



TRABAJO FIN DE MÁSTER

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN CLIMA ÁRIDO. MODELO HIDRÁULICO EN CUENCA AL FARA (OMÁN) MEDIANTE IBER



MARÍA PAREDES MORALES

Tutores:

Dr. Antonio Viqueras Rodríguez

Dr. José María Carrillo Sánchez

JUNIO 2019

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a los que han sido mis tutores, D. Antonio Viguera Rodríguez y D. José María Carrillo Sánchez, por su interés, su apoyo y colaboración en la realización de este trabajo.

Agradecer el apoyo de todos los profesores que me aportaron su ayuda y apoyo desde la distancia durante mi estancia en Omán.

Agradecer en último lugar, pero no por ello con menos gratitud, a la Universidad Politécnica de Cartagena por las oportunidades de estudios, becas y salidas profesionales que ofrece a los alumnos, así como a los profesores, que, con su trabajo, hacen que esto sea posible y nos hacen visibles en otras esferas más allá de la propia universidad.

PREÁMBULO

En mayo de 2016 surge la oportunidad de colaboración con la Universidad *German University of Technology* en Omán, en un proyecto a propuesta de la institución pública del mismo país *Research Council of Oman* y que lleva por título **“Towards a flood resilient Omani society: improved tools for flood management”** para dar continuidad como proyecto de investigación, a un estudio, iniciado en 2014, por la misma universidad.

El proyecto consiste en la modelización hidráulica de inundaciones en clima árido, concretamente, el estudio se lleva a cabo en tres de las cuencas más importantes de la geografía del país, debido a sus características orográficas y al elevado número de asentamientos tanto industriales como de población, motivado por los daños y consecuencias devastadoras que tuvieron lugar en 2010 tras el paso del ciclón Gonu, que se hizo presente en diversos puntos de la costa de Omán.

El proyecto involucra a tres departamentos diferentes de la universidad que colaborarán conjuntamente cada uno en su disciplina a lo largo de toda la vida del proyecto (*STRD – Sustainable Tourism and Regional Development department, AGEO – Applied GeoSciences department, CS – Computer Sciences department*), como directores del proyecto y compartiendo dirección con los departamentos mencionado, es de destacar la importante labor del *Dr. Ekkehard Holzbecher* y la *Dra. Adrijana Car*.

El reparto de tareas del proyecto se realiza del siguiente modo:

- El departamento STRD llevaría a cabo un estudio de población, aportando información histórica y encuestas reales sobre el conocimiento y comportamiento de la población frente a los riesgos de inundación para el futuro desarrollo de un portal en internet donde informar a la población de las zonas de riesgo, así como de la peligrosidad de las mismas.
- Por su parte, el departamento AGEO, desarrollaría los aspectos técnicos del proyecto así como el modelo hidrológico para la consecución de resultados plasmados en unos mapas de riesgo que se pondrían a disposición del ciudadano a través del portal.
- Por último, el departamento de CS daría soporte técnico informático en cualquier aspecto del proyecto en que fuese necesario.

Para ello, en septiembre de 2016 nos incorporamos al proyecto cuatro alumnos de diferentes universidades y de diferente especialización e iniciamos los trabajos de búsqueda de información y datos con la idea de hacer una validación de los mismos para poder llevar a cabo un modelo hidráulico que nos permitiese evaluar, en un final, el riesgo y peligrosidad de las principales áreas en un evento de inundación a partir de los datos disponibles de lluvia y escorrentía del evento de mayor intensidad que ha tenido lugar en los últimos años; esta es la tarea que desarrollaría el departamento de AGEO. Por su parte, el departamento STRD desarrollaría las herramientas necesarias para poner al servicio de la población el resultado de este trabajo y por tanto, toda la información en cuanto al riesgo de inundación a través de mapas y cartografía, donde poder consultar zonas inundables y peligrosidad de las mismas a través de una plataforma online a la que pudiesen acceder libremente todos los ciudadanos e interesados.

La consecución de información se convierte en una complicada tarea.

La información que proporciona el Ministerio de Recursos Hídricos requiere un tiempo importante para ser ordenada y analizada, pasado este tiempo observamos que la información es incompleta, que las series de datos no tienen la correlación adecuada y que cualquier análisis que se desprendiese de esos datos sería altamente impreciso, por no decir que un intento de modelo hidráulico sería imposible.

Otro problema que se nos plantea es referido a la cartografía.

La posesión y el derecho de la cartografía actualizada del país, pertenece al Ministerio de defensa. Para su consecución, se mantuvieron distintos encuentros con el Ministerio, concluyendo las mismas en un requerimiento económico por parte de este Ministerio para poder facilitar la información que, el proyecto, por su carácter investigador y dependiente del instituto de investigación no pudo asumir.

Tras estas dificultades, nos ponemos en contacto con la autoridad pública de Aviación Civil (*PACA, Public Authorities for Civil Aviation*), quienes de manera desinteresada nos proporcionan unas series de datos más fiables para la realización del análisis de datos correspondientes a varios eventos, con los que podemos elaborar información de mayor precisión.

Desafortunadamente, cuando parecía que encontrábamos la vía con la que trabajar en la consecución de datos meteorológicos, el *Research Council of Oman* comunica a la universidad que carece de fondos para la continuación y el completo desarrollo del proyecto, que estaba previsto en 2 años, con lo que 6 meses después del inicio, damos por finalizado el trabajo realizado, sin apenas conclusiones. A lo que únicamente pudimos añadir un informe de todo el trabajo realizado y el trabajo futuro que quedó pendiente de realización y que sería necesario para la consecución de resultados.

Por tanto, con todo lo anteriormente expuesto, me surge la necesidad de realizar el estudio de lo que el proyecto podría haber sido en su totalidad, analizando por mi cuenta toda la documentación obtenida así como otros documentos, que pude conseguir en una etapa posterior, y reflejar de manera detallada el proceso para llevar a cabo un estudio de consecuencias sociales, resaltando toda la información y características especiales del área geográfica de estudio, que para la mayoría de situaciones dista tanto de lo que normalmente, en un país como España, estamos acostumbrados. La desinformación de la sociedad, reflejada en encuestas que el STRD llevó a cabo durante el proyecto nos da a conocer que aún queda mucho por hacer en materia de información y concienciación ciudadana en cuanto a eventos catastróficos o simplemente ante un evento de intensa lluvia.

A pesar de que recibe constantes eventos de inundaciones repentinas, Oman es uno de los muchos países que debe seguir trabajando e invirtiendo en la gestión y planificación de sus recursos hídricos, ya que solo así podrá mitigar el efecto de estos efectos naturales que por supuesto son imposibles de evitar.

A continuación, os invito a que conozcáis un poco más a cerca de todo lo relacionado con este ámbito que tanto nos atañe a los profesionales de la Ingeniería Civil, como a la sociedad en general y que para mí ya despertaba un interés especial antes de incorporarme al proyecto, debido a que en Europa y también en España, las inundaciones constituyen el riesgo natural que a lo largo del tiempo ha producido los mayores daños tanto materiales como en pérdida de vidas humanas, por los que la lucha contra los efectos negativos de las inundaciones ha sido una constante en la política hidrológica y de protección civil.

María Paredes Morales
Febrero, 2019

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	1
PREÁMBULO.....	3
ÍNDICE.....	5
CAPÍTULO I. I.....	7
INTRODUCCIÓN.....	7
I.I Motivación. Descripción sucesos de ciclones.	7
I.II Introducción	12
I.III Inundaciones repentinas.....	13
I.IV Zonas geográficas de Omán.....	14
Regiones	14
Paisaje	15
I.V Breve introducción a la gestión de recursos hídricos del país.....	17
CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA.....	21
Wadi Al Fara	21
CAPÍTULO III. HIDROLOGÍA.....	23
II.I Patrones climáticos y zonas hidrológicas.....	23
II.II Características de las precipitaciones en Omán.....	24
II. III Definición de las curvas INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (IDF)	26
II.IV El Método racional.....	32
II.V Método del hidrograma unitario (SCS).....	34
II.VI Ecuaciones de regresión.	46
ECUACIÓN EMPÍRICA PARA ESTIMACIÓN DE LA INUNDACIÓN	52
CAPÍTULO IV. MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN.	55
CAPÍTULO V. MODELO HIDRÁULICO. IBER.....	59
CARACTERIZACIÓN DEL MODELO	59
MODELO IBER.....	60
MÉTODO DE COWAN PARA LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE MANNING EN EL LECHO DEL CAUCE.....	60
Modelo digital del terreno	62
Geometría	63
Mallado	64
Características de la simulación.	66
Resultados.....	71

Análisis Evento ciclón Gonu	71
CONCLUSIONES	77
ANEXO 1. HOJA DE CÁLCULO MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO SCS.	81
ANEXO 2. HOJA DE CÁLCULO ECUACIONES DE REGRESIÓN	82
ANEXO 3. LISTA DE TABLAS Y LISTA DE FIGURAS.	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

CAPÍTULO I. I

INTRODUCCIÓN

I.I Motivación. Descripción sucesos de ciclones.

Son numerosos los eventos actuales de inundaciones que sufre Omán, los cuales suelen causar importantes daños debido a su falta de planificación hídrica y la escasez de recursos e infraestructura hidráulica; es en la década de los 90 el momento en que el país alcanza el máximo desarrollo que había tenido lugar hasta la fecha en materia de industria, infraestructura, población, agricultura, etc.

Debido a la ausencia de fenómenos extraordinarios durante esta época, apenas se le da importancia al desarrollo de una planificación de recursos hídricos más allá de la necesidad de abastecer a la población de suministro de agua, ya que, por ejemplo, las zonas urbanas, hoy en día aún carecen de sistemas de drenaje y saneamiento.

En junio de 2007, el Ciclón Gonu golpea las costas de Omán, provocando un importante desastre social y económico. Con pérdidas cuantificadas en 50 vidas humanas y 27 desaparecidos y 4,2 billones de dólares.

Las consecuencias del desastroso evento que afectaron a cuatro países vecinos, Omán, Emiratos Árabes Unidos, Irán y Pakistán fueron cuantificadas en un total de 78 vidas humanas, 35 desaparecidos, como resultado principalmente de las inundaciones, y 4,4 billones de dólares, siendo, por tanto, Omán, el gran afectado de esta cifra.

Debido a que la última tormenta registrada y conocida de esta magnitud databa de 1977, durante muchos años, ni las infraestructuras ni la planificación urbanística estuvieron enfocados a evitar las consecuencias que podría tener la repetición de un evento de tal magnitud; por ello cuando Gonu alcanzó la costa noreste del país, este no pudo hacer frente a las consecuencias que los fuertes vientos e inundaciones dejaron a su paso.

Este fue por tanto el punto de partida de la concienciación del gobierno y los ciudadanos de que necesitaban políticas de gestión que les ayudasen a mitigar, en la medida de lo posible, las consecuencias de un evento futuro de similares características.

Esto motiva a que las diferentes universidades y profesionales presentes en el país empiecen a desarrollar estudios en torno a potenciar el conocimiento en esta materia, encargados por los distintos organismos oficiales del país.

CASO 1: GONU, 7 JUNIO 2007

IMPACTOS EN OMÁN

Unas siete horas antes de golpear la costa nororiental de Omán, el ciclón Gonu comenzó a afectar al país con fuertes vientos y precipitaciones; los totales de lluvia llegaron a 610 mm cerca de la costa. Gonu produjo fuertes olas a lo largo de gran parte de la costa, dejando inundados muchos caminos costeros. Hubo una marea debido a la tormenta de 5,1 metros y el mar se adentró en zonas de la costa distancias de hasta 200 metros.

El gobierno declaró Estado de emergencia en el país, y los servicios generales estuvieron fuera de servicio durante aproximadamente 5 días.

Los fuertes vientos, que alcanzaron los 150 km/h, interrumpieron el suministro de las líneas eléctricas y telefónicas en la región oriental del país, dejando a miles de personas aisladas hasta que las líneas fueron reparadas horas después.

Alrededor de 20.000 personas fueron evacuadas y trasladadas a lugares más seguros que sus residencias. La policía de la ciudad envió mensajes de texto para mantener a las personas alejadas de las calles inundadas y evitar las electrocuciones.

La terminal de gas natural licuado en la ciudad de Sur, que produce alrededor de 10 millones de toneladas de gas cada año, estuvo muy afectada por la tormenta y no pudo estar operativa hasta pasadas varias semanas. También el aeropuerto internacional estuvo inoperativo durante tres días.

