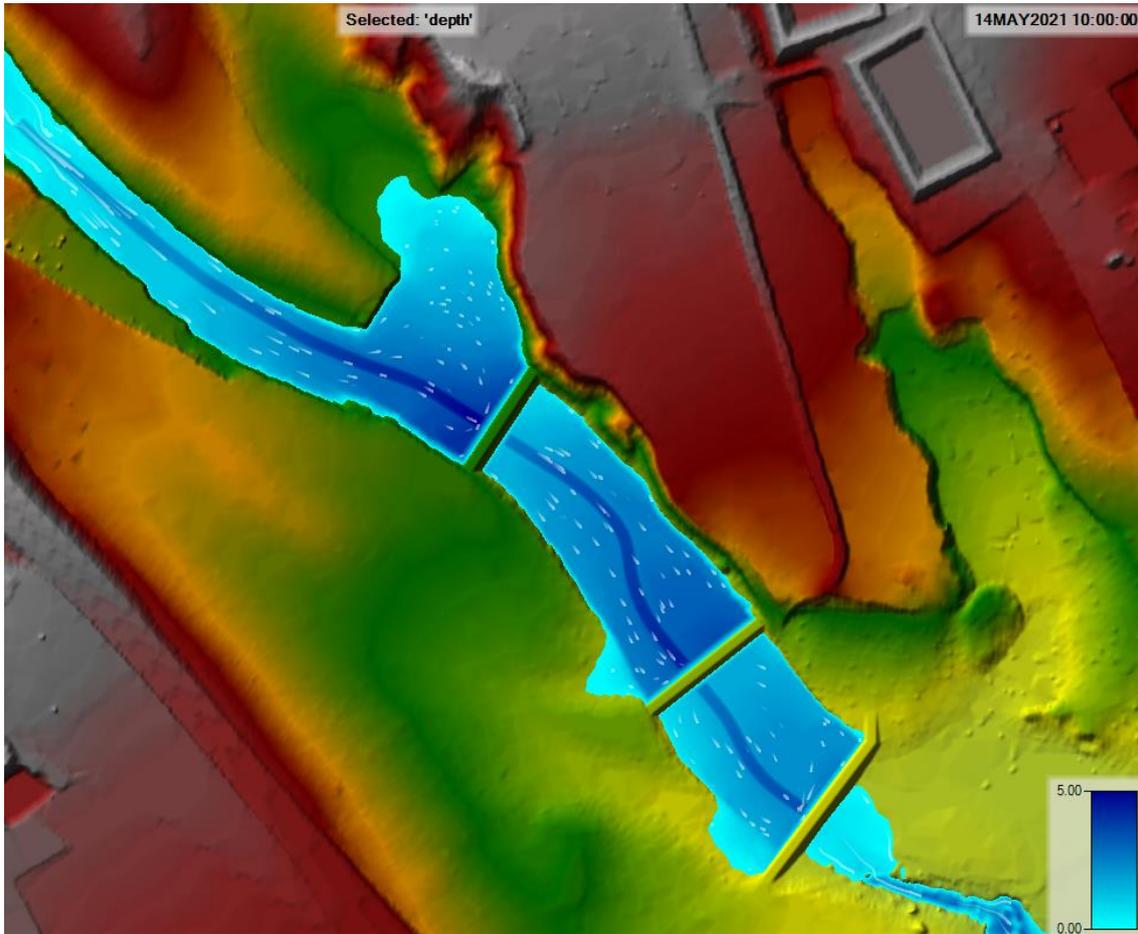


Figura 15. Profundidad de agua para simulación con periodo de retorno de 50 años. Time step 10:00 horas de iniciada la simulación. Fuente: elaboración propia.

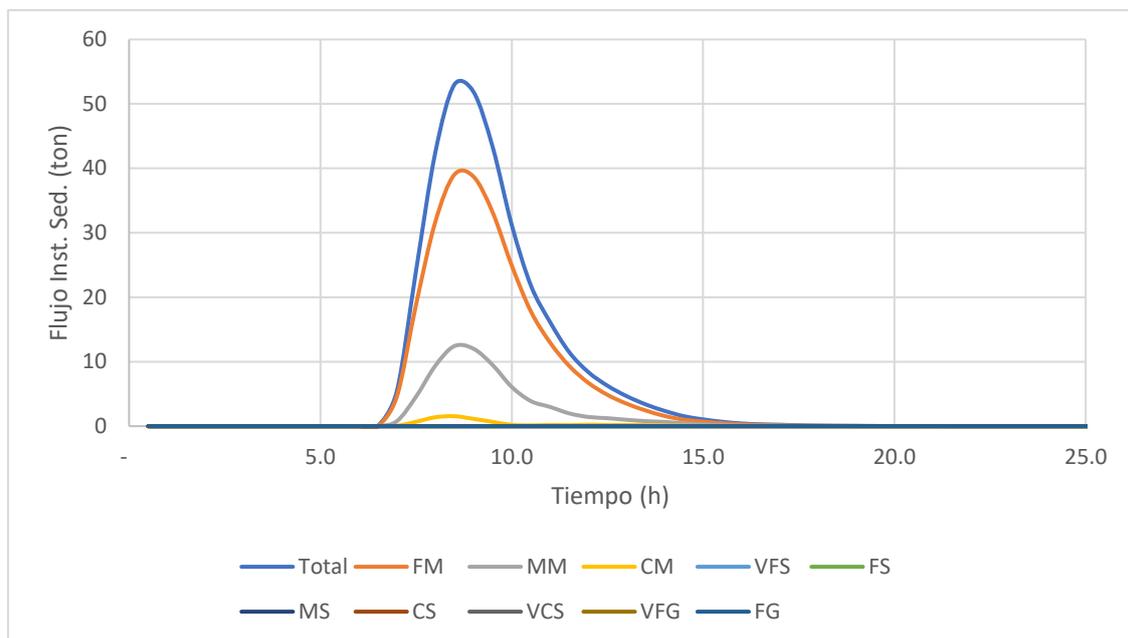


6.2. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Se empleó la metodología de Meyer – Peter & Muller (MPM) para calcular el transporte de fondo, pues, la granulometría del cauce mostraba que el porcentaje de finos era menor al 5% (Marco *et al.*, 2016) y dicha metodología estima adecuadamente el transporte de fondo. Sin embargo, tras la corrida del modelo, se observó que el principal volumen de sedimentos transportados se encuentra en material fino (Figura 16). Ello se debe principalmente a que las condiciones de contorno para sedimentos han considerado el potencial flujo aportante proveniente de la cuenca vinculada. La composición de dicho material en conjunto ingresa un gran porcentaje de finos por su origen en la escorrentía superficial. Ante esta situación, no se optó por realizar un análisis más a detalle para identificar una metodología que no subestime el transporte de fondo en suspensión, pues, el objetivo de este apartado antes que ser cuantitativo, busca comparar resultados entre dos escenarios.

Figura 16. Flujo instantáneo de sedimentos (ton) total y separado por tamaño de partículas - MPM.

Fuente: elaboración propia.

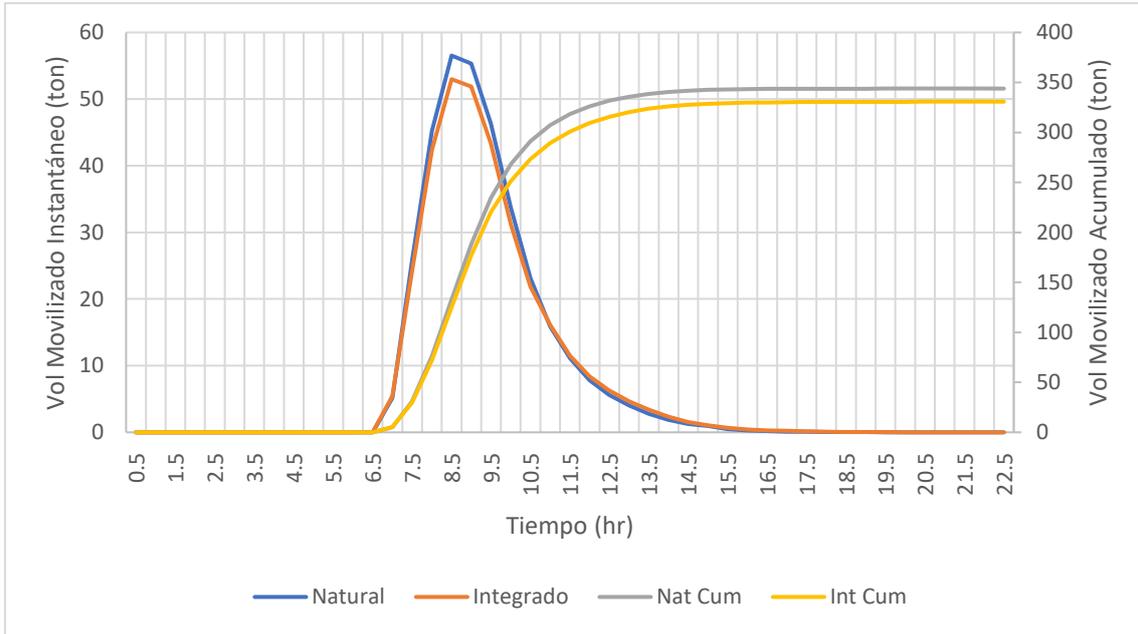


FM	MM	CM	VFS	FS	MS	CS	VCS	VFG	FG
Limo fino	Limo medio	Limo grueso	Arena muy fina	Arena fina	Arena media	Arena gruesa	Arena muy gruesa	Grava muy fina	Grava fina
0.011 mm	0.023 mm	0.045 mm	0.088 mm	0.177 mm	0.354 mm	0.707 mm	1.41 mm	2.83 mm	5.66 mm

El análisis comparativo entre los volúmenes de sedimentos en la desembocadura del modelo para la situación actual y el escenario posterior a la construcción de las balsas en línea determinó una disminución volumétrica de 4%. Como se observa en la Figura 17, dicho efecto es más notorio a medida que el caudal líquido transportado incrementa, por lo que, posterior al valor máximo, no se aprecia mayor variación entre los escenarios.

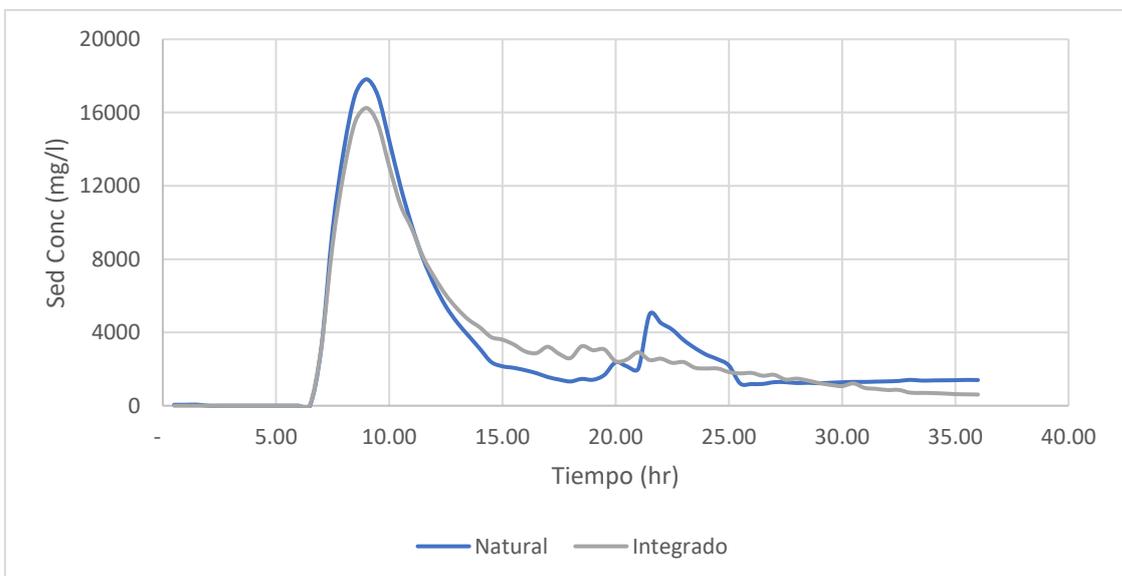
Este resultado no es notoriamente significativo en cuanto a retención volumétrica se refiere. Hay dos aspectos a tomar en cuenta: el diseño de los diques y las condiciones de simulación. En primer lugar, el diseño con desagües en la parte más baja del cauce no está optimizado para la retención de sedimentos, pues, no se ha considerado una zona muerta que permita tiempos de residencia hidráulicos que favorezcan la sedimentación y retención de sedimentos. En segundo lugar, la simulación en HEC-RAS no ha considerado condiciones de modelización en embalses, con lo que se abre la posibilidad de usar las opciones para análisis de sedimentación en embalses, incluyendo el análisis transitorio, lo que permitiría simular a la vez las características hidrodinámicas y de transporte de sedimentos (situación que no puede representarse con el flujo cuasi-estacionario).

Figura 17. Comparativa de volúmenes instantáneos movilizados en cada periodo de tiempo y volúmenes acumulados para el escenario natural y el modificado (integral) – MPM. Fuente: elaboración propia.



En la Figura 18 se muestra la concentración de sedimentos en la desembocadura del modelo. Comparativamente entre la situación actual y la modificada se percibe una disminución del 9% en la concentración alcanzada para el caudal máximo del evento. Para el escenario actual se estiman valores alrededor de 17.8 g/l, mientras que para el modificado 16.2 g/l; ambos por debajo de los 90 g/l que referencialmente definirían un comportamiento como flujos de lodos, según la bibliografía recopilada por Castillo Navarro (2006).

Figura 18. Sedimentograma comparativo del cauce natural (situación actual) y posterior a la implementación de la propuesta de balsas en línea (integrado) - MPM. Fuente: elaboración propia.

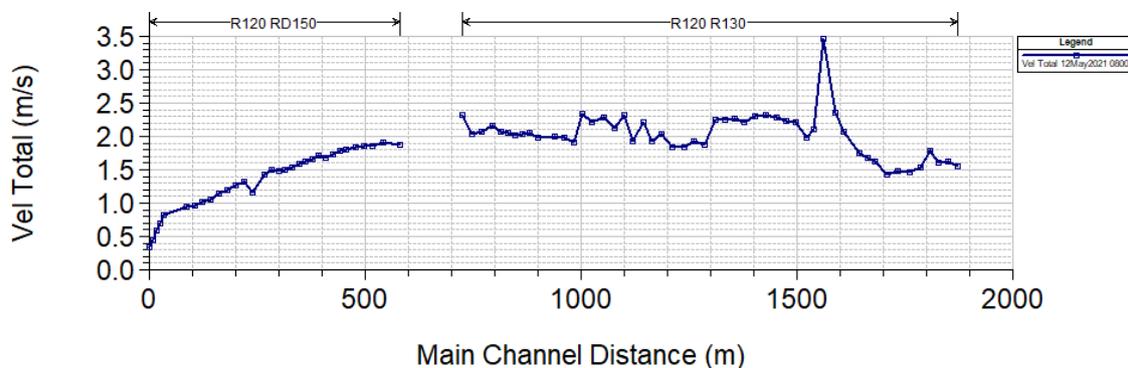


A partir de las observaciones anteriormente planteadas, se configuró el modelo en HEC RAS para una segunda fase de simulaciones utilizando la ecuación de transporte de Laursen – Copeland (LC), pues, al ser una función de carga total de sedimentos, permite cuantificar en mejor medida el transporte de partículas en el rango de arenas muy finas y limos muy gruesos (Brunner, 2016), lo que concuerda con el caso de estudio. Adicionalmente, se activó la opción para limitar el transporte de partículas en función de la velocidad del agua, mejorando así la consideración de los tiempos de retención hidráulica; y se habilitó la opción de actualizar la composición granulométrica del lecho activo para cada incremento computacional de cálculo. Con esto, se mejoraron los cálculos realizados con la ecuación de continuidad de Exner. Cabe precisar que no se incluyó el análisis transitorio con flujo no estacionario por las inestabilidades generadas durante la combinación de este con el de transporte de sedimentos.

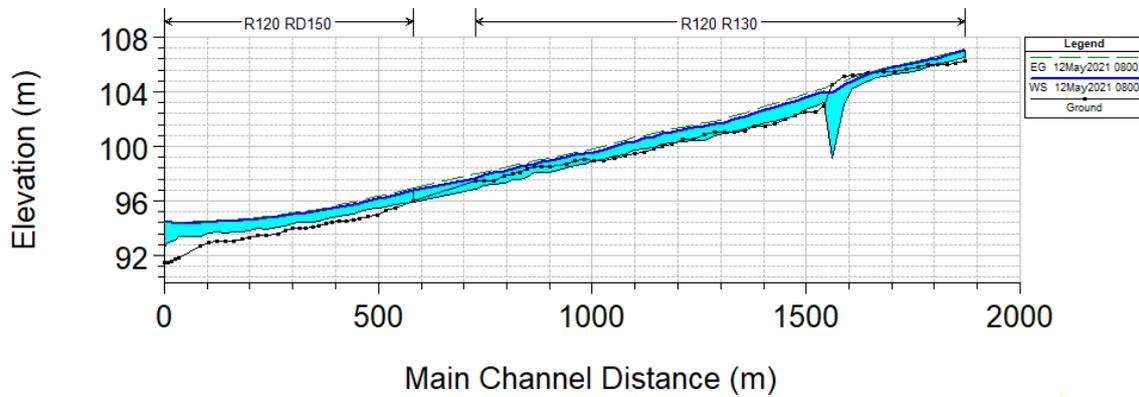
Como resultado, se observó un incremento en el volumen de sedimentos transportados y depositados. Como se muestra en la Figura 19, para el escenario actual (sin modificaciones), al transitar el máximo caudal del hidrograma de 100 años de periodo de retorno, las velocidades de flujo en la zona de las balsas son – en promedio – de 2 m/s. Esto genera un arrastre y acumulación de sólidos hacia la parte final del tramo, con lo cual, al finalizar el evento simulado se observa un cambio de pendiente más suavizado hacia la progresiva 0 m.

Figura 19. Perfil de velocidades y elevación de la lámina de agua para escenario natural en zona de balsas -LC. Fuente: elaboración propia.

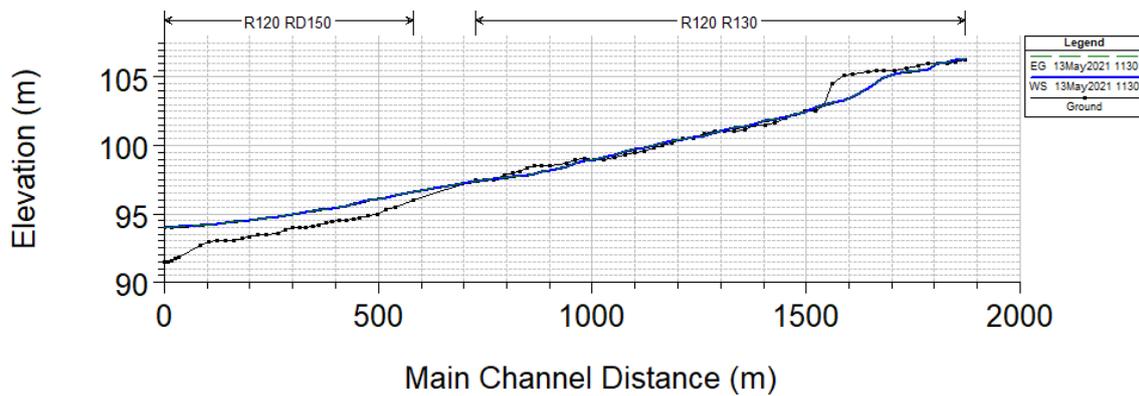
(A) Perfil de velocidades a las 08 horas de simulación, correspondiente al caudal máximo (TR:100 años).