DATOS DE SATÉLITES Y METEOROLÓGICOS

El ciclón Gonu surge en el golfo de Omán e hizo tierra en Irán. En aquella época, una nación no conocida para los ciclones.

A las 12:55 pm hora local (09:55 UTC) el 7 de junio de 2007, cuando el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) en el satélite Aqua de la NASA capturó la imagen de la Figura 1, el ciclón tropical Gonu estaba cruzando el Golfo de Omán y dirigiéndose hacia el norte de la Costa de Irán; para entonces, la tormenta había perdido bastante fuerza y se consideraba una mera tormenta tropical. Los vientos sostenidos se midieron a 60 kilómetros por hora.

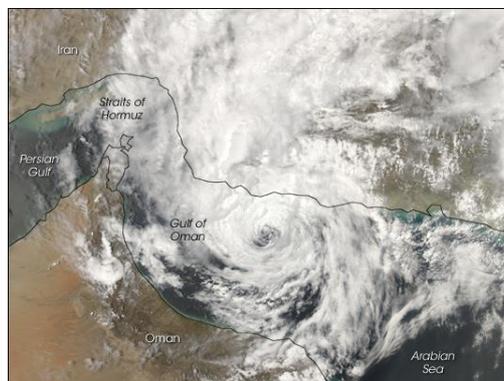


Figura 1. Imagen del visor espacial que muestra la formación del ciclón en el Golfo de Omán.
(<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=18438>).

La imagen de satélite muestra como Gonu lleva sus lluvias a Omán. Debido a que estas tormentas son prácticamente inauditas en esta parte del mundo, las autoridades dieron

gran importancia al evento declarando días no laborables y solicitando el cierre de algunos servicios durante los días en que se esperaba la tormenta. Parecía que Gonu, no alcanzaría el estrecho de Ormuz, y el transporte marítimo de petróleo desde el Golfo Pérsico no se vio interrumpido significativamente.

La Figura 2 muestra los totales de lluvia del 31 de mayo al 7 de junio de 2007, del Multi-satellite Precipitation Analysis (MPA).

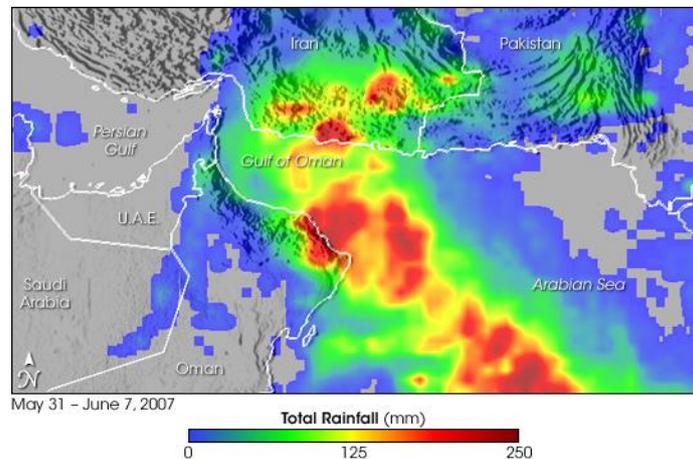


Figura 2. Totales de lluvia del 31 de Mayo al 7 de junio de 2007 en el Golfo de Omán. (<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=18438>).

El ciclón sufrió un descenso de categoría 5 a 1 a medida que se acercaba a la costa. En Muscat, la capital de Omán, se registraron algunas de las lluvias más fuertes medidas durante el evento, estas lluvias torrenciales convirtieron las calles en ríos de agua. Aunque el núcleo central de Gonu nunca llegó a tierra firme en Omán, llegó muy cerca de la costa noreste, donde arrojó hacia el interior volúmenes de 200 milímetros de lluvia (mostrados en rojo oscuro). El terreno montañoso cerca de las costas de Omán representaba un peligro adicional para las regiones costeras. Las fuertes lluvias que caían sobre las escarpadas montañas suponían torrentes de agua a elevada velocidad hacia las zonas costeras.

La Figura 3 muestra el ciclón tropical Gonu y su patrón espiral de vientos según lo registrado por el satélite QuikSCAT de la NASA el 4 de junio de 2007.

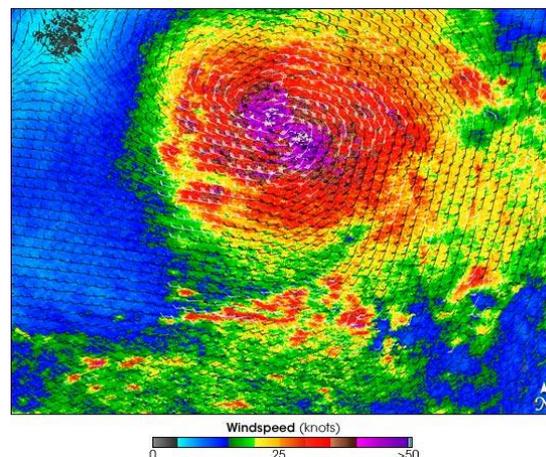


Figura 3. Patrón de vientos y velocidad de la tormenta el 4 de junio de 2007. (<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=18438>).

Varias velocidades de viento dentro de la tormenta forman un ojo de buey, con las más altas velocidades de viento mostradas en púrpura en el centro de la tormenta y la disminución gradual de las velocidades que irradian hacia el exterior. La dirección del viento está representada con pequeñas lengüetas. Las flechas blancas apuntan a áreas de fuerte lluvia.

Se podría esperar ver una tormenta tan bien desarrollada sobre las cálidas aguas del Caribe o en el Pacífico Sur, pero el ciclón tropical Gonu apareció en un lugar inusual. El 4 de junio de 2007, cuando fue observado por el satélite QuikSCAT, el ciclón Gonu se acercaba a la costa noreste de Omán, una región mejor conocida por las condiciones del desierto y un clima caluroso.

Aunque raros, ciclones como Gonu no son inauditos en la cuenca del norte del Océano Índico. La mayoría de los ciclones que se forman en la región se forman sobre la Bahía de Bengala, al este de la India. Los que toman forma sobre el Mar Árabe, al oeste de la península india, tienden a ser pequeños y suelen desaparecer antes de llegar a tierra.

Las mediciones terrestres o aeronáuticas de la fuerza del viento del ciclón Gonu probablemente mostrarían vientos sostenidos significativamente más altos que los estimados por QuikSCAT. QuikSCAT utiliza un dispositivo que envía impulsos de energía de microondas a través de la atmósfera a la superficie del océano y mide la energía que rebote hacia atrás de la superficie rugosa del viento. La energía de los impulsos de microondas cambia dependiendo de la velocidad y dirección del viento, dando a los científicos una forma de monitorear el viento alrededor del mundo. Esta técnica no funciona sobre la tierra, pero permite mediciones en tormentas sobre los océanos.

Sin embargo, las velocidades del viento en los ciclones trópicos son difíciles de medir para QuikSCAT. Para relacionar la señal de radar que el sensor mide con la velocidad real del viento, los científicos comparan las medidas tomadas de las boyas y otras estaciones terrestres con los datos que el satélite adquirió al mismo tiempo y en el mismo lugar. Debido a que las altas velocidades del viento generadas por los ciclones son escasas, no se tiene suficiente información sobre el terreno para saber cómo traducir los datos del satélite para velocidades de viento superiores a 50 nudos (unos 93 km / h). Además, la lluvia inusualmente intensa que se encuentra en un ciclón distorsiona los impulsos de microondas de varias maneras, lo que dificulta una conversión a una velocidad exacta del viento.

CASO 2: PHET, 4 JUNIO 2010

Al igual que en el evento anterior, el ciclón Phet golpea la costa de Omán el 4 de junio de 2010, tres años después, aunque igualmente lo hace de manera inesperada. Su categoría descendió de 4 a 1 en este caso al alcanzar la costa.

La Figura 4 muestra el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) en el satélite Terra de la NASA durante la Tormenta a las 10:40, hora local, el 4 de junio.



Figura 4. Imagen del visor espacial que muestra la formación del ciclón en el Golfo de Omán. (<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=44189>).

Para entonces, Phet se había degradado en una tormenta de categoría 1 con vientos de unos 140 kilómetros por hora. Las nubes remolinos de la tormenta cubren la mayor parte del norte de Omán y todo el Golfo de Omán en esta imagen. Aunque es parcialmente sobre la tierra, la tormenta mantiene una forma distintiva en espiral. Se consideró finalmente una tormenta tropical y según los informes, Phet inundó la capital de Omán, Muscat, pero no había causado un número elevado de víctimas.

El ciclón tropical Phet no solo trajo vientos fuertes, sino también fuertes lluvias en el Mar Arábigo, la Península Arábiga y la costa de Pakistán a finales de mayo y principios de junio de 2010. La figura 5 con códigos de colores muestra tanto las precipitaciones como la pista de tormenta para Phet del 31 de mayo al 6 de junio de 2010. Las cantidades de lluvia aparecen en tonos de azul y verde.

Phet alcanzó su mayor intensidad frente a la costa de Omán el 3 de junio. Después de hacer tierra en Omán, Phet se disipó un poco, pero permaneció lo suficientemente organizado como para retroceder por el Mar Arábigo hacia Pakistán. Las cantidades de lluvia más fuertes, 600 milímetros o más, se midieron frente a la costa de Omán, al sur de donde la tormenta alcanzó su mayor intensidad.

Las cantidades de lluvia más ligeras se midieron cerca de las costas de Omán, Irán y Pakistán. Aunque los vientos eran más lentos y la lluvia era más ligera sobre la tierra, la tormenta

todavía causó daños sustanciales a lo largo de las costas. Agence France-Prese informó que Phet causó 15 muertes en Omán y cuatro muertes más en Pakistán.

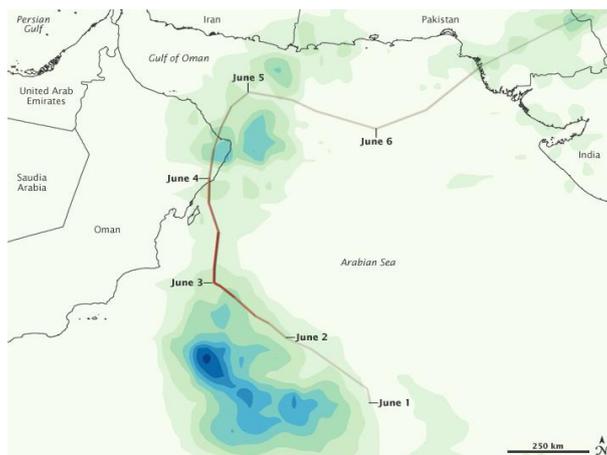


Figura 5. Imagen de la distribución espacial de lluvia en el Golfo de Omán durante el ciclón Phet. (<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=44189>).

Esta imagen se basa en datos del Análisis de precipitación multisatélite producido en el Centro de Vuelo Espacial Goddard, que calcula las precipitaciones combinando mediciones de muchos satélites y calibrándolas usando mediciones de precipitación del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

I.II Introducción

Omán es uno de los muchos países localizados en zonas áridas que presenta inundaciones repentinas, conocidas como “flash floods”.



Figura 6. Imagen de inundación en Muscat, 2010 (<https://asafeharbour.blogspot.com/2010/06/remembering-gonuas-we-remain-concerned.html>).

En los últimos años, ha tenido que enfrentarse a severos impactos de inundaciones repentinas. Muchas áreas no están preparadas para tales sucesos. Siendo la densidad de población en estas áreas muy elevada para los riesgos que se presentan. Surge la necesidad de un proyecto de investigación para el análisis de las tres cuencas más afectadas con el objetivo de analizar los riesgos a partir de experiencias pasadas y tratar de realizar propuestas de mitigación de los daños que provocarían futuras inundaciones en las principales áreas residenciales que se ubican en el interior de las cuencas (Wadi Maawil, Wadi Al Fara y Wadi Bani Kharus).

A pesar del abundante volumen de agua que recibe el país ante un evento de lluvia e inundación, como es bien sabido, en climas áridos los eventos de lluvia son muy limitados, llegando incluso en algunos años a ser inexistentes. Dada esta característica climática, se incrementa la importancia del estudio de los eventos de lluvia a través de series históricas y cualquier otra información disponible y de utilidad para tal fin, para el buen desarrollo de los recursos hídricos y su preservación en el tiempo.

En nuestro trabajo analizaremos en detalle la cuenca Wadi Al Fara.

I.III Inundaciones repentinas.

Las inundaciones repentinas son uno de los peligros naturales más devastadores. A menudo se caracterizan por la profundidad que presenta la corriente y la rapidez que, combinada con el poco tiempo disponible para responder, genera un enorme riesgo para las personas y el entorno en general.

La causa principal suelen ser las precipitaciones abundantes; las ubicaciones en riesgo van desde las regiones desérticas donde los cursos de agua discurren normalmente secos hasta zonas más templadas, particularmente en zonas montañosas.

La inundación a veces también ocurre debido a fallos en la infraestructura, como, por ejemplo, roturas de presas o diques, terraplenes y otras estructuras, incluso por corrimientos de tierra o bloques de hielo y glaciares, pero no es el caso que nos ocupa. Trataremos el concepto de inundaciones repentinas desde el punto de vista del evento que provoca un episodio puntual, corto o prolongado, de fuertes lluvias.

Puede ocurrir que una inundación repentina se deba a la llegada de un evento aislado, como puede ser el caso de los ciclones tropicales o el paso de un sistema frontal, pero a menudo, las inundaciones repentinas se forman por un evento de lluvia que se inicia en un punto alto de montaña o en el inicio de una cuenca y discurre hacia aguas abajo inundando la cuenca.

A lo largo del trabajo, se desarrolla el estudio de los eventos de inundaciones repentinas ocurridos en Omán, que son causados principalmente por periodos de lluvias intensas en zonas de montaña o debido a eventos esporádicos de ciclones, analizaremos sus consecuencias para una propuesta de soluciones mitigadoras de daños durante futuros eventos.

Son muchos los países que realizan estudios de investigación para poder estimar el riesgo que podría causar este tipo de eventos a largo plazo y poder trabajar y actuar en consecuencia.

La cuestión de si el riesgo de inundaciones repentinas está aumentando, en general, permanece abierta, al menos en lo que se refiere a aspectos hidrometeorológicos. En la mayoría de países son principalmente otros factores (antropogénicos) los que han aumentado y siguen aumentando el riesgo de inundación.

Son causas que favorecen el riesgo:

- Aumento de los asentamientos y usos recreativos en las zonas de montaña.
- Invasión de áreas bajas, con tendencia a ser inundadas, con construcciones de viviendas e infraestructura.
- Desarrollo de áreas urbanas que afectan, interponiéndose, a las vías naturales de drenaje y aumentan la proporción de zonas pavimentadas, creando así grandes áreas de zonas impermeables que favorecen la escorrentía.
- Incremento del número de vehículos que requieren el aumento de redes de carretera e infraestructura en zonas de montaña, así como en la costa. Considerándose estas áreas como críticas ante cualquier evento de inundación.
- La degradación de las cuencas, que conduce a un aumento de la sedimentación, con lo cual, por un lado, se reduce la capacidad de transporte en el recorrido de las cuencas debido a la disminución de la sección y por otro lado se incrementa el riesgo de transporte de materiales

depositados, pudiendo esto ser una consecuencia de graves daños cuando la velocidad del agua es muy elevada.

Las características que presentan las inundaciones repentinas son:

- Se producen de repente, con poco tiempo de aviso.
- Son eventos rápidos, generalmente violentos, lo que resulta en una gran amenaza para la vida y se materializa en daños severos a la propiedad y a la infraestructura.
- Son generalmente pequeños en escala con respecto al área de impacto.
- Frecuentemente se asocian con otros eventos.

I.IV Zonas geográficas de Omán

Regiones

El sultanato de Omán está localizado en una gran parte del sureste de la Península Arábiga; con la excepción del extremo noroeste, se encuentra dentro del Trópico de Cáncer. Hace frontera con Emiratos Árabes Unidos en su parte noroeste, con Arabia Saudí en su lado oeste y con Yemen al suroeste.

El país tiene una extensión de aproximadamente 309.500 km² y 1.800 km de línea de costa.

Omán está dividido en ocho regiones que se gobiernan de manera independiente, cuya división se muestra en la Figura 7. La capital del país se encuentra en la región de Muscat y adquiere el mismo nombre.

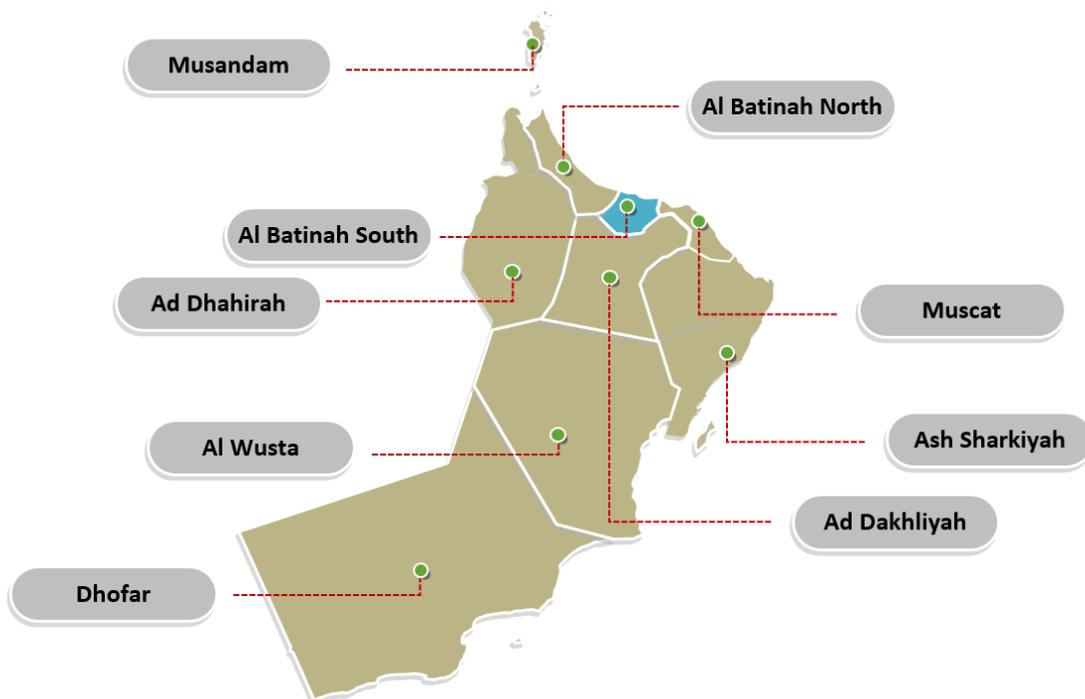


Figura 7. División de regiones gobernadas independientemente.

Este trabajo se centra en la región de Al-Batinah South, por ser la más poblada y la que mayor riesgo presenta en eventos de inundaciones, al ser la falda y desembocadura de las montañas del Norte de Hajar que se describen a continuación.

El paisaje de Omán está formado por una topografía única, formada y caracterizada por la erosión; presenta clima árido a semi árido.

Las montañas de Omán están compuestas de ofiolita y piedra caliza en su mayoría, formando escarpados acantilados y profundos valles, mientras la línea de costa posee áreas de costa rocosa y playas de arena.

Paisaje

A continuación, se hace referencia a las principales áreas del paisaje natural de Omán para ofrecer al lector una visión adecuada de la orografía característica que conforma el paisaje de las zonas de estudio:

1. Las montañas del Norte Hajar:

Las escarpadas montañas Hajar en el norte de Omán, se extienden 700 km desde la península de Musandam hasta Ras al Hadd en la costa este. Estas, están separadas en un rango este y oeste por Wadi Samail, a través del cual discurre la única autovía que cruza de Norte a Sur.

Estas montañas llegan a alcanzar los 3000 metros de elevación sobre el nivel del mar en su punto más alto. En la Figura 8 se puede apreciar la extensión que presenta esta cordillera, así como su área de mayor elevación.



Figura 8. Mapa topográfico. Encuadre montañas Norte de Hajar.

2. Wadis:

Las montañas de la península arábiga conforman profundas y disecadas zonas planas de wadis que conectan pueblos remotos. También presentan zonas de cañones en las partes más elevadas. La mayoría de los wadis recogen el agua de las lluvias e inundaciones instantáneas en acuíferos que posteriormente son visibles en forma de manantiales, cursos de agua permanente y en algunos casos llegan a formar pozas o piscinas superficiales, como se aprecia en las Figuras 9 y 10.



Figura 9 y 10. Imágenes de Wadi Bani Khalid. Oman.

3. Asentamientos de Oasis:

En las zonas más fértiles de los wadis y las montañas, se establecen las áreas agrícolas, densamente pobladas. Estos oasis tienen en su elevación superior, estrechas terrazas que reciben grandes cantidades de agua anualmente para la sustentación de la explotación agrícola, actualmente muy extendida, pero a la vez técnicamente poco desarrollada; pueden verse sus características generales en la Figura 11.



Figura 11. Imagen de área de oasis y cultivos en Jabal Akhdar, Omán. Fuente: TripAdvisor. Abril 2016

4. La costa:

Omán posee 1800 km de línea de costa. Los 270 km de la costa norte desde Musandam a Muscat y el área sur de Ras al Hadd a Dhofar son principalmente playas de arena y marismas saladas con algunas elevaciones de piedra caliza. Las Figuras 12 y 13 muestran dos ejemplos el paisaje descrito. La costa noreste, se caracteriza por pronunciados salientes rocosos que desembocan en el golfo de Omán. Los 800 km de costa sur, en la región de Dhofar poseen



amplias dunas de arena, y hacia la frontera con Yemen, rocosos acantilados, que descienden abruptamente al mar arábigo. Estos elementos son los que conforman el paisaje costero.

Figuras 12 y 13. Imagen de tipologías zonas costeras, Omán.

5. Desierto de arena

Existen dos áreas principales de desierto de arena. Al Sharqiyah Sand, al este de Omán, y Rub al Khali que se sitúa a lo largo de la frontera con Arabia Saudí y Emiratos Árabes Unidos. Estas áreas se caracterizan por un extremado clima seco. Se muestra una imagen característica del paisaje en la Figura 14.



Figura 14. Imagen del desierto Al Sharqiyah, Omán.

6. Desierto de grava

Los desiertos tierra adentro, así como la mayoría de la planicie de costa del norte de Dhofar, más allá de las áreas afectadas por el monzón, consisten en zonas abiertas de desierto de grava, recibiendo menos de 100 mm de lluvia anual.

Estas zonas presentan un terreno rocoso de piedra caliza, arena y esquistos con dispersas capas de suelo. Se muestra una imagen característica del paisaje en la Figura 15.



Figura 15. Imagen del desierto de grava, Al Wusta, Omán. Fuente:

https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Ond%C5%99ej_%C5%BDv%C3%A1%C4%8Dek/Om%C3%A1n

I.V Breve introducción a la gestión de recursos hídricos del país

AGUAS SUPERFICIALES:

El volumen total estimado de aguas superficiales en todo el país es de 102 millones de metros cúbicos, este volumen se corresponde con el 6% del total del agua empleada para usos convencionales y solo se encuentra en los embalses de presas.

En la imagen se muestra la única presa de hormigón construida en Oman, situada en Wadi Dayqah. Su construcción y puesta en marcha, ha demostrado que incluso en wadis efímeros o casi efímeros, se puede crear un recurso de agua adicional, además de favorecer la regulación en periodos de avenida.



El embalse tiene una capacidad de almacenamiento de 100 millones de metros cúbicos, prácticamente la totalidad de agua superficial embalsada en todo el país.

Figura 16. Imagen del aliviadero presa de hormigón Wadi Dayqah, Omán. (<https://arq.co.za/?p=224>).

SISTEMAS FALAJ:

Son conjuntos de canales que surgen en las montañas y se construyen con el objetivo de que el agua subterránea entre en el canal, o en galerías subterráneas construidas para el mismo fin, y por gravedad pueda ser distribuida entre las distintas poblaciones existentes en las zonas de montaña; en la Figura 17 se muestra un sistema de falaj superficial de gravedad.

Existen más de 3000 unidades de estos sistemas en Oman, con una media de suministros de agua de 552 millones de metros cúbicos al año, estimándose unas pérdidas por salidas infortuitas en la trayectoria del canal de 128 millones de metros cúbicos al año. Es decir un 23% del agua que se transporta se va perdiendo por el camino durante su trayectoria por el interior del falaj.

Hasta 1970 no existía infraestructura hidráulica alguna en todo el país, únicamente los Falaj, en las zonas de montaña; es a partir de este momento cuando se intenta establecer una política de gestión y se van introduciendo redes de abastecimiento de agua pero que a día de hoy no cubren todas las áreas de población, y aún se emplean depósitos en la parte superior de las viviendas y edificios que son abastecidos mediante camiones cisterna para dar servicio a toda la población.