(B) Perfil de elevación de lámina de agua a las 08 horas de simulación, correspondiente al caudal máximo (TR:100 años).

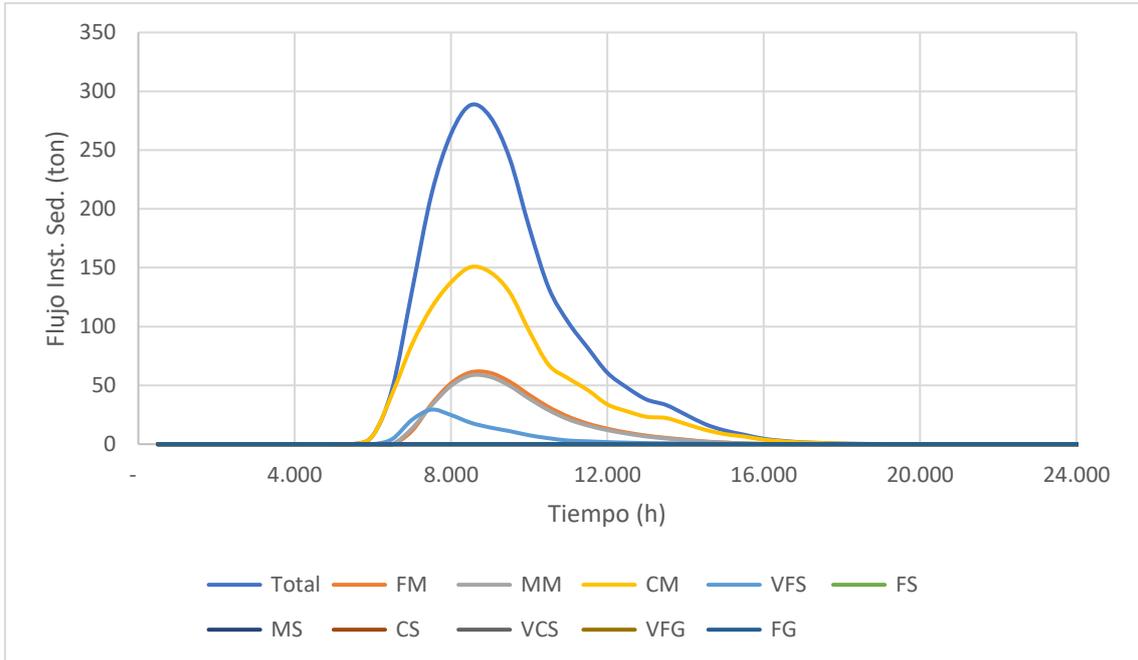


(C) Perfil de elevación de superficie de fondo al final de la simulación.



Al analizar la composición del flujo de sedimentos a la salida del volumen de control (Figura 20) corroboramos que durante todo el tiempo de simulación predomina la presencia de limos (CM: limo grueso; MM: limo medio), seguido de material fino (FM) y arenas muy finas (VFS). Ello guarda una mejor concordancia con las características de los sólidos ingresados por las cuencas aportantes.

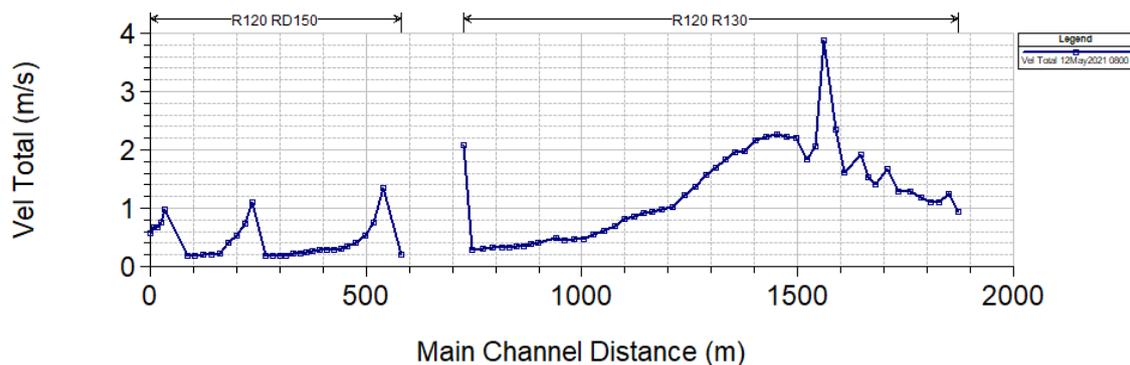
Figura 20. Flujo instantáneo de sedimentos (ton) total y separado por tamaño de partículas, escenario natura - LCI. Fuente: elaboración propia.



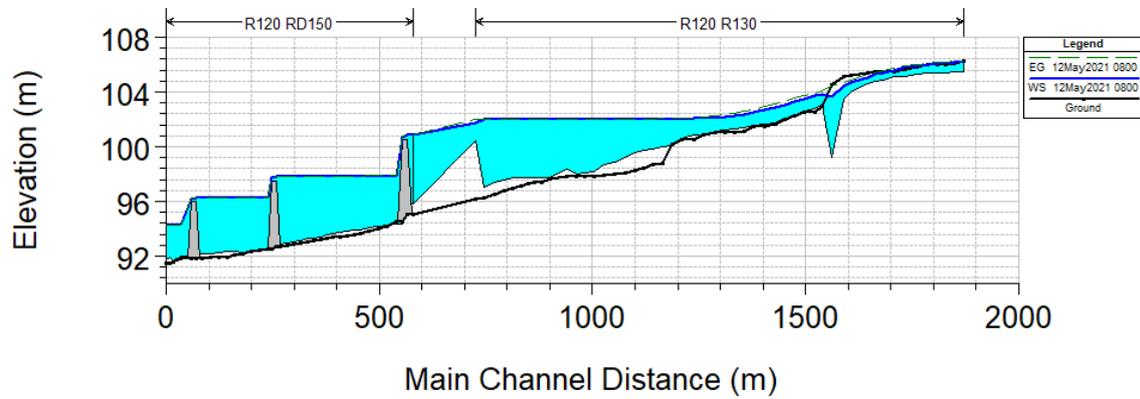
Por otro lado, para el escenario posterior a la construcción de las balsas en línea, la presencia de los diques de detención genera un efecto “freno” sobre las velocidades del agua, y, por consiguiente, de los sólidos. Esto se ve reflejado en la Figura 21, donde se observa cómo la disminución gradual de la velocidad guarda paralelismo con la presencia de los diques en el perfil longitudinal. Como consecuencia, la mayor retención de sedimentos se traslada a la primera balsa, definiendo una zona de acumulación en la estela de detención del primer dique (progresivas 600 a 1500 m).

Figura 21. Perfil de velocidades y elevación de la lámina de agua para escenario modificado en zona de balsas - LC. Fuente: elaboración propia.

(A) Perfil de velocidades a las 08 horas de simulación, correspondiente al caudal máximo (TR:100 años).



(B) Perfil de elevación de lámina de agua a las 08 horas de simulación, correspondiente al caudal máximo (TR:100 años).



(C) Perfil de elevación de superficie de fondo al final de la simulación.

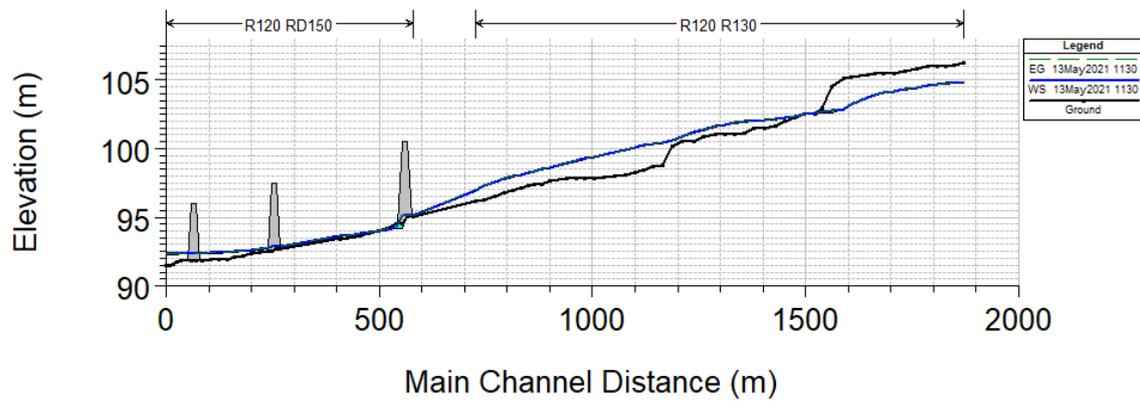
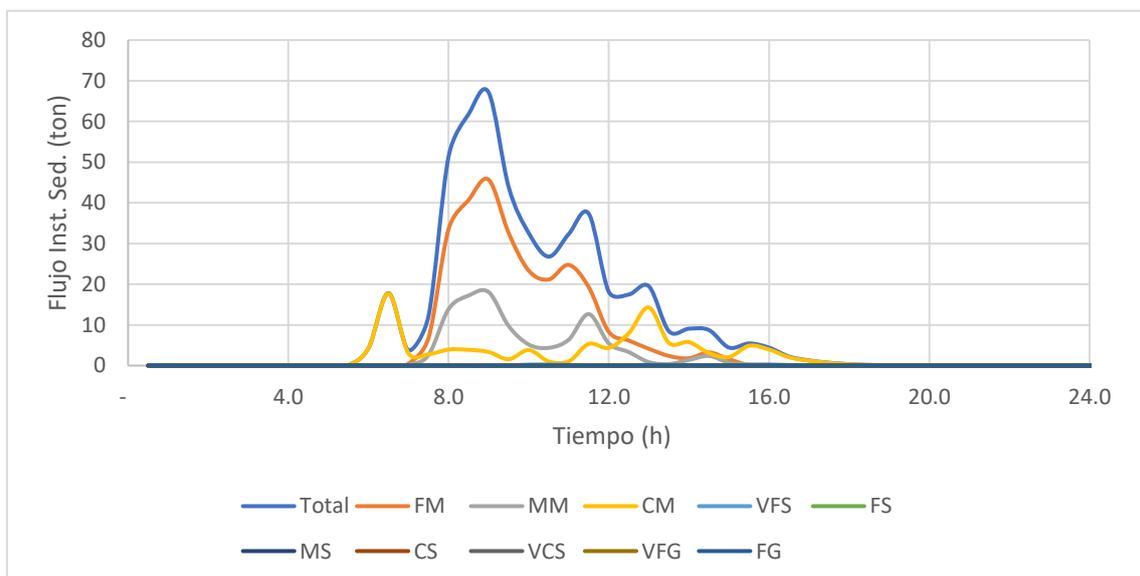


Figura 22. Flujo instantáneo de sedimentos (ton) total y separado por tamaño de partículas, escenario modificado - LC. Fuente: elaboración propia.



Se generó una comparativa volumétrica entre los sedimentos que fluyen fuera de la sección de control para ambos escenarios simulados con el método Laursen – Copeland (Figura 23). A diferencia de lo analizado con MPM, esta vez se observa un porcentaje de retención alrededor del 78%. Como se muestra en la Tabla 8, las partículas que marcan la diferencia en el volumen sedimentado entre ambos escenarios son principalmente arena muy fina y limo grueso.

Figura 23. Sedimentograma comparativo del cauce natural (situación actual) y posterior a la implementación de la propuesta integral de balsas en línea (integrado) - LC. Fuente: elaboración propia.

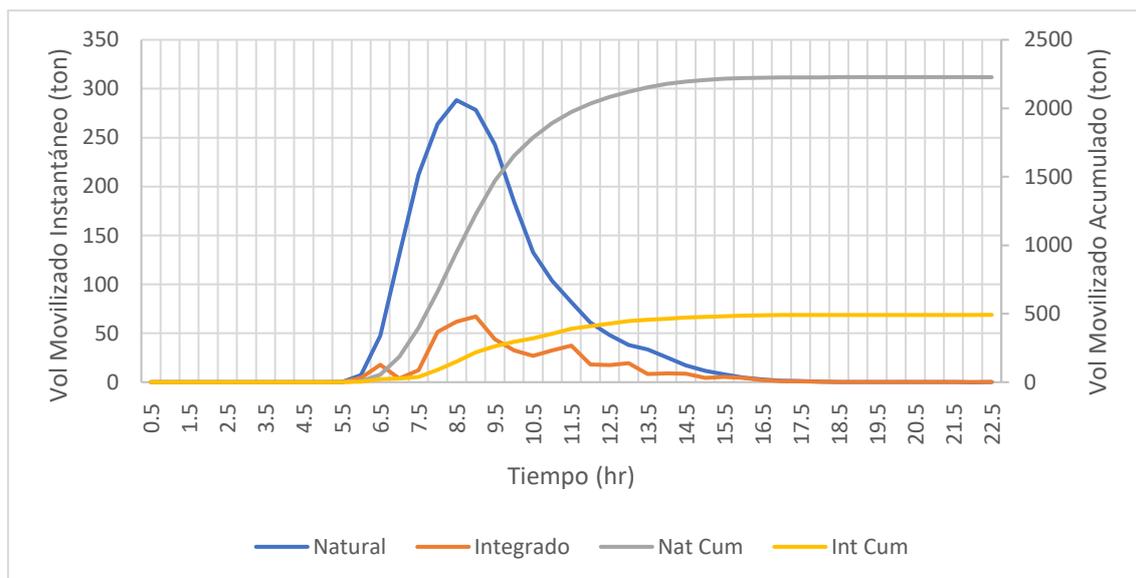


Tabla 8. Porcentajes de retención de sedimentos tras simulación con método Laursen – Copeland. Fuente: elaboración propia.

Total	Material fino	Limo medio	Limo grueso	Arena muy fina
78%	36%	74%	91%	98%

En este punto, cabe hacer hincapié en que los resultados obtenidos con el software HEC-RAS para los escenarios de simulación (actual sin cambios y un supuesto posterior a la implementación de las balsas) no han sido validados con observaciones en campo y dependen de los parámetros usados y descritos en el documento.

Finalmente, de realizarse un estudio posterior se recomienda analizar detalladamente la influencia que la vegetación pueda tener durante sus diferentes estados fenológicos y el manejo que se tenga en cuanto al área que ocupe. Pues, ésta puede generar concentración del flujo en la zona central

del cauce, disminución de erosión lateral, disminución de velocidades sobre y entre las plantas y concentración de flujos en zonas no vegetadas (Vargas-Luna, Benifei, Solari, van Oorschot, y Geerling, 2015); por lo tanto, un análisis morfodinámico más a detalle sería necesario. Adicionalmente, cabe indicar que la retención de sedimentos en estas zonas debe concebir un plan de gestión de los mismos, pues, como DPH, sólo se permitiría la acumulación de sólidos de forma temporal como consecuencia de arrastres torrenciales (MITECO, 2019).

6.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

- **Jerarquización de criterios**

Desarrollado la metodología expuesta se consigue la ponderación de pesos de la Tabla 9. Se observa que el criterio con mayor influencia es la evaluación de huella de carbono (23 %), seguido de la conectividad ecosistémica (18.6 %). Esto guarda relación con los objetivos de las SbN: beneficios y co-beneficios ambientales y bienestar social. Seguidamente en orden de importancia se consideró la percepción ambiental, la remoción del carbono en el medio, la gestión de residuos y la integración paisajística. Los aspectos menos valorados son la gestión de residuos al final del tiempo de vida de la estructura y la adaptabilidad como mejora a nuevos escenarios durante el tiempo útil de la estructura.

Tabla 9. Pesos de Ponderación por subcriterios. Fuente: elaboración propia.

Subcriterios	Abreviatura	Pesos
Carbono removido/almacenado	RC-cr	12.4%
Huella de carbono	RC-hc	23.0%
Adaptabilidad	GA-a	5.5%
Integración Paisajística	DE-ip	10.2%
Conectividad Ecosistémica	GnB-ce	18.6%
GR Ejecución	GnB-gre	10.2%
GR Funcionamiento	GnB-grf	5.6%
Percepción ambiental	RM-pa	14.5%

- **Evaluación de alternativas para cada subcriterio**

Tras realizar comparaciones pareadas según cada subcriterio entre las alternativas constructivas propuestas para los diques, se consolidaron las valoraciones en una matriz de 5 x 8 tal como se muestra a continuación.

Tabla 10. Valoraciones de las alternativas constructivas propuestas según subcriterios. Fuente elaboración propia.

	RC-cr	RC-hc	GA-a	DE-ip	GnB-ce	GnB-gre	GnB-grf	RM-pa
Gv	0.05	0.29	0.42	0.18	0.23	0.39	0.38	0.16
Gv+T	0.56	0.45	0.31	0.44	0.56	0.29	0.36	0.47
CCo	0.21	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
CC	0.08	0.06	0.07	0.04	0.04	0.09	0.10	0.07
SC	0.09	0.16	0.16	0.28	0.13	0.19	0.12	0.26

- **Matriz de calificación final**

El producto matricial de los pesos ponderados otorgados a cada subcriterio y las valoraciones por comparación pareada para cada alternativa nos permiten obtener una calificación global. Como se observa en la Tabla 11, en líneas generales el análisis muestra que las propuestas con uso de concreto como principal insumo obtienen valoraciones bajas cuando se analizan temas ambientales. Esto guarda relación con lo concluido por Pons *et al.* (2018) respecto a que para este tipo de obras, las estructuras de concreto producen mayor impacto que sus contrapartes de enrocado. Si bien la actuación con gaviones destaca en líneas generales frente a sus contrapartes, nótese que la inclusión del talud revegetado aguas arriba le otorga mejora en la valorización por aportar beneficios en tema de captura de carbono, por la acción de fijación de carbono por las plantas; integración paisajística, al minimizar zonas desnudas e impermeables; conectividad ecosistémica, al minimizar el efecto de interrupción del entorno por la construcción del dique y permitiendo la integración al ecosistema de mayor área; y percepción ambiental, considerando el impacto visual y la percepción de los *stakeholders* sobre la medida en su conjunto.

Es importante resaltar que la alternativa de gaviones y la de suelo-cemento (SC) no tienen valoraciones muy diferenciadas en comparación con la alternativa 2 y 3. Ello se explica porque el SC considera la utilización de material local (sujeto a evaluación constructiva) como materia prima, lo que aminoraría los impactos de movilización de materiales y compatibilizaría visualmente el paisaje con la estructura. Entonces, a pesar de que la presencia de cemento continuaría siendo el principal factor disruptivo, podría evaluarse la posibilidad de combinar el SC con un talud revegetado aguas arriba (previa impermeabilización con geomembrana).

Tabla 11. Valoraciones globales para las alternativas propuestas. Fuente: elaboración propia.

Alternativa	Abrv.	Calificación
Gaviones	Gv	0.24
Gaviones + Tierra	Gv+T	0.46
Concreto Convencional	CCo	0.06
Concreto Ciclópeo	CC	0.07
Suelo - Cemento	SC	0.17

- **Relación Beneficio – Coste**

Siguiendo las características descritas en el apartado 5.4 se determinó que los costes constructivos de las alternativas propuestas no tienen una variación muy marcada, ello se debe principalmente a que los volúmenes requeridos son distintos y ello compensa las diferencias de costos. Sin embargo, destaca la alternativa 3 de diques de gravedad con concreto convencional como las de mayor coste constructivo. Le sigue la actuación con suelo – cemento, donde los grandes volúmenes generados por taludes más horizontales tienen mayor influencia; a continuación, estarían las actuaciones que implican conseguir aporte de bolos y piedras de tamaño medio, las cuales pueden tener disponibilidad limitada en el entorno. Así, al calcular la relación entre la calificación de los beneficios con enfoque de SbN y los Costes constructivos, se observa que se mantiene la tendencia de priorización: diques de gaviones con talud revegetado aguas arriba seguido de la alternativa sólo de gaviones y el uso de suelo cemento, ambas con calificaciones cercanas. Se hace hincapié en que los costos obtenidos son referenciales, por lo tanto, están sujetos a revisión y actualización durante el proceso de diseño a detalle de las estructuras.