Tras la mención de las redes de abastecimiento, es de destacar también que Omán no dispone de red de alcantarillado en ninguno de sus asentamientos de población ni tampoco de redes de saneamiento. La retirada de aguas residuales se hace también mediante camiones cisterna que vacían grandes fosas sépticas de las comunidades y las transportan a la depuradora más cercana.



Figura 17. Imagen del sistema de falaj superficial, Omán

AGUA SUBTERRÁNEA:

Omán, partiendo de su característica principal de ser un país árido, presenta grandes acuíferos que actualmente se explotan para satisfacer las demandas de agua, pero la extracción presenta cifras por encima de la recarga de los mismos.

La región de Al- Batinah, en la que se encuentra nuestra cuenca de estudio, es la región más poblada y a su vez la más desarrollada e industrializada. Es también la región que más cultivos produce de todo el país.

A mediados de 1970, el gobierno pone en marcha extensos estudios de aguas subterráneas, con el fin de obtener medidas que le permitan aumentar su oferta de recursos, racionalizar el consumo y solicitar a las comunidades la conservación del recurso.

Omán es casi en su totalidad, debido a sus condiciones de clima árido, dependiente de la lluvia para satisfacer el suministro de agua para consumo humano y la recarga de acuíferos. El agua de lluvia, como sabemos es muy limitada, y las lluvias varían considerablemente dependiendo de la zona del país.

La precipitación media anual se estima en 5178 millones de metros cúbicos anuales, de los cuales el 28% se pierde en la escorrentía. Las elevadas temperaturas hacen que el 48% del agua de lluvia se evapore, quedando por tanto una recarga estimada de acuíferos, para estos datos, de 1240 millones de metros cúbicos.

Para suplementar los usos domésticos en el área de la capital o y otras pequeñas zonas, se han construido diferentes plantas desaladoras.

El consumo de agua para riego demanda el 92% del consumo total de agua en el país. Este consumo se incrementa cada año de manera considerable debido al incremento de la producción. El Ministerio de Recursos Hídricos establece un consumo aproximado anual de 100 millones de metros cúbicos para uso en la agricultura.

El agua subterránea en Omán es la principal fuente de agua para fines de consumo, uso doméstico, industrial y agrícola.

Está muy extendida la realización de pozos para la captación del recurso debido a su disponibilidad en el subsuelo; estos pozos, gestionados por la entidad pública PAEW, Public Authority for Electricity and Water cubren el 20% del suministro.

Existen campos de pozos conectados con sistemas primarios de abastecimiento de agua a la población y otros sistemas de pozos simples o aislados que se conectan a sistemas más reducidos como, por ejemplo, para abastecimiento de áreas rurales.

Existen aproximadamente unos 750 pozos suministrando agua a diferentes sistemas de distribución.

La escasez de agua, la disminución del nivel freático y el aumento de la salinidad son problemas que conducen a un aumento de los costos de los cultivos de regadío, debido a la energía necesaria para extraer y distribuir agua.

El bombeo de agua subterránea a la superficie, en zonas costeras está permitiendo la intrusión hacia los acuíferos del agua del mar, resultando en la contaminación del agua dulce subterránea con agua salada. El agua dulce es menos densa, con lo cual, si se produce la intrusión y ambos tipos de agua comparten sitio en el acuífero, el agua salada se superpone al agua dulce, quedando esta en el fondo del mismo, lo cual supone la necesidad de mayores profundidades de extracción, así como un problema si el terreno ya ha sido afectado o presenta salinidad.

En la costa de Al-Batinah, el fenómeno está altamente manifestado. En ciertas áreas esta intrusión provocó que el agua de pozo no fuera apta para uso doméstico y, en última instancia, para uso agrícola.

Además, el uso de fertilizantes, los pesticidas y otras sustancias químicas pueden causar contaminación del agua subterránea. En este sentido, el uso de químicos de fertilizantes creció de casi cero antes de 1970 a un promedio de 15 miles de toneladas en 1990.

FUENTES NO CONVENCIONALES

AGUA DESALADA:

La desalación ha surgido como el mayor recurso utilizado para uso doméstico, y de acuerdo con las estrategias en materia de recursos hídricos del país, en los próximos años deberá cubrir la mayor parte de la demanda doméstica.

A final de 2011, había en Omán, 94 plantas desaladoras, produciendo un total de 194 millones de metros cúbicos al año, que se convirtieron en 214 millones en 2014 y 268 millones de metros cúbicos producidos en 2016.

La primera planta desaladora, entró en operación en 1976. La tarifa media en 2017 rondaba los 1,25 dólares por metro cúbico.

El crecimiento de la demanda anual se espera entre un valor comprendido entre 5% y 7%. Basándose en datos de 2015, el volumen total de agua desalada fue de 281 millones de metros cúbicos, por tanto, alcanzaría para 2022 una cifra comprendida entre 390 y 440 millones de metros cúbicos de producción. Se afirma que este recurso aun presenta diferentes retos y mejoras que afrontar, como son, reducir el alto coste y la energía requeridos, disponibilidad de mayores volúmenes de almacenamiento para situaciones de emergencia, reducción de pérdidas en las redes de suministro que están estimadas en un 30% de la producción y evitar los cierres eventuales de las instalaciones por peligro de floración de algas.

AGUA REUTILIZADA:

El número actual de depuradoras se cifra en 150 unidades, con un volumen de depuración de 42 millones de metros cúbicos anuales. Sólo un tercio de estas instalaciones son gestionadas por organismos públicos, el resto recae en empresas privadas. Actualmente, el agua depurada es reutilizada para el riego de jardines en las principales ciudades. En la zona sur del país, este exceso de agua también se emplea para la recarga de acuíferos costeros, para evitar la intrusión del agua salada del mar en los mismos.

Un porcentaje muy elevado del agua residual es producido por la actividad de las compañías petrolíferas, ya que se necesita un volumen de nueve barriles de agua por cada barril de petróleo que se extrae, y posteriormente esta agua tiene que ser depurada.

CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

A continuación, se muestra un análisis básico de los parámetros y características de la cuenca.

Wadi Al Fara

Cuenca	AL FARA
Área(m ²)	1172.701.319,11
Área (km ²)	1172,70
Perimetro(km)	208,31

Tabla 1. Dimensiones cuenca Wadi Al Fara, Omán.

La elevación máxima que presenta la cuenca se sitúa en torno a los 2500 metros de altitud sobre el nivel del mar, siendo la máxima elevación que presenta flujo de agua 952 m.

Las imágenes que se muestran en la Figura 18 corresponden a:

- Ráster de superficie de la cuenca con las principales líneas por las que discurre el agua.
- Ráster del flujo de agua que muestra las elevaciones a lo largo de su recorrido en la cuenca.

Los principales asentamientos que podemos encontrar son Al Mussanah con 6.291 habitantes (2010), en la línea de costa y Rustaq con una población de 120.000 habitantes (2017), situada en el interior.

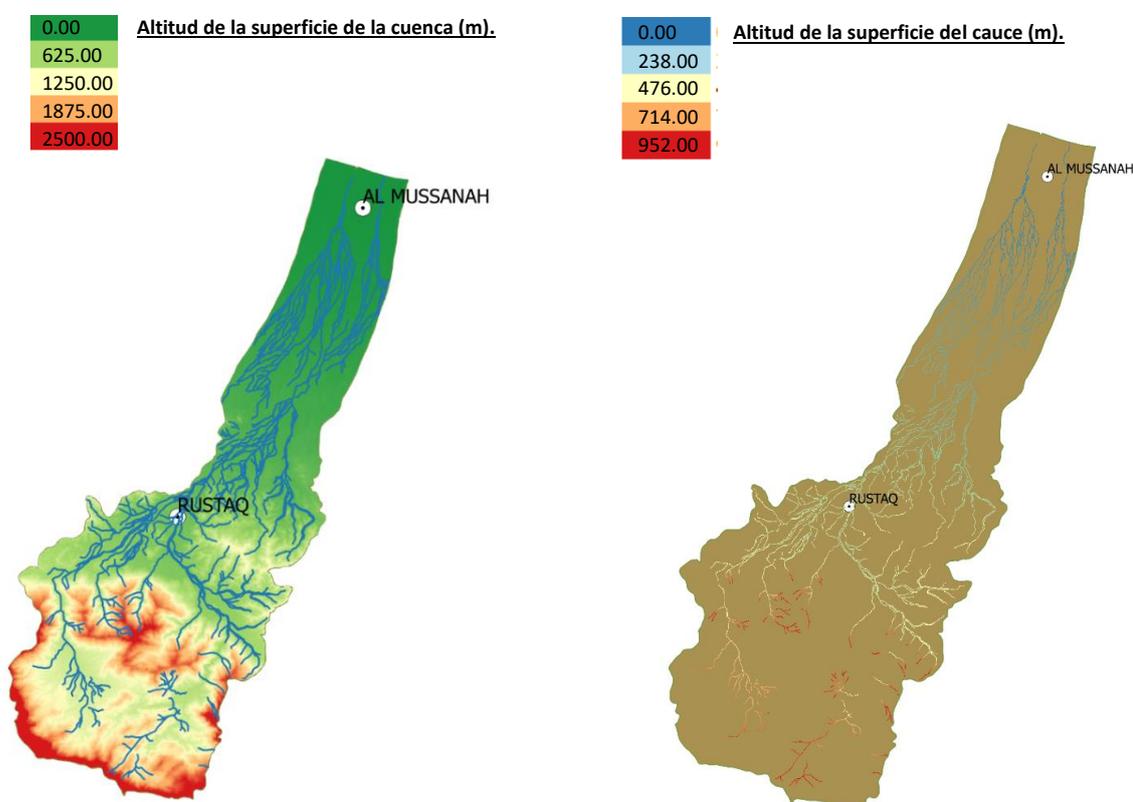


Figura 18. Ráster de superficie de la cuenca y ráster de las líneas de cauce por las que discurre el agua con distribución de elevaciones por colores en Wadi Al Fara.

Se observa claramente dos tipos de orografía de la cuenca; siendo desde aproximadamente la mitad de la longitud hacia aguas arriba un terreno accidentado, con elevadas montañas que discurren paralelas a la costa y que por tanto favorecen las precipitaciones orográficas o convectivas y por otro lado, desde el centro de la cuenca hacia aguas abajo y hasta la desembocadura de la misma, discurren terrenos llanos, en los que predominan llanuras aluviales, sin importantes asentamientos de población.

Para el análisis del modelo hidráulico, que se detalla en el siguiente capítulo, se ha seleccionado una parte del total del área de la cuenca, con el objetivo de concentrar el cálculo en un área que por sus características presenta problemas reales de inundación en la actualidad. El encuadre se corresponde con la superficie por la que discurren las subcuencas que desembocarían en la población de Rustaq, una zona, que por su situación geográfica, situada en la falda de las Montañas del Norte de Hajar, se ve afectada por la alta velocidad de llegada del agua de las montañas, la cual se reduce a su paso por la población al llegar a la llanura que presenta la cuenca con la consecuente reducción de la velocidad de evacuación de la inundación que las fuertes lluvias dejan a su paso por el municipio en episodios de inundaciones repentinas. La morfología de los cauces presenta multitud de formas. Por lo general, las cuencas comienzan en alta montaña con escarpados cañones rocosos, que se van abriendo en su recorrido, pasando por tramos intermedios de cauce diferenciado con lechos rocosos y de grava de gran tamaño y llegando a llanuras de grava, reduciendo el tamaño de los áridos hasta llegar a la zona arenosa en la costa y finalmente a su desembocadura en el mar.

Con esta información se ha calculado el **Tiempo de concentración**.

El tiempo de concentración T_c de la cuenca, es definido como el tiempo necesario para que una gota de agua viaje desde el punto más alejado de la cuenca al punto de diseño o punto de salida aguas abajo. Físicamente, el tiempo de concentración es usado para el diseño de la duración de la tormenta, y ello afecta a la forma del hidrograma de inundación.

El T_c puede ser estimado utilizando la fórmula de Kirpich, dada por:

$$T_c = \frac{1}{52} * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$$

Donde,

T_c es el tiempo de concentración en minutos.

L es la longitud en proyección horizontal de la cuenca de drenaje a lo largo del curso de agua principal.

H es la diferencia de elevación entre el punto más alejado del área de drenaje y el punto de recogida, en metros.