Tabla 12. Relación Beneficio / Costo para las alternativas propuestas. Fuente: elaboración propia.

Alternativa	Beneficios Adimensional	Costo Adimensional	B/C
Gaviones	0.24	0.81	0.30
Gaviones + Tierra	0.46	0.83	0.55
Concreto Convencional	0.06	1.00	0.06
Concreto Ciclópeo	0.07	0.78	0.09
Suelo - Cemento	0.17	0.88	0.20

6.4. SOLUCIÓN PROPUESTA

La restauración sobre cauces efímeros impactados por la actividad antrópica debe mejorar y recuperar no solo los vínculos hidrológicos e hidráulicos, sino que también debe velar por la conectividad ecosistémica (hábitats y flujo de sedimentos entre el lecho y la zona ribereña adyacente). Ello a su vez beneficiaría significativamente la capacidad de remoción de nutrientes / contaminantes y la mitigación de riesgos ligados a precipitaciones extremas y actividades humanas (Magand *et al.*, 2020). Así, en el presente estudio se propone no sólo integrar los análisis hidráulicos previamente expuestos, sino que, a su vez, se incluyen recomendaciones para que la propuesta tenga una visión holística del entorno considerando los enfoques de servicios ecosistémicos y soluciones basadas en la naturaleza.

- **Área destinada**

Tras comparar los calados generados durante el tránsito de un hidrograma sintético de 50 años de periodo de retorno para el escenario actual y posterior a la implementación de las balsas, se determinó que la intervención ocupará el área originalmente planteada y el cauce tributario derecho. La zona adicionada conforma un corredor que, además de incrementar la capacidad de detención de la primera balsa, funcionará como una transición desde el entorno agrícola hacia las balsas.

- **Canal de aguas bajas**

Las ortofotos disponibles para la zona con más antigüedad son, a la fecha del estudio, aquellas tomadas por la misión norteamericana posterior a la segunda guerra mundial, entre los años 1945 y 1956. En ellas se identificó un cauce con mínima modificación antrópica; con un patrón de baja sinuosidad, pero no recto; y con un ancho promedio aproximado de 10 metros. En las zonas inmediatas al cauce, lo que correspondería a las llanuras de inundación, se observan terrenos de uso agrícola. Estos campos mantienen y se adecúan al relieve de la zona sin interrumpir el paso preferente (en la mayoría de su recorrido), y sin generar fuertes desniveles entre terrazas que limiten el área de inundación potencial. Haciendo un seguimiento temporal de la zona, se identifica que a partir del periodo 1981 – 1988 el área es nivelada por completo eliminándose el cauce preferente, instalándose cultivos con hileras a favor de la máxima pendiente y limitando el margen derecho de la llanura de inundación.

Adicionalmente, como refieren Lake, Bond, y Reich (2017), las labores de restauración ecológica en ríos intermitentes y cauces efímeros (RICE, o *IREs* por su traducción del inglés “*intermittent rivers and ephemeral streams*”) deben considerar actuaciones para condiciones de época húmeda como seca, siendo normalmente las de escala local destinadas a la adecuación de estructuras para mantener y mejorar los hábitats del período seco. Por lo tanto, se prevén acciones de revegetación manteniendo el patrón natural de los espacios adyacentes al cauce.

Para determinar el patrón de sección transversal se tomaron como referencias las ortofotos previas a 1981 y actuales de la plataforma Google Earth tanto para la zona de estudio como de las ramblas cercanas, y la guía para RICE de Magand *et al.* (2020). Se propone la recuperación de un cauce preferente para aguas bajas con una sección trapezoidal de base 10 m y profundidad de 1 m con taludes laterales 2:1. Para las zonas inundables (dentro de las zonas de balsas) se propone mantener el terreno natural con vegetación que se adapte a las condiciones. Hidráulicamente, se estima que por el cauce preferente discurriría un caudal aproximado de 15 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno de 2 años. Sin embargo, ello estará sujeto al equilibrio que se alcance con los procesos de transporte de sedimentos sujetos a los periodos de flujo. En todo caso, para evitar incisiones en el terreno aguas debajo de los drenajes inferiores de cada dique, se debe considerar una protección del lecho con gaviones o escollera.

Figura 24. Ortofotos de la zona de balsas. (A) Vuelo 1956-57. (B) Actualizado 2020. Fuente: elaboración propia.

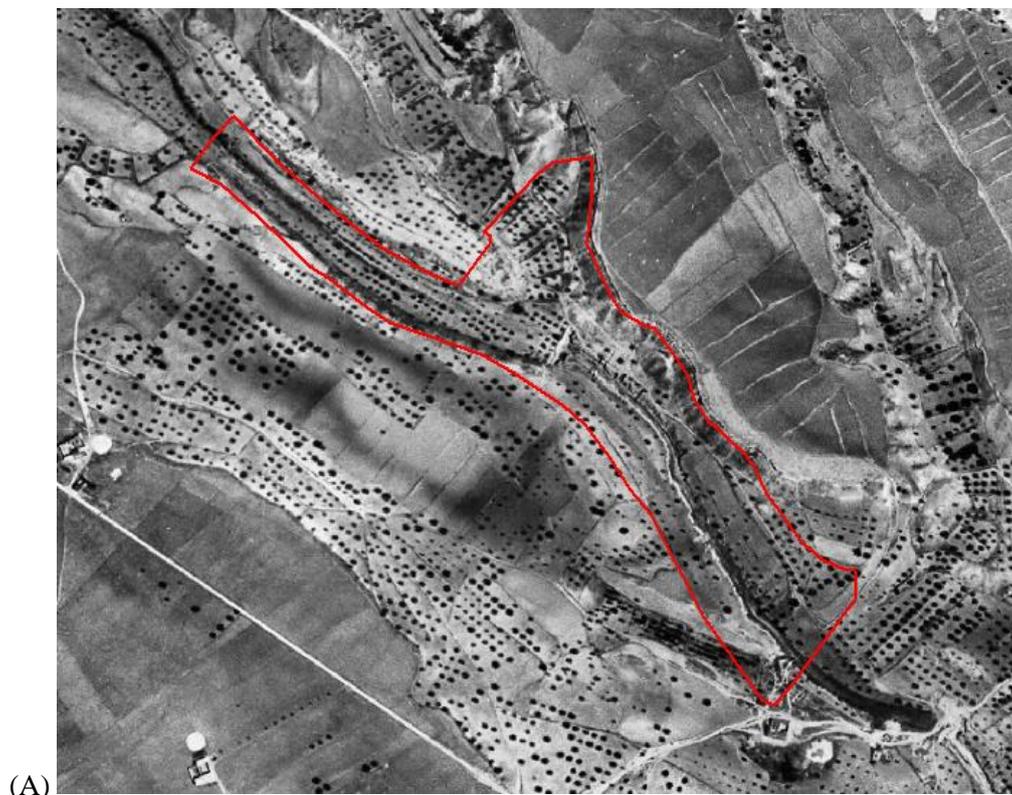
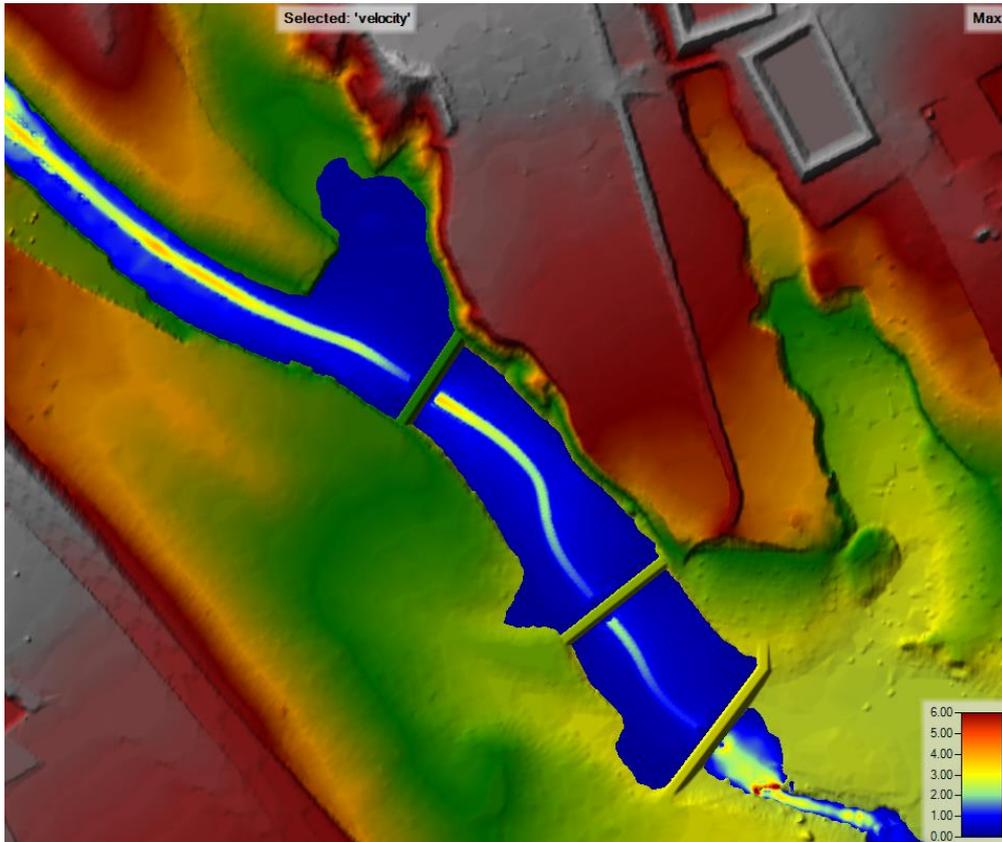


Figura 25. Velocidades máximas registradas (TR: 50 años). Los mayores valores se coinciden con la concentración de caudales para el desagüe de las balsas. Fuente: elaboración propia.