Con los datos existentes, se obtiene el siguiente valor de T_c , definido hasta la población de Rustaq:

$$T_c = \frac{1}{52} * \frac{58555^{1.155}}{952^{0.385}} = 440,31 \text{ minutos} \approx 7,3 \text{ horas}$$

CAPÍTULO III. HIDROLOGÍA.

II.I Patrones climáticos y zonas hidrológicas

La precipitación es la principal fuente de agua de la superficie terrestre, y sus mediciones son el punto de partida de la mayor parte de los estudios realizados en torno al uso y control del agua.

Los tipos de lluvia dependen principalmente del lugar donde se produzcan, es decir, depende de la zona y los factores climáticos que en ella se desarrollen: la **temperatura**, la **humedad**, los **vientos** y principalmente de la **humedad atmosférica**.

En función de su intensidad, comúnmente la lluvia se caracteriza por ser mostrada por cantidad de precipitación por hora, siendo la manera más conocida de medir: **milímetros por hora**. Así, se identifican las siguientes variantes:

- Débiles:** menos de 2 mm/h
- Moderadas:** entre 2 y 15 mm/h
- Fuertes:** entre 15 y 30 mm/h
- Muy fuertes:** entre 30 y 60 mm/h
- Torrenciales:** más de 60 mm/h

En función de cómo se desarrollen en el espacio, podremos encontrar los siguientes tipos de precipitaciones:

- Orográfica
 - Convectiva
 - Ciclónica
- La precipitación orográfica se produce cuando una corriente de aire es forzada a ascender cuando encuentra en su camino una elevada forma del terreno, ya sea una sola montaña o una cordillera.
- La precipitación convectiva tendrá lugar cuando el aire se eleve por si mismo debido a su aumento de temperatura, dando lugar a corrientes de convección. Son frecuentes en verano, cuando el aire cercano al suelo se calienta rápidamente a causa del calor desprendido por la tierra y el irradiado por el sol, con lo que se vuelve más liviano que el aire que lo rodea y asciende, llegando a formar nubes de tormenta.
- La precipitación ciclónica podemos explicarla como sigue, una corriente puede elevarse cuando dos masas de diferentes tipos de aire (caliente-frío) se encuentran formando un frente, que es el límite que separa una región de aire caliente de uno frío. Si esas dos masas se mueven a distintas velocidades, la más cálida se desliza sobre el frente ascendiendo a niveles superiores. A medida que el aire se eleva se forman diferentes tipos de nubes, siendo más espesas cerca de la superficie generando precipitaciones en la parte baja.

II.II Características de las precipitaciones en Omán

Omán experimenta una combinación de mecanismos de lluvia a lo largo de todo el año, que resumimos a continuación:

- **Frentes fríos:** tienen lugar durante el invierno, entre los meses de octubre a abril, caracterizados por: la ocurrencia en grandes extensiones de terreno, su baja intensidad y larga duración.

Cuando una masa de aire frío y de aire caliente se encuentran, estas no se mezclan entre sí, provocando lo que se denomina un frente, que es la superficie de discontinuidad de ambas masas de aire.

Un frente frío se produce cuando la masa de aire frío avanza sobre la de aire caliente. El aire frío empuja al caliente, produciendo una discontinuidad casi vertical y provocando de esta manera una rápida ascensión de la masa de aire caliente, y, en consecuencia, precipitaciones de gran intensidad. Se represente su esquema en la Figura 19.



Figura 19. Esquema de desplazamiento de un frente frío. (CK-12 Foundation. Christopher Auyeung. <https://dr282zn36sxxg.cloudfront.net/datastreams/f-d%3A05de8791822721116edf43caa146fb2b653c50d1bec40a0645515520%2BIMAGE%2BIMAGE.1>).

- **Lluvias monzónicas:** originadas por la humedad del Océano Índico y el Mar Árabe, causando lluvias ligeras pero frecuentes, lloviznas, desde finales de junio a finales de septiembre (Khareef).
- **Ciclones tropicales:** originados en el Mar Árabe durante los meses de mayo, junio, octubre y noviembre, consistiendo en bandas de fuertes lluvias localizadas dentro de una gran área prominentemente en el sur del país.

Un ciclón es una región de baja presión hacia la cual el aire fluye en sentido antihorario en el hemisferio norte y viceversa. (Un anticiclón, por el contrario, es una región de alta presión a partir de la cual el aire fluye en sentido horario en el hemisferio norte y viceversa).

Cuando las masas de aire se elevan durante su movimiento en la atmósfera, la humedad que contienen se condensa y producen la precipitación.

- **Tormentas convectivas:** caracterizadas por su dispersión, alta intensidad y corta duración, a menudo resultando en inundaciones repentinas, no estando determinadas para un tiempo o estación concretos.

La Figura 20 muestra un esquema de la distribución temporal de los tipos de lluvias.



Leyenda:

Frentes fríos	
Lluvias Monzónicas	
Ciclones tropicales	

Figura 20. Distribución anual, por meses, de los distintos patrones de lluvia en Omán.

Las características geográficas del país permiten que en toda su extensión de superficie exista una gran diferencia en cuanto a cantidad y distribución de las precipitaciones.

Las precipitaciones corresponden a uno de los elementos climáticos que, de manera más directa, influye en la configuración del medio natural, siendo la principal aportación de agua a una cuenca, donde su distribución, tanto temporal como espacial, condiciona los ciclos productivos, por lo que es un elemento vital para el asentamiento de poblaciones humanas, que basan su actividad productiva en ellas.

Sin embargo, contraria a dicha importancia, aparece una serie de dificultades en el estudio de las precipitaciones; entre ellas, la irregularidad con que se presentan, lo cual se acentúa en los lugares de transición climática, donde los valores medios son muy poco significativos y se precisa el estudio de series bastante largas para poder evaluarlas y caracterizarlas.

De esta manera, una forma de identificar las precipitaciones es a través de la intensidad de precipitación, que representa la cantidad de lluvia caída en función del tiempo, expresada normalmente en mm/h. Así, es posible relacionar dicha intensidad con la frecuencia con que ocurre y con la duración, a través de técnicas estadísticas que relacionan estas tres variables, obteniéndose las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (curvas IDF), que están construidas en base a intensidades máximas.

Estas curvas juegan un rol importante, al permitir establecer intensidades de diseño, asociadas a un periodo de retorno y a una determinada duración de lluvia, ya que la cantidad total de precipitación registrada en un lugar por unidad de tiempo puede tener efectos muy diferentes en función de su intensidad, pues un incremento en el total de las intensidades resulta en un aumento en el volumen de escorrentía, y por consiguiente, en un mayor caudal.

Por su parte, los eventos extremos, con intensidades de precipitación muy altas, son poco frecuentes, pero cuando ocurren, pueden tener consecuencias desastrosas como ya hemos comentado con anterioridad.

De este modo, por medio del análisis de las curvas IDF, es posible obtener intensidades de diseño, asociadas a distintas duraciones y periodos de retorno, lo que resulta fundamental para el dimensionamiento de numerosos proyectos de control y evacuación de crecidas que requieren de un diseño hidrológico, para los cuales se debe conocer la probabilidad de que se produzcan determinados valores de intensidad de precipitación que representen riesgo (Pizarro, et al., 2001).

Por tanto, para evaluar adecuadamente el comportamiento de las precipitaciones, es necesario conocer las relaciones entre las cuatro características principales de la precipitación: la intensidad, la duración, la frecuencia y su distribución.

Así, las lluvias intensas son aquellas que registran un gran volumen de agua precipitada en periodos de tiempo breves. Este tipo de precipitación puede causar perjuicios materiales y humanos considerables. Por su parte, la intensidad de precipitación corresponde a las diferencias sucesivas de las medidas de precipitación acumuladas (ΔP), divididas por el intervalo de tiempo (Δt), por lo que la intensidad máxima se determina calculando las intensidades corrientes, pertenecientes a una serie de datos para un intervalo de tiempo determinado, para posteriormente seleccionar el valor máximo de ese conjunto de datos (Chow et al., 1994).

En cuanto a la duración de un evento de precipitación, esta se define como el tiempo que transcurre desde que se inicia la precipitación, hasta que esta cesa (Pereyra et al., 2004).

Otra variable en estudio es la frecuencia, que corresponde a la repetición de eventos de características similares en intensidad y duración (Coras et al., 2001). Esta definición va en directa relación con el periodo de retorno, el que se define como el número de años promedio que transcurre para que un evento sea igualado o excedido (Linsley et al., 1977). Pizarro et al. (1986), definen al periodo de retorno (T) como el inverso de la probabilidad de ocurrencia de un evento x, el que se expresa de la siguiente forma:

$$T = \frac{1}{P(x > X)}$$

II. III Definición de las curvas INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (IDF)

A lo largo de la bibliografía consultada, encontramos diferentes definiciones que hacen referencia a la determinación de las curvas IDF (Figura 21), algunas de las cuales se exponen a continuación:

Témez (1978): aquellas curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes, todos ellos, a una misma frecuencia o periodo de retorno.

Benitez (2000): estas curvas corresponden a la representación gráfica de las relación que existe entre la intensidad y la duración, asociado a la frecuencia o período de retorno de la precipitación.

Mintegui y López (1990), las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y a la altura o intensidad de precipitación en las ordenadas, donde cada curva representada corresponde a una frecuencia (o periodo de retorno), de tal forma que las gráficas de estas curvas representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico periodo de retorno.

Nanía (2003): Son curvas que relacionan la intensidad de la lluvia con su duración, donde para cada periodo de retorno, se tiene una curva diferente.

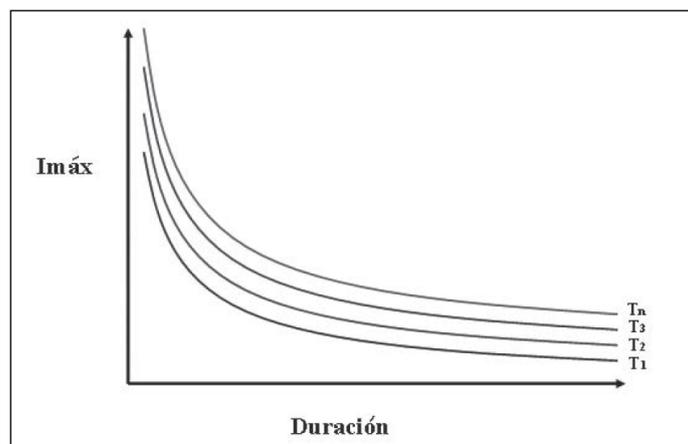


Figura 21. Curva Intensidad – duración - frecuencia.

En la figura se observa como la intensidad decrece a mayor duración, y a su vez, para una tormenta de cualquier duración, se tendrá mayor intensidad a mayor periodo de retorno.

Para la construcción de estas curvas es necesario realizar análisis de frecuencias de lluvias intensas. En este sentido, la distribución más utilizada es la de valores extremos tipo I o de Gumbel.

Las intensidades que se obtienen para cada duración, derivados del análisis realizado a los pluviómetros, son características para cada zona.

El periodo de retorno considerado será mayor, cuanto mayor sea la importancia y la repercusión social, ecológica y económica de la obra o estudio. Por ello, la necesidad de disponer de amplios periodos de retorno contrasta con la disponibilidad de series de datos climatológicos, razón por la cual es necesario recurrir a estimaciones estadísticas.

Se detecta normalmente un problema a la hora de determinar las intensidades máximas de precipitación, debido a la falta de disponibilidad de pluviógrafos, que son los instrumentos que proporcionan datos en intervalos de tiempo adecuados a las necesidades de los estudios. Debido a esta situación, lo que se utiliza, normalmente, son pluviómetros, que miden las alturas totales para intervalos grandes (generalmente 24 horas), asumiendo con esto, que el comportamiento de la intensidad en ese intervalo de tiempo es constante. (Mintegui y Robredo, 1993)

Aplicación de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia

Las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia, son de gran utilidad para el diseño hidrológico de caudales máximos cuando se utilizan modelos lluvia-escorrentía, como los hidrogramas unitarios o el método racional.

Basándonos en los diversos patrones de lluvia y la geografía y topografía del país, el Sultanato de Omán, puede ser dividido en tres zonas hidrológicas, las cuales se muestran en la Figura 22 y se describen a continuación:

1. La primera zona está localizada en el norte de Omán (Incluyendo todas las regiones, excepto Al Wusta y Dhofar), principalmente afectada por tormentas convectivas y raramente ciclones.