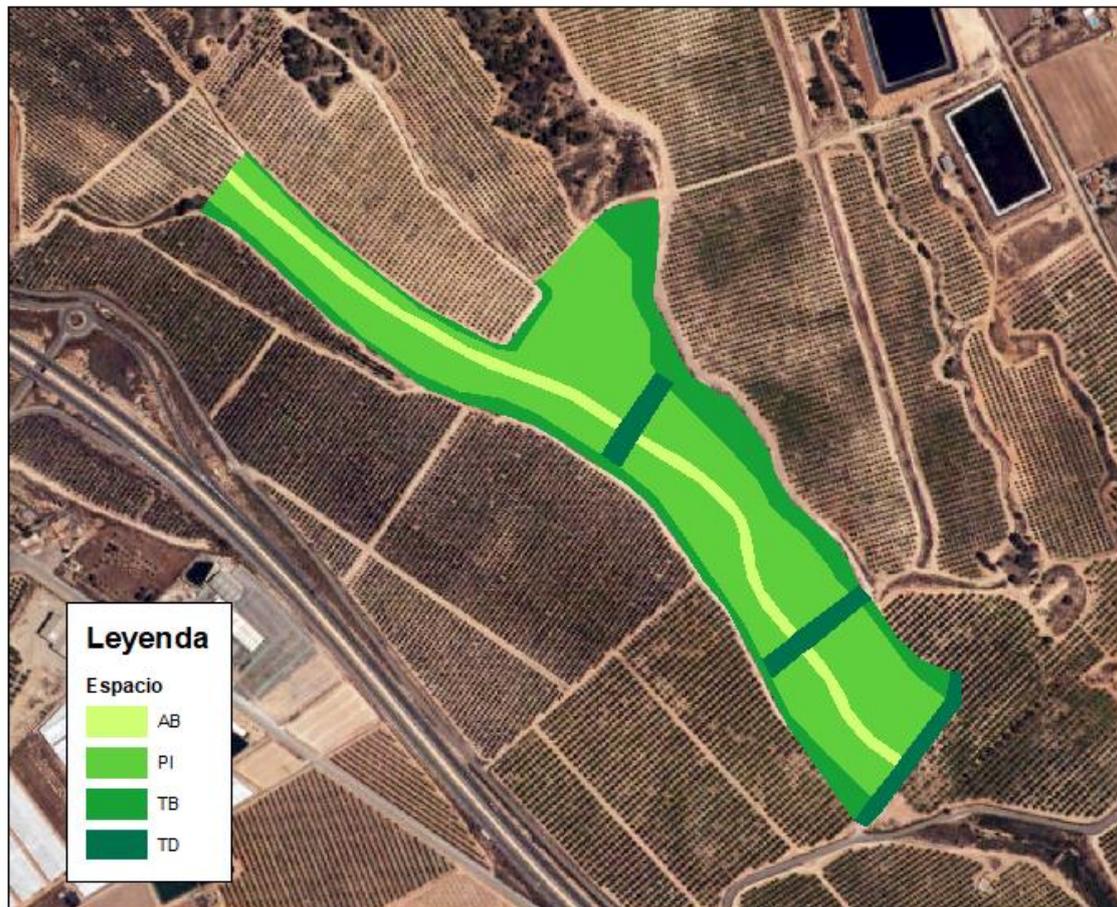


- **Áreas revegetadas**

El presente estudio no tiene como objetivo profundizar a detalle en las consideraciones de ecología; sin embargo, sabiendo que la vegetación en las zonas ribereñas de los RICE cumple funciones importantes como la estabilización de bancos de inundación, composición de hábitats para la fauna, fuente de materia orgánica, captura de sedimentos, retención y procesamiento de nutrientes, entre otros (Lake *et al.*, 2017); se propone alcanzar una recuperación local del cauce a partir de la revegetación del área intervenida. Como señala Rodríguez-Pacheco (2019) en Conesa Gallego, Parra Torres, Zornoza Belmonte, Faz Cano, y Gómez López (2019): “La recuperación de un sistema edáfico alterado requiere de un conocimiento de las especies autóctonas que se pueden y deben introducir para conservar y recuperar la biodiversidad de una región”. Por lo tanto, tomando las recomendaciones de De Baets *et al.* (2009) sobre la selección de especies para controlar la erosión en surcos y cárcavas en el ecosistema mediterráneo y la Guía de especies vegetales de la cuenca mediterránea aptas para revegetación (Conesa Gallego *et al.*, 2019) se expone la siguiente distribución (Figura 26).

- Taludes de balsas: Se ha identificado la asociación paisajística de especies *Stipa tenacissima*, *Tamarix gallica* y *Lygeum spartum* como idónea para la estabilización de taludes. Las dos primeras resaltan por su resistencia a la erosión por concentración de flujos y movimientos de masa superficiales, mientras que la tercera aporta un alto potencial obstruccionista al flujo de sedimentos.
- Planicie de inundación Se proponen *Tamarix canariensis* y *Juncus acutus*. El primero alcanza un desarrollo medio en menos de 5 años, con potencial para resistir inundaciones extremas y provee de cohesión extra al suelo, mientras que el segundo es más efectivo para prevenir la erosión por flujos concentrados y con gran potencial para atrapar sedimentos. Son especies que requieren humedad para crecimiento, la cual pueden obtener de los flujos laterales del agua durante los episodios húmedos.
- Talud de tierra de diques. Se recomiendan *Stipa tenacissima* y/o *Lygeum spartum* por su resistencia a la erosión por salpicadura y por concentración de flujos. A ello se podría sumar *Salsola genistoides* o *Anthyllis cytisoides* por su capacidad de prevenir movimientos de tierra superficiales a causa de su amplia extensión y profundidad radicular.
- Cercanías a canal de aguas bajas. *Lygeum spartum* y *Retama sphaerocarpa*. El primero por su alta resistencia a erosión por flujos concentrados y alto obstrucción potencial de sedimentos finos, mientras que el segundo previene movimientos de masa superficiales y tiene buena resistencia a la flexión que pueda experimentar por efecto del paso del agua.

Figura 26. Distribución de especies para revegetación. Basado en De Baets *et al.* (2009) y Conesa Gallego *et al.* (2019). (TB) Taludes de balsas, (PI) Planicie de inundación, (TD) Talud de tierra de diques, (AB) Cercanías al canal de aguas bajas. Fuente: elaboración propia.



Cabe recalcar la importancia de realizar un análisis detallado de las interacciones entre especies para definir su correcta organización espacial y predecir los efectos en el paisaje (De Baets *et al.*, 2009). Ello no debe limitarse únicamente a los aspectos ecológicos, sino también una revisión hidráulica de los efectos que la vegetación seleccionada tenga sobre el cauce; pues, como concluye Vargas-Luna *et al.* (2015), la presencia de vegetación arbustiva dentro de los cauces de bajo periodo de retorno puede incrementar los efectos de una avenida, con lo cual las estrategias de gestión pueden incluir la remoción de éstas o la limitación de su crecimiento en ciertas zonas.

7. CONCLUSIONES

Se comprobó que el sistema de balsas en línea permite la atenuación de los caudales máximos durante una avenida cuyo comportamiento se asemeje al modelo de hidrograma unitario. Su efectividad estará limitada por un periodo de retorno máximo por encima del cual los efectos de laminación de caudal irán disminuyendo. Por el otro lado, la atenuación será menor a medida que la recurrencia estadística de la precipitación sea mayor, sin embargo, en estos casos, el riesgo implicado será menor.

Para el caso de estudio, el diseño hidráulico fue optimizado para atenuar en 26% el caudal máximo para un evento de 50 años de periodo de retorno y consiguiendo un retardo aproximado de 140 minutos del máximo registro. Para tal fin se proponen tres balsas en línea definidas por tres diques de alturas 4.5 m, 4.0 m y 3.5 m con tuberías de drenaje en la parte más baja de éstos que permitan la detención del flujo y el desagüe posterior al evento. La propuesta constructiva mejor valorada consiste en un dique interno de gaviones con talud escalonado y un talud de tierra revegetado no estructural que cubra aguas arriba.

Pese a que el diseño de los diques no ha sido optimizado para la retención de sedimentos, la simulación realizada que tiene en cuenta la disminución de velocidades causadas por su funcionamiento da como resultado una notoria influencia en la sedimentación de arenas finas y limos gruesos según la metodología de Laursen – Copeland para transporte de sedimentos. Se recomienda la validación y ajuste de los resultados y el análisis detallado del efecto de la vegetación en la zona de inundación.

La propuesta integral de las balsas en línea ha sido planteada buscando adecuarse a los objetivos de una solución basada en la naturaleza. En tal sentido, se incluye la recuperación del espacio ribereño considerando un canal de aguas bajas según la forma histórica del cauce, permitiendo además la expansión del río durante eventos de crecidas, revegetación de zonas con especies autóctonas que aporten cubierta contra la erosión y promuevan la retención de sedimentos y la integración de las actuaciones estructurales al medio aminorando su impacto.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baker, D., Bridges, D., Hunter, R., Johnson, G., Krupa, J., Murphy, J., y Sorenson, K. (2001). *Guidebook to Decision-Making Methods*.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual* (CPD-69). Recuperado de Davis, CA:
- Castillo Navarro, L. F. (2006). *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú*. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/15817>
- Centro-Nacional-de-Información-Geográfica. (2015). Centro de Descargas. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Conesa Gallego, E., Parra Torres, A., Zornoza Belmonte, R., Faz Cano, Á., y Gómez López, M. D. (2019). Guía de especies vegetales de la cuenca mediterránea aptas para revegetación: Adecuación para zonas degradadas y contaminadas. In U. P. d. Cartagena (Ed.). *La Unión, Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena*.
- Confederación-Hidrográfica-del-Segura. Reservoirs of the Segura's basin. Recuperado 01 Junio 2021 <https://www.chsegura.es/en/cuenca/infraestructuras/embalses/listado-de-embalses/>
- Confederación-Hidrográfica-del-Segura. (2014). *Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación*.
- Copernicus-Sentinel-Data (Producer). (2019, 16/08/2021). Recuperado de <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/>
- CYPE-Ingenieros-SA. Generador de precios de la construcción. España. Recuperado de <http://www.generadordeprecios.info/#gsc.tab=0>
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Muys, B., De Baerdemaeker, J., y Meersmans, J. (2009). Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: application to a Mediterranean ecosystem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(10), 1374-1392. doi:10.1002/esp.1826
- Díaz, A., y Serrato, F. (2011). El Campo de Cartagena una visión global. In (pp. 17-48).
- Dirección-General-de-Desarrollo-Rural-Innovación-y-Formación-Agroalimentaria. (2020). Estabilización de Taludes. In P. y. A. S. G. T. Ministerio de Agricultura (Ed.), *Manual de Aspectos Constructivos de Caminos Naturales*.
- Dumitru, A., y Wendling, L. (2021). *Evaluating the Impact of Nature-based Solutions: A handbook for practitioners*.
- Etatec-Studio-Paoletti. (2017). Retention-basin-lura-park. Recuperado de <https://networknature.eu/casestudy/19515>
- García, Y. (Producer). (2019, 13/09/2019). Vista aérea de San Javier, en la mañana de este viernes. Recuperado de <https://www.laverdad.es/murcia/pesadilla-historica-20190913113503-nt.html>
- IUCN. (2020a). *Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*. (1° ed.). Gland, Switzerland: IUCN.