2. Al sur, la región de Dhofar, principalmente afectada por el Monzón, tormentas convectivas y ciclones.
3. Región de Al Wusta, experimenta un patrón de tiempo y lluvia que combina características de las dos regiones anteriores.

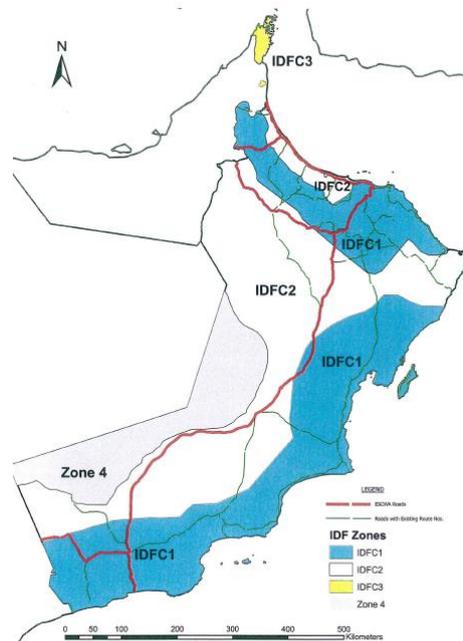


Figura 22. Diferentes zonas de las curvas IDF generadas.

(Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

La figura anterior nos muestra el área en la que son válidas cada una de las curvas IDF generadas que se muestran a continuación.

Existe una zona para la que no se tienen registros que está clasificada como Zona 4, en la cual se recomendaría usar las curvas IDFC2, curvas de baja intensidad, en caso de que fuese necesario.

En ausencia de datos de escorrentía registrados en las cuencas de estudio, se requiere el uso de métodos de transformación lluvia escorrentía. Los métodos utilizados en esta área geográfica y que han sido definidos para la misma son:

- El método racional
- Método hidrograma unitario del servicio de conservación de suelos (SCS)
- Ecuaciones de regresión

Cuando los datos de escorrentía se encuentran disponibles, frecuentemente se realizan análisis de picos de descarga y volúmenes, los cuales son usados en conjunto con los métodos de transformación de lluvia escorrentía.

Estos métodos necesitarán de los datos de lluvia que se pueden extraer de las curvas resultantes de Intensidad, duración, frecuencia que se muestran a continuación:

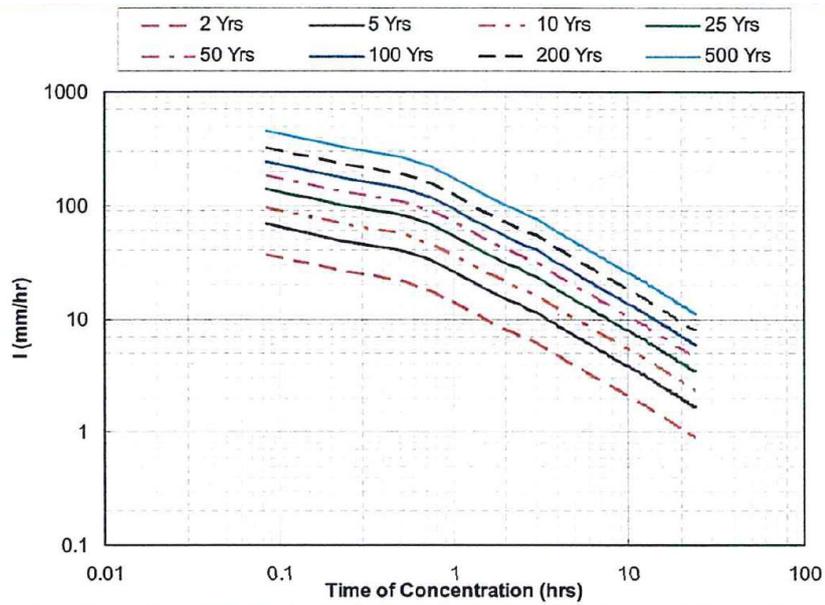


Figura 23. Curvas IDF generadas para Zona 1. Zonas de alta intensidad.
 (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

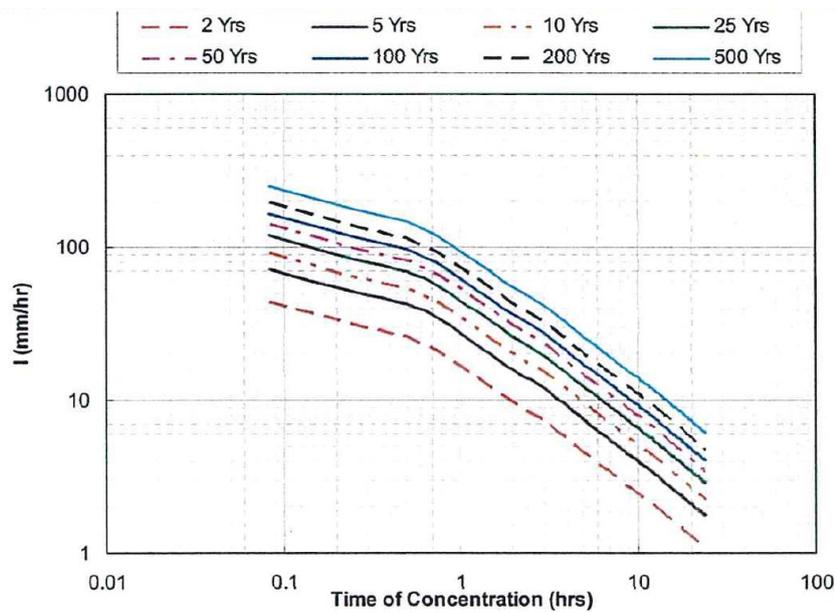


Figura 24. Curvas IDF generadas para Zona 2. Zonas de baja intensidad.
 (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

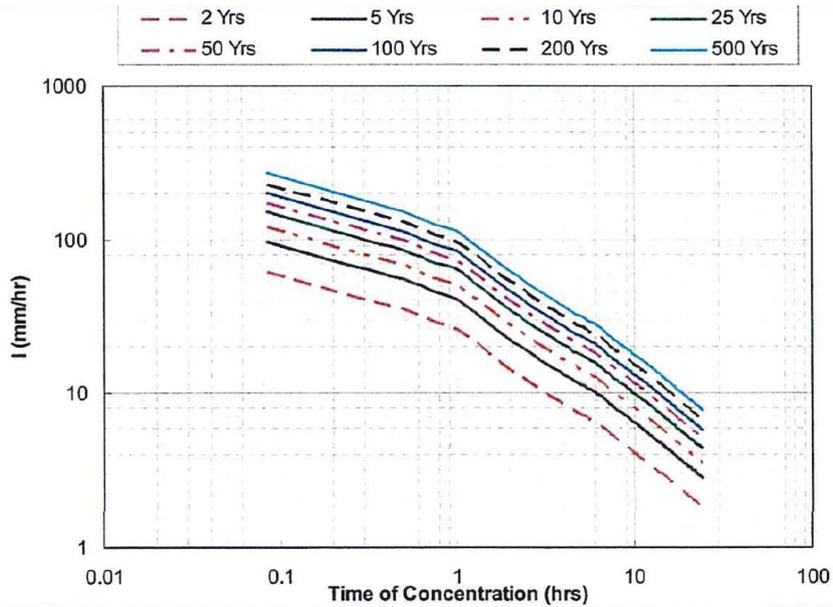


Figura 25. Curvas IDF generadas para Zona 3. Área norte del Sultanato- Región de Musandam. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Existen diversas expresiones matemáticas que simulan las curvas IDF en función de la zona geográfica en la que nos encontremos, y que han sido formuladas a lo largo del tiempo por diferentes autores. En este caso la forma general de la ecuación de IDF, mediante la que se han generado las curvas IDF, es

$$I = aT^b$$

Donde,

I, es la intensidad de lluvia (mm/h).

a, *b*, son las constantes mostradas en la Tabla 2.

T, (tiempo) es la duración de la tormenta, equivalente al tiempo de concentración basado en las suposiciones de la fórmula racional.

IDF 1						
	100 Años		50 Años		25 Años	
Tiempo (h)	a	b	a	b	a	b
<0.75	110,55	-0,326	84,405	-0,326	64,066	-0,326
0.75<=T<6	94,926	-0,808	72,478	-0,808	55,013	-0,808
>=6	116,23	-0,928	88,742	-0,928	67,358	-0,928
	10 Años		5 Años		2 Años	
Tiempo (h)	a	b	a	b	a	b
<0.75	43,418	-0,326	30,995	-0,326	16,695	-0,326
0.75<=T<6	37,283	-0,808	26,615	-0,808	14,336	-0,808
>=6	45,649	-0,928	32,588	-0,928	17,553	-0,928
IDF 2						
	100 Años		50 Años		25 Años	
Tiempo (h)	a	b	a	b	a	b
<0.75	75,224	-0,326	63,79	-0,326	53,753	-0,326
0.75<=T<6	64,595	-0,808	54,776	-0,808	46,157	-0,808
>=6	79,09	-0,928	67,068	-0,928	56,515	-0,928
	10 Años		5 Años		2 Años	
Tiempo (h)	a	b	a	b	a	b
<0.75	41,652	-0,326	32,675	-0,326	19,994	-0,326
0.75<=T<6	35,767	-0,808	28,058	-0,808	17,169	-0,808
>=6	43,793	-0,928	34,354	-0,928	21,022	-0,928
IDF 3						
	100 Años		50 Años		25 Años	
Tiempo (h)	a	b	a	b	a	b
<0.75	108,16	-0,326	94,511	-0,326	81,713	-0,326
0.75<=T<6	92,881	-0,808	81,156	-0,808	70,166	-0,808
>=6	113,72	-0,928	99,367	-0,928	85,912	-0,928
	10 Años		5 Años		2 Años	
Tiempo (h)	a	b	a	b	a	b
<0.75	65,365	-0,326	52,756	-0,326	33,589	-0,326
0.75<=T<6	56,129	-0,808	45,301	-0,808	28,842	-0,808
>=6	68,724	-0,928	55,467	-0,928	35,315	-0,928

Tabla 2. Valores constantes para ecuaciones IDF para las tres zonas hidrológicas.
(Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Una comparación de los eventos de lluvia en Omán, incluidos los eventos de ciclones, sostiene que los resultados obtenidos para las curvas IDF, especialmente si analizamos las cuencas con tiempos de concentración menores a dos horas, no varían de forma considerable.

Para estudios de escorrentía, se recomienda incluir datos de ciclones de las estaciones de medición más próximas al lugar de estudio.

Para nuestro caso de estudio, emplearemos el método del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), debido a que los datos de escorrentía y lluvia analizados no presentan correlación y por tanto cualquier resultado que se desprenda de una interpretación de los mismos no se consideraría fiable.

Así, utilizaremos una intensidad de lluvia total dada para introducir en el modelo hidrológico, y estimaremos diferentes caudales para diferentes periodos de retorno a partir de las ecuaciones de regresión que se describen más adelante.

II.IV El Método racional

- **Modelos de transformación lluvia-escorrentía.**

Debido al tamaño que presenta la cuenca de estudio, Wadi Al-Fara, el método a utilizar para su interpretación de caudales estará basado en los modelos de transformación de lluvia-escorrentía.

Para realizar la modelización del flujo en una cuenca uno de los datos más relevantes que se necesita conocer es el caudal que discurre por la misma. Dicho caudal depende directamente de los fenómenos de precipitación que se dan en la cuenca.

Generalmente es más sencillo disponer de registros de precipitación para una zona, que de aforos de caudales para cada una de las cuencas de la misma. Es relativamente fácil tener datos de precipitación de una zona debido a que la red pluviométrica suele ser bastante amplia en la mayoría de las regiones del mundo, por lo que se cuenta con más datos y más fiables de precipitaciones que de caudales. Por ello se utilizan modelos de transformación de lluvia-escorrentía que permiten estimar el caudal generado a partir de los datos de precipitación.

- **El Método racional**

Este método se emplea en todo el mundo para estimaciones del caudal punta en pequeñas cuencas rurales y es un método ampliamente usado para el diseño de drenajes urbanos. La fórmula racional estima el estado pico de escorrentía en cualquier ubicación y en una cuenca como una función del área de drenaje, coeficiente de escorrentía, y la media de intensidad de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración.

La fórmula racional es dada por la siguiente expresión:

$$Q = F k C i A$$

Donde,

Q: Caudal punta (m^3/s).

F: Factor relacionado con el periodo de retorno del evento en estudio.

k: Factor de conversión igual a 0.278.

C: Coeficiente de escorrentía.

i: Intensidad de lluvia para un tiempo de concentración y periodo de retorno de tormenta (mm/h) específicos, dada por las curvas IDF.

A: Área de captación que contribuye en el transporte del flujo, (km^2).

El factor *F*, relacionado con el periodo de retorno del evento estudiado es igual a:

- 1.0 Para periodo de retorno menor o igual a 10 años.
- 1.10 Para periodos de retorno de hasta 25 años.
- 1.20 Para periodos de retorno de hasta 50 años.
- 1.25 Para eventos con periodo de retorno de 100 años.

El coeficiente de escorrentía, *C*, es determinado de acuerdo con la tabla que se expone a continuación, para áreas urbanas;

TIPO DE AREA DE DRENAJE	COEFICIENTE DE ESCORRENTIA, C*
ÁREAS DE ACTIVIDAD	
Centros de ciudad	0.70-0.95
Barrios, areas circundantes a la ciudad	0.50-0.70
ÁREAS RESIDENCIALES	
Areas unifamiliares	0.30-0.50
Residenciales separados	0.40-0.60
Residenciales próximos	0.60-0.75
Suburbano	0.25-0.40
Areas de viviendas, ciudades dormitorio	0.50-0.70
ÁREA INDUSTRIAL	
Areas de baja densidad	0.50-0.80
Areas de alta densidad	0.60-0.90
Parques, cementerios	0.10-0.25
Zonas de recreo	0.20-0.40
Areas de infraestructuras - transporte	0.20-0.40
Areas desmejoradas	0.10-0.30
TERRENOS SIN ASENTAMIENTOS	
Terreno arenoso - plano <2%	0.05-0.10
Terreno arenoso - pendiente media 2-7%	0.10-0.15
Terreno arenoso - escarpado >7%	0.15-0.20
Terreno denso - plano <2%	0.13-0.17
Terreno denso - pendiente media 2-7%	0.18-0.22
Terreno denso - escarpado >7%	0.25-0.35
CALLES	
Asfalto	0.70-0.95
Hormigon	0.80-0.95
Baldosas	0.70-0.85
Transitables	0.75-0.85
Tejados	0.75-0.95

Tabla 3. Valores de coeficiente de escorrentía asociados con la formulación racional (ASCE, 1960).

Para áreas rurales, se deberá determinar conforme al siguiente criterio:

- Seleccionar C_A , C_B , C_C y C_D de la Tabla 4 en base a las características de la cuenca.
- Considerar los valores seleccionado de C_A , C_B , C_C y C_D para obtener el coeficiente de escorrentía C .

Cuando hemos de considerar diferentes superficies en el área de una misma cuenca de captación, determinaremos el coeficiente de escorrentía equivalente C mediante la siguiente ecuación:

$$C_{equivalente} = \frac{(C1*A1)+(C2*A2)+\dots+(Cn*An)}{(A1+A2+\dots+An)}$$

donde C_i es el coeficiente de escorrentía para el área de superficie A_i , siendo i el identificador de cada subcuenca.

Características de la cuenca			
CA Talud	CB Terreno filtrante	CC Cobertura vegetal	CD Superficie de almacenamiento
0.4	0.2	0.2	0.2
Terreno escarpado/accidentado: pendientes que superan el 30%	no hay cobertura eficaz del suelo, ya sea roca o capa delgada de infiltración insignificante	Sin cubierta vegetal efectiva, cubierta de suelo desnuda o muy escasa	Almacenamiento despreciable: pequeña depresión superficial poco profunda; vías de drenaje escarpadas y pequeñas, sin estanques ni pantanos
0.3	0.15	0.15	0.15
Accidentado, con pendientes medias entre 10 y 30%	Arcilla o tipos de suelo de baja capacidad de infiltración	Pobre a justo; cultivos limpios o una cubierta natural deficiente; menos del 10% del área bajo buena cubierta	Baja capacidad de almacenamiento; sistema de pozos bien definido o pequeñas vías de drenaje, sin embalses.
0.2	0.1	0.1	0.1
Ondulado con pendientes medias entre 5 y 10%	Normal, marga profunda	Buena cubierta, sobre el 50% del área comprende bosques densos	Capacidad de almacenamiento normal; almacenamiento en depresión superficial; típicos de praderas, lagos, estanques y pantanos menos del 20% de la superficie
0.1	0.05	0.05	0.05
Relativamente plano, pendiente media del terreno entre 0 a 5%	Arena profunda u otro suelo que absorbe agua instantánea y rápidamente	Excelente cubierta, sobre el 50% del área comprende bosques muy densos	Alta capacidad de almacenamiento, depresión de la superficie, grandes almacenamientos en superficie y gran número de embalses y pantanos.

Tabla 4. Valores de coeficiente de escorrentía en áreas rurales (ASCE, 1960).

La intensidad de lluvia es obtenida mediante las curvas IDF o formulación expuestas en el apartado anterior. El tiempo de concentración y el periodo de retorno de la tormenta se analizan a continuación.

Según las recomendaciones de algunos manuales, el método racional debería ser usado en cuencas que presenten un valor máximo de un área de drenaje de 1.3 km².

II.V Método del hidrograma unitario (SCS)

El método del hidrograma SCS es generalmente usado para estimar flujos de inundación en cuencas de mediana y gran extensión.

Este método tiene en consideración las características de la cuenca, en las cuales intervienen las condiciones de humedad, tipo de suelo, infiltración inicial de la lluvia, pendiente y longitud del canal de mayor longitud y el tratamiento superficial, así como el uso del suelo.

Las características de la cuenca son reflejadas por un valor definido como **Número de Curva (CN)**.

Este método se emplea cuando no existe la posibilidad de realizar aforos.

A continuación, se describen las características que se tienen en cuenta en el cálculo de avenidas para cuencas de tamaño medio, hasta 100 km² aproximadamente.

- **Hipótesis para el cálculo de avenidas:**

1º. La intensidad de la lluvia no es uniforme en el tiempo. La duración del aguacero de cálculo, relacionada con el tiempo de concentración de la cuenca, es suficientemente larga como para no poder asumir que la intensidad de la lluvia se mantiene constante a lo largo de su duración.

2º. La intensidad de la lluvia es uniforme en el espacio. Las características del aguacero de cálculo son las mismas en toda la superficie de la cuenca vertiente.

3º. En las escorrentías que generan la avenida, domina la escorrentía superficial por falta de infiltración.

4º. El cauce principal no tiene suficiente capacidad de almacenamiento de agua para cambiar la forma del hidrograma.

- **Número de Curva**

Es un método empírico, elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (1985).

Calcula la escorrentía producida por una determinada precipitación en función del parámetro “número de curva”, que a su vez depende de las condiciones de infiltración de la zona en que se produce la tormenta.

El “número de curva” se calcula a partir de una serie de tablas y gráficos, obtenidos en parcelas experimentales con diversidad de condiciones de suelo, vegetación y condiciones de infiltración, con simulaciones de precipitaciones en 24 horas.

Asume una proporcionalidad entre escorrentía y retención de agua en la cuenca, proponiendo la siguiente expresión:

$$\frac{Q}{P} = \frac{P - Q}{S} \frac{\text{Escorrentía real}}{\text{Escorrentía máxima}} = \frac{\text{Retención real}}{\text{Retención máxima}}$$

Siendo:

Q, la escorrentía producida (mm).

P, la precipitación (mm).

S, la capacidad de retención de agua máxima (mm).

La fórmula es:

$$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Donde:

CN es el número de curva.

S es la máxima profundidad de almacenamiento en mm.

Representa una relación empírica entre la precipitación y la escorrentía generada por esa precipitación.

La Figura 26 muestra la relación entre la lluvia y la escorrentía usando las curvas de escorrentía y las precipitaciones. Se introducen los valores de escorrentía y precipitación en mm.

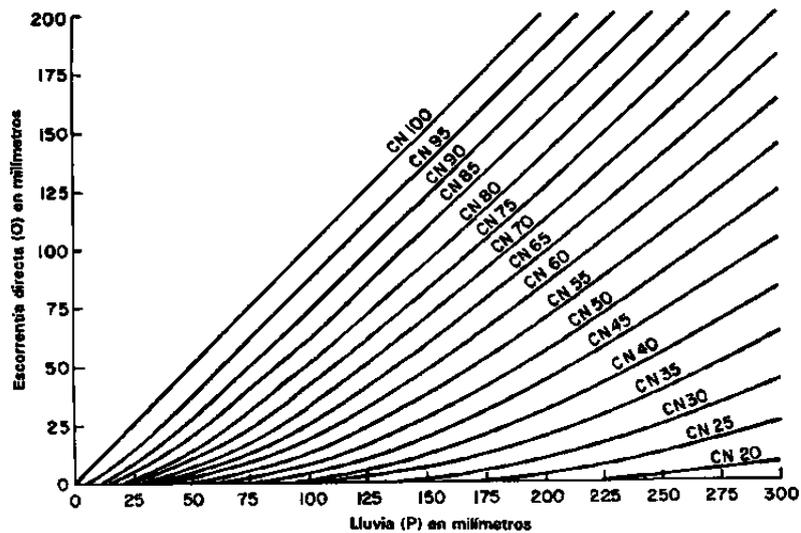


Figura 26. Obtención del número de curva a partir de valores de lluvia y escorrentía. (USDA-SCS, 1964)

- **Valores del Número de Curva de escorrentía.**

El Número de Curva (CN) es un parámetro adimensional, cuyos valores oscilan teóricamente entre 1 y 100.

- CN = 1 significa una capacidad de retención máxima en la cuenca ($Q=0$) (Zonas rurales, cobertura vegetal).
- CN = 100 significa una capacidad de retención nula ($Q=P$) (Zonas urbanizadas, pavimentadas).

En la práctica, los valores más frecuentes están comprendidos entre 40 y 80.

El número de curva, por tanto, depende de:

- Tipo de suelo (según su capacidad de infiltración)
- Tipo de cubierta vegetal y uso del suelo
- Tratamiento del suelo (condiciones de infiltración)
- Estado de humedad precedente

- **Estado de humedad precedente.**

El método del Número de Curva reconoce tres estados de humedad precedente según la lluvia caída en los días anteriores:

- (I) muy seco
- (II) normal
- (III) muy húmedo

Las tablas originales se refieren a condiciones normales de humedad (II).

Para cambiar el número de curva a otras condiciones, en los manuales se proponen las siguientes expresiones (SCS, 1972):

$$\frac{S_I}{S_{II}} \approx \frac{S_{II}}{S_{III}} \approx 2.3$$

Para condición anterior seca:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013CN_{II}}$$

Para condición anterior húmeda:

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057CN_{II}}$$

TABLE 5-1 SEASONAL RAINFALL LIMITS FOR THREE LEVELS OF ANTECEDENT MOISTURE CONDITION (AMC) [21]

AMC	Total 5-d Antecedent Rainfall (cm)	
	Dormant Season	Growing Season
I	Less than 1.3	Less than 3.6
II	1.3 to 2.8	3.6 to 5.3
III	More than 2.8	More than 5.3

Note: This table was developed using data from the midwestern United States. Therefore, caution is recommended when using the values supplied in this table for AMC determinations in other geographic or climatic regions.

Tabla 5. Límites de lluvia estacionales en función de las condiciones previas del terreno. (SCS, 1972)

- **Cálculo del volumen de escorrentía:**

Uno de los objetivos de la hidrología superficial es calcular la escorrentía que se va a generar si se produce una precipitación determinada. En términos hidrológicos sería calcular el hidrograma que genera un hietograma.

El hidrograma es la representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo, dispuestas en orden cronológico en un lugar dado del flujo.

Inicialmente tendremos la precipitación que no produce escorrentía y por otra la precipitación que sí produce escorrentía, que se denomina precipitación neta o efectiva. El área bajo el hidrograma representa el volumen que pasa por el punto de aforo en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma.

La forma del hidrograma va a depender de la forma de la cuenca, de la heterogeneidad espacial y temporal de la lluvia, del tipo de suelo debido a la infiltración del mismo, de la cobertura que presente, de las pendientes del terreno, etc. Una forma de hidrograma generalizada se muestra en la Figura 27. La Figura 28 muestra un hidrograma realizado con datos de precipitación y escorrentía reales de dos estaciones próximas situadas en cuencas de la región de estudio, "Al Batinah South". Estos datos han sido proporcionados por el Ministerio de Recursos Hídricos y analizados por el grupo de proyecto.