- IUCN. (2020b). *Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions*. (1° ed.). Gland, Switzerland: IUCN.
- Jia, J., Lino, M., Jin, F., y Zheng, C. (2016). The Cemented Material Dam: A New, Environmentally Friendly Type of Dam. *Engineering*, 2(4), 490-497. doi:10.1016/J.ENG.2016.04.003
- Lake, P., Bond, N., y Reich, P. (2017). Restoration Ecology of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams. In *Intermittent Rivers and Ephemeral Streams* (pp. 509-533).
- Land-and-Water-Division. (2001). *Small Dams and Weirs in Earth and Gabion Materials* (FAO Ed.).
- Liu, C., Ahn Changbum, R., An, X., y Lee, S. (2013). Life-Cycle Assessment of Concrete Dam Construction: Comparison of Environmental Impact of Rock-Filled and Conventional Concrete. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(12), A4013009. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000752
- Magand, C., Alves, M. H., Calleja, E., Datry, T., Dörflinger, G., England, J., . . . Von Schiller, D. (2020). *Intermittent rivers and ephemeral streams: what water managers need to know*.
- Marco, F., Marin, M. D., y Castillo, L. G. (2016). Estudio del transporte de sedimentos en la Rambla del Albuñón. *Anuario de Jóvenes Investigadores*(9), 74-77.
- Marin, M. D., y Castillo, L. G. (2011). Hydrologic properties and sediment transport in ephemeral streams. *WIT Transactions on Ecology the Environment*, 146, 313-324.
- MITECO. (2019). *Resumen ejecutivo después de la información pública*. Recuperado de <http://www.miteco.gob.es/es/agua/participacion-publica/>
- OMM. (2019). La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanza un nuevo récord. Recuperado de <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-concentraci%C3%B3n-de-gases-de-efecto-invernadero-en-la-atm%C3%B3sfera-alcanza>
- Osborn-Consulting-Incorporated. (2013). Thornton creek confluence project. In. <http://osbornconsulting.com/thornton-creek-confluence/>.
- Phillips, J. V., y Tadayon, S. (2006). *Selection of Manning's roughness coefficient for natural and constructed vegetated and non-vegetated channels, and vegetation maintenance plan guidelines for vegetated channels in central Arizona*: US Geological Survey.
- Pons, J. J., Penadés-Plà, V., Yepes, V., y Martí, J. V. (2018). Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production*, 192, 411-420. doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.268
- Richard, D. L., y Hadley, H. R. (2006). *Soil-Cement Guide for Water Resources Applications*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Romero Díaz, A., Caballero Pedraza, A., y Pérez Morales, A. (2017). Expansión urbana y turismo en la Comarca del Campo de Cartagena-Mar Menor (Murcia). Impacto en el sellado del suelo. *Cuadernos de Turismo*(39). doi:10.6018/turismo.39.290691
- Ruiz, J. M., Albentosa, M., Aldeguer, B., Álvarez-Rogel, J., Antón, J., Belando, M. D., . . . Yebra, L. (2020). *Informe de evolución y estado actual del Mar Menor en relación al proceso*

de eutrofización y sus causas. Informe de asesoramiento técnico del Instituto Español de Oceanografía. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/prensa/informemarmenorjulio2020_tcm30-510566.pdf

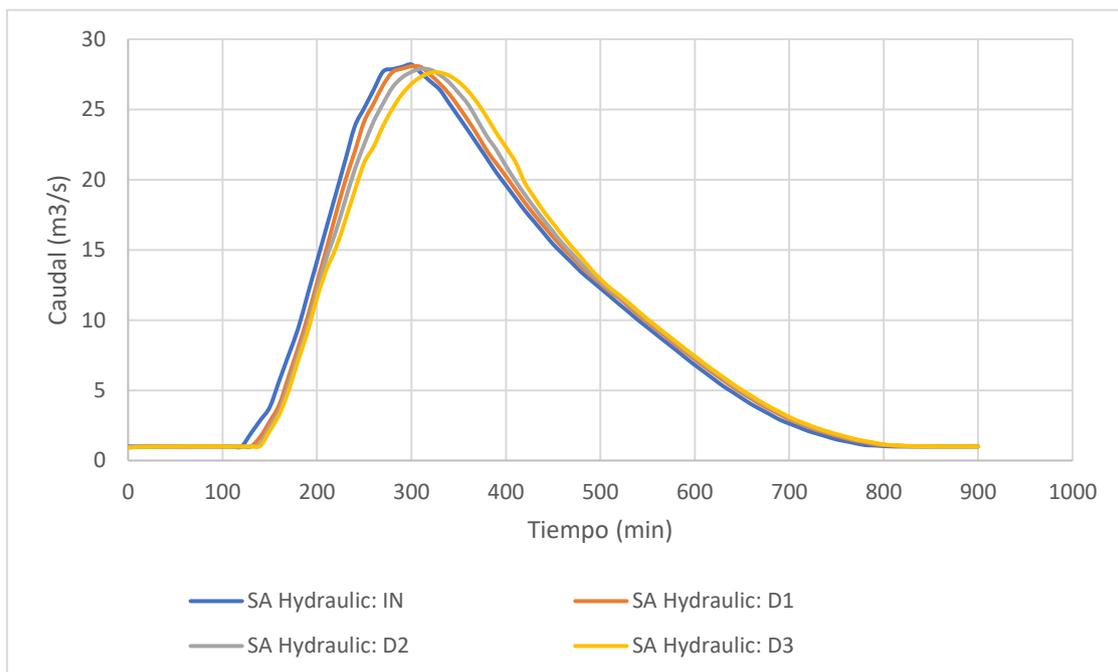
- Scholz, M., y Sadowski, A. J. (2009). Conceptual classification model for Sustainable Flood Retention Basins. *90*(1), 624-633.
- Sistema-de-Información-Territorial-de-la-Región-de-Murcia. (2003). Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia. <https://visoriderm.carm.es/mapstore/#/viewer/openlayers/1>
- Somarakis, G., Stagakis, S., Goni, E., Sara Van, Rompaey, S. V., Lilli, M., y Nikolaidis, N. (2019). The emerging concept of nature-based solutions. In G. Somarakis, S. Stagakis, y N. Chrysoulakis (Eds.), *Nature-Based Solutions Handbook*.
- Tech, V. (2013). Dry Extended Detention Basin. In *BMP Design Manual of Practice*. Richmond, VA, USA: Virginia Department of Transportation.
- Terêncio, D. P. S., Fernandes, L. F. S., Cortes, R. M. V., Moura, J. P., y Pacheco, F. A. L. (2020). Flood risk attenuation in critical zones of continental Portugal using sustainable detention basins. *Science of The Total Environment*, *721*. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137727
- Van den Heede, P., y De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, *34*(4), 431-442. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004
- Vargas-Luna, A., Benifei, R., Solari, L., van Oorschot, M., y Geerling, G. (2015). *Effect of vegetation on floods: The case of the River Magra*.
- Wild, T., Bulkeley, H., Naumann, S., Vojinovic, Z., Calfapietra, C., y Whiteoak, K. (2020). *Nature-Based Solutions: State of the Art in EU-funded Projects*. Recuperado de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8bb07125-4518-11eb-b59f-01aa75ed71a1>

9. ANEXOS

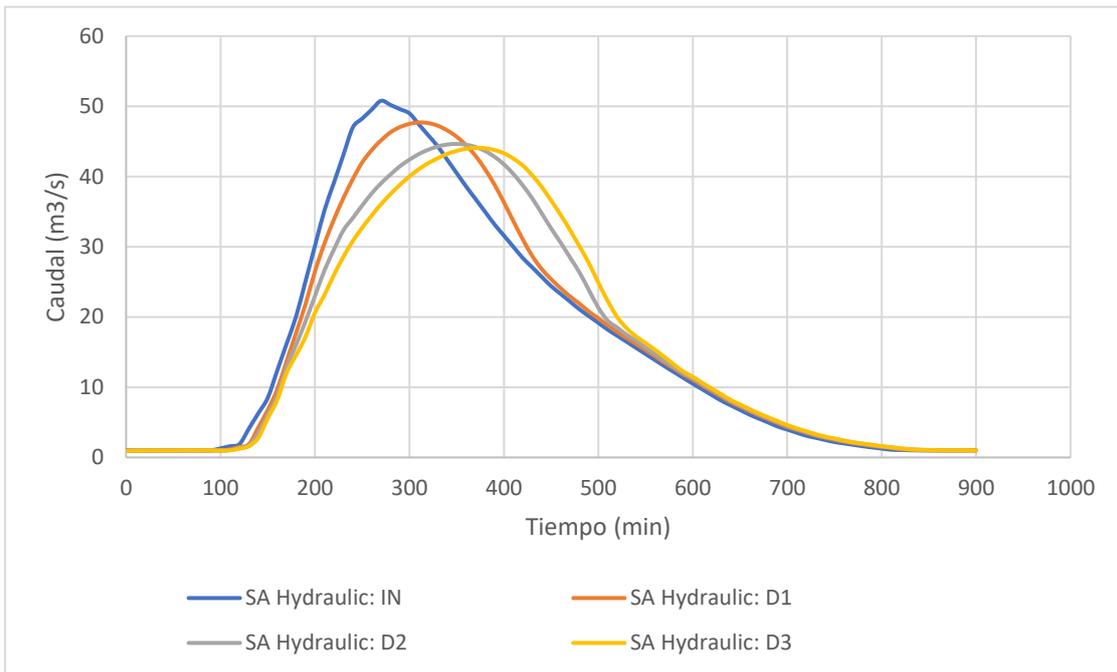
Anexo 01

Tras las simulaciones del modelo en HEC-RAS, a continuación, se presentan los hidrogramas de flujo a través de los diques para cada periodo de retorno analizado. Para el menor periodo de retorno [(A) TR: 10 años] no se observa laminación del caudal máximo. Ello ocurre porque el cauce preferente de aguas bajas y los desagües bajo los diques son capaces de transportar el flujo total de diseño. Luego, a medida que aminora la probabilidad de ocurrencia de los eventos de diseño, el efecto de laminación se hace notorio. Para el caso en que el caudal máximo del hidrograma sobrepasa el asumido para el diseño de las balsas [(C) TR:100 años] se observa un cambio de tendencia cuando el caudal se acerca hacia el pico. Esto se debe a que el volumen de ingreso sobrepasa la capacidad de la balsa y ocurre un sobrevertido.

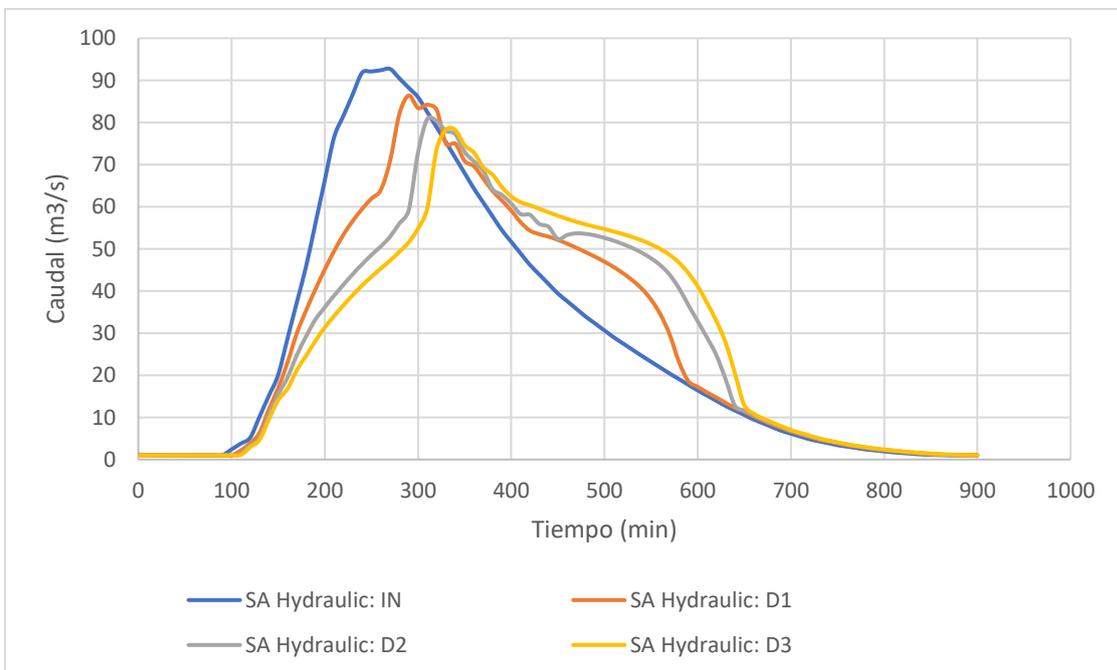
(A) Hidrogramas para periodo de retorno 10 años



(B) Hidrogramas para periodo de retorno 25 años



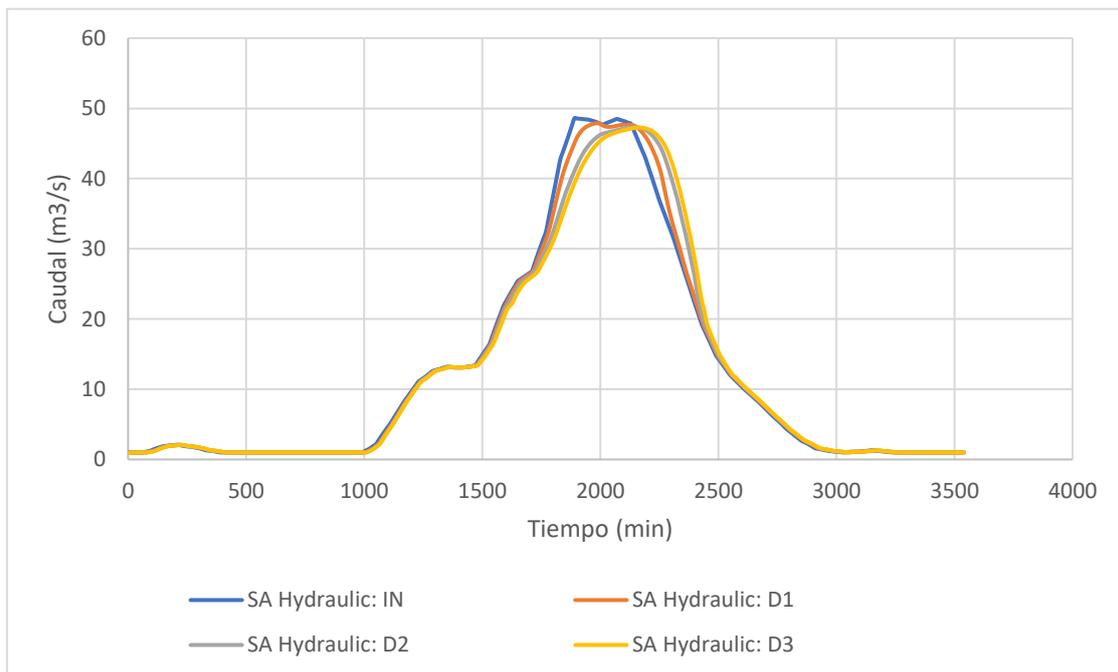
(C) Hidrogramas para periodo de retorno 100 años



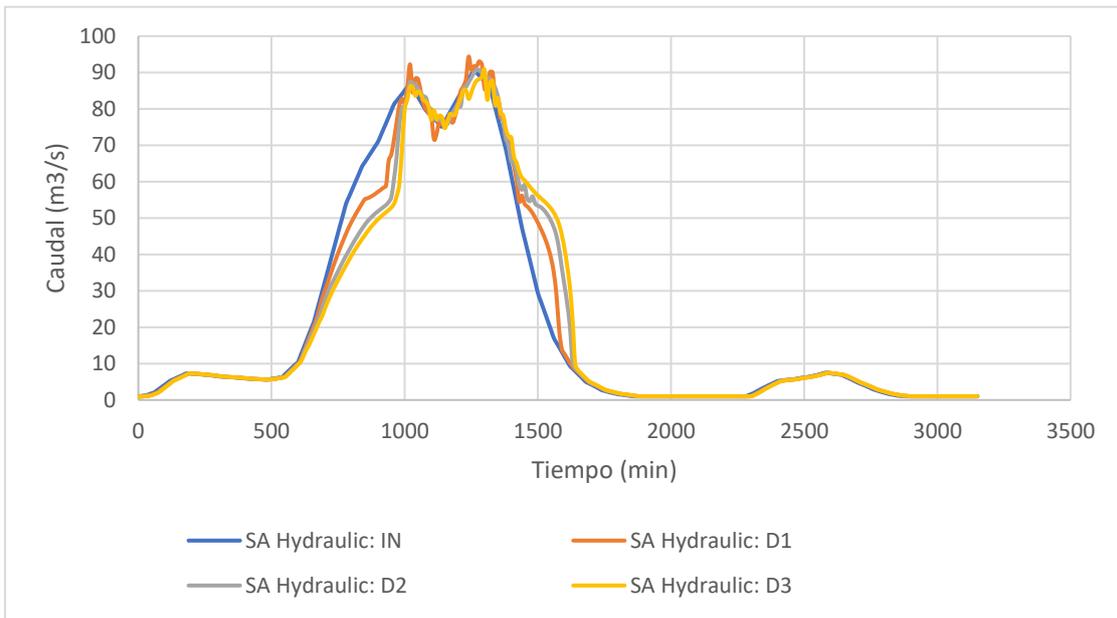
Anexo 02

Se presentan los hidrogramas a través de diques de las balsas para eventos simulados a partir de los datos pluviométricos registrados en tres eventos de precipitación entre el 2016 y el 2020. Se observa que los tiempos al pico para estas simulaciones son aproximadamente el doble que el de los hidrogramas sintéticos de diseño. En tal sentido, en todos los casos no se registra laminación del caudal máximo; pues, mientras el llenado de las balsas se desarrolle de forma más gradual, sus capacidades de detención se ven limitadas. De forma similar a lo observado con los escenarios sintéticos, para los hidrogramas con menor caudal pico (A), éstos son asumidos por el cauce preferente de aguas bajas. Por otro lado, cuando el evento sobrepasa el valor de máximo del hidrograma sintético de diseño con periodo de retorno de 50 años, registra también un cambio de comportamiento en el flujo que atraviesa los diques, lo que se interpreta como la ocurrencia de sobrevertido.

(A) Hidrogramas generados a partir de evento de diciembre del 2016



(B) Hidrogramas generados a partir de evento de septiembre del 2019



(C) Hidrogramas generados a partir de evento de marzo del 2020