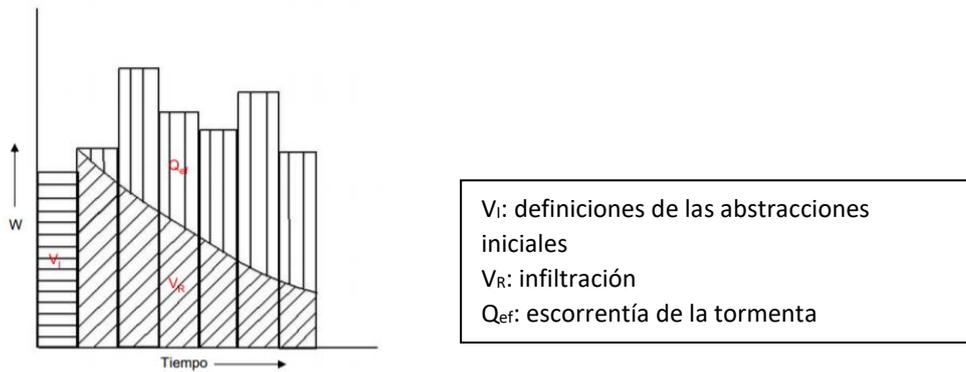


Figura 27. Curva de capacidad de infiltración a partir del hietograma de tormenta.

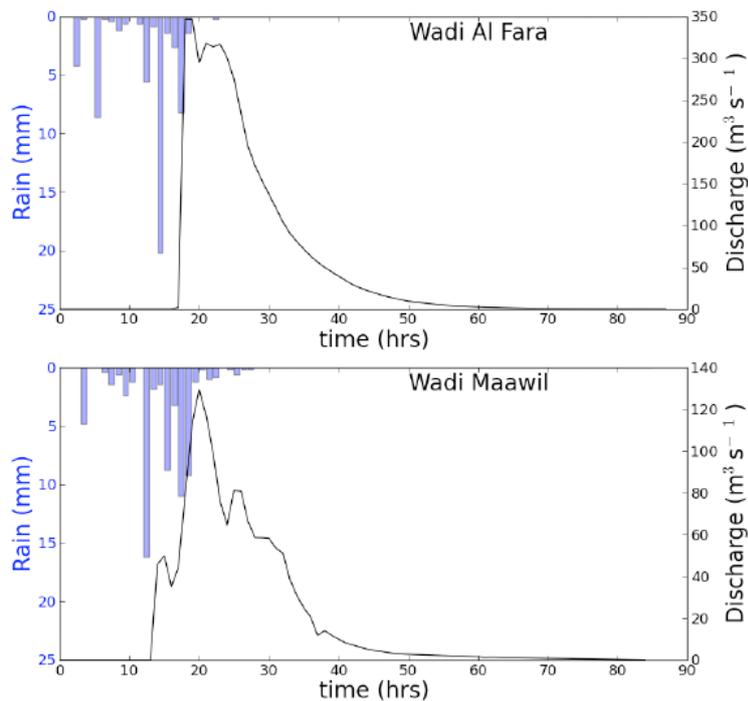


Figura 28. Diagrama típico de lluvia-escorrentía en diferentes cuencas de la región Al Batinah South. Cuencas Wadi Al Fara y Wadi Maawil.

El cálculo lluvia-escorrentía se lleva a cabo con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

Generalmente se especifica un factor de abstracción inicial de $0.2 \cdot S$, aunque se podrán definir otros valores a criterio del diseñador. Teniendo en cuenta el valor de abstracciones iniciales $I_a = 0.2S$:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

- **Valoración del método:**

- Es un método relativamente sencillo, cuyo uso se ha estandarizado en todas las regiones de Estados Unidos y en numerosos países, entre ellos Omán.

- Se incluye en la mayoría de los modelos hidrológicos comerciales (paquetes informáticos) de mayor utilización en el campo de la Hidrología aplicada a la Ingeniería.
- Tiene en cuenta las variables de mayor influencia en la generación de escorrentías y dispone de una amplia bibliografía de carácter empírico.
- No tiene en cuenta la intensidad de la lluvia, utilizando exclusivamente el dato de altura P (mm).
- En sus resultados, tiende a sobreestimar el volumen de escorrentía, al ser muy sensible al parámetro “número de curva”.
- Las tablas empíricas para asignar el número de curva a cada situación, no han sido suficientemente contrastadas fuera de Estados Unidos. En determinadas regiones donde la historia de uso del suelo, de mucha mayor antigüedad, puede tener una gran influencia sobre la formación de escorrentía. (Ej. Europa).

- **Aplicación al área de estudio:**

Este método es empleado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones del Sultanato de Omán, para la realización de los estudios hidrológicos referentes a infraestructura de drenaje de carreteras, entre otros. Los valores para el número de curva se encuentran tabulados en diferentes tablas en función del uso del suelo.

Al ser la cuenca Al Fara, de extrema dimensión para ser objeto de estudio de este trabajo, se enfoca el estudio hidrológico a una zona de importante densidad de población, industria y agricultura en el interior de la misma cuenca, que a menudo sufre las consecuencias de las inundaciones repentinas, con grandes daños materiales, debido a su proximidad a la zona de alta montaña y por tanto zona próxima a la cabecera de diferentes cuencas y de elevada peligrosidad ante escorrentías y arrastres. Las Figuras, 29, 30 y 31 muestran vistas aéreas del área de la cuenca en las que se puede observar la orografía y geografía de la cuenca y área de estudio, así como los asentamientos visibles en la zona.

El área en el que centraremos el estudio de escorrentía corresponde a una localidad de 120.000 habitantes, denominada *Rustaq*. Esta localidad, por su abundancia de recursos naturales y su buena comunicación y ubicación geográfica, ha crecido en las últimas décadas en materia de industria y población a pasos agigantados, a pesar de su escaso desarrollo en materia de infraestructura y servicios a la población.



Figura 29. Ubicación del área de estudio. Rustaq, Wadi Al Fara.



Figura 30. Imagen aérea. Orografía del área de estudio. Rustaq, Wadi Al Fara.



Figura 31. *Imagen aérea. Asentamientos del área de estudio. Rustaq, Wadi Al Fara.*

En esta última imagen se aprecian los asentamientos de población en los cauces que, aunque normalmente son terrenos secos, se ven inundados cuando un evento prolongado de lluvia o una tormenta extrema tiene lugar en la zona.

La ubicación de esta área urbana incrementa las consecuencias de la inundación y pone en peligro numerosos bienes materiales y vidas humana cuando los eventos cobran una mayor importancia.

Para el caso de estudio, elegimos el uso de área urbana, para el que empleamos las tablas que se muestran a continuación:

Runoff Curve Numbers for Urban Areas ¹					
Cover Description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area ²	A	B	C	D
Fully developed urban areas (vegetation established) Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc) ³					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover < 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way)		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only)		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 25 to 500mm sand or gravel mulch and basin borders)		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
500m ² or less (town houses)	65	77	85	90	92
1000m ²	38	61	75	83	87
1350m ²	30	57	72	81	86
2000m ²	25	54	70	80	85
4000m ²	20	51	68	79	84
8000m ²	12	46	65	77	82
Developing urban areas:					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation)		77	86	91	94
Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in Figure 12.2.5.5)					

1 Average runoff condition, and $I_a=0.2S$

2 The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other Assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition.

3 CN's shown are equivalent to those of pasture. Composite CN's may be computed for other combinations of open space cover type.

4 Composite CN's for natural desert landscaping should be computed using figures 2-3 or 2-4 (Refer to Reference USDA, 1986) based on the impervious area percentage (CN=98) and the pervious area CN. The pervious area CN's are assumed equivalent to desert shrub in poor hydrologic condition.

5 Composite CN's to use for the design of temporary measures during grading and construction should be computed using figures 2-3 or 2-4 (Refer to Reference USDA, 1986) based on the degree of development (impervious area percentage) and the CN's for the newly graded pervious areas.

Tabla 6. Número de Curva de escorrentía para áreas urbanas. (USDA, 1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Runoff Curve Numbers for Cultivated Agricultural Lands ¹						
Cover Description			Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Treatment ²	Hydrologic condition ³	A	B	C	D
Fallow	Bare soil Crop residue cover (CR)	–	77	86	91	94
		Poor ⁴	76	85	90	93
		Good ⁵	74	83	88	90
Row crops	Straight row (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & terraced (C&T)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
C&T + CR	Poor	65	73	79	81	
	Good	61	70	77	80	
Small grain	SR	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	SR + CR	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	C	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	C + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	C&T	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
C&T + CR	Poor	60	71	78	81	
	Good	58	69	77	80	
Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow	SR	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	C	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
	C&T	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80

1 Average runoff condition, and $I_p=0.2S$

2 Crop residue cover applies only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year

3 Hydraulic condition is based on combination factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of year-round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes, (d) percent of residue cover on the hard surface (good $\geq 20\%$) and (e) degree of surface roughness.

4 Poor: Factors impair and tend to increase runoff

5 Good: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.

Tabla 7. Número de Curva de escorrentía para áreas rurales cultivadas. (USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Runoff Curve Numbers for Other Agricultural Lands ¹					
Cover Description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition	A	B	C	D
Pasture, grassland, or range-continuous forage for grazing ²	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow-continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay	-	30 ⁴	58	71	78
Brush-brush -weed-grass mixture with brush the major element ³	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods-grass combination (orchard or tree farm) ⁵	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	31	58	72	79
Woods ⁶	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30 ⁴	55	70	77
Farmstead-buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	-	59	74	82	86

1 Average runoff condition, and $I_a=0.2S$
2 Poor: <50% ground cover or heavily grazed with no mulch.
Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed
Good: >75% ground cover and not heavily grazed.
3 Poor: <50% ground cover
Fair: 50 to 75% ground cover
Good: >75% ground cover
4 Actual curve number is less than 30; use CN=30 for runoff computation
5 CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be computed from the CN's for woods and pasture
6 Poor: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning
Fair: Woods are grazed but not burned and some forest litter covers the soil.
Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

Tabla 8. Número de Curva de escorrentía para otras áreas rurales. (USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Para el caso de estudio, elegimos la tabla nº 8 que se corresponde al número de curva de escorrentía para usos de Otras Áreas Rurales, en el que elegimos los valores que definen un área con edificaciones rurales, caminos de acceso, incluso viales y terrenos colindantes.

Los grupos [A - D] indican la tasa mínima de infiltración obtenida en un suelo sin cobertura tras una prolongada humectación del mismo.

Al considerarse los suelos alterados por el establecimiento de la población, se consideran los siguientes grupos de tipos de suelo para la definición del grupo al que hace referencia el valor del número de curva:

- GRUPO A: Arena, arena arcillosa.
- GRUPO B: arcillas o arcillas limosas
- GRUPO C: margas arenosas o arcillosas
- GRUPO D: limo arcilloso

El terreno que presenta la zona de estudio se corresponde con terreno arenoso, o en su caso rocoso, debido a la geología general no se presentan zonas de tipo arcilloso.

Por tanto, estamos ante un **grupo de suelo A**, que nos da un valor de número de curva (CN) igual a 59.

Así, el valor de profundidad máxima de almacenamiento en mm, queda como sigue:

$$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) = 25.4 * \left(\frac{1000}{59} - 10 \right) = 176,51 \text{ mm}$$

Tendríamos un coeficiente inicial de infiltración igual a $0.2S = 0.2 * 176,51 = 35,30$ mm.

El método, calcula la altura de una escorrentía dada para una entrada de lluvia conocida y el valor del número de curva. La relación se expresa según la siguiente expresión:

$$\text{Escorrentía} = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} = \frac{(94 - 35,30)^2}{94 + 176,51 - 35,30} = 14,65 \text{ mm.}$$

La forma del hidrograma de inundación que aporta el método es estándar y depende del área de la cuenca y del tiempo de retardo dado para la misma. El tiempo de retardo se establece en 0.6 veces el tiempo de concentración. Una estimación aproximada del caudal punta es dada por la siguiente ecuación:

$$Q_p = 4.3044 * 10^{-4} * q_u * \text{Escorrentía} * A * F_p$$

Donde:

Q_p , es el caudal pico de descarga en m^3/s .

A , es área de la cuenca en km^2 .

F_p , es el factor de ajuste adimensional obtenido de la Tabla 9.

Percentage of pond and swamp areas	Pp
0	1
0.2	0.97
1	0.87
3	0.75
5	0.72

Tabla 9. Factor de ajuste adimensional. (USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

q_u es el caudal pico unitario obtenido desde la siguiente ecuación, asumiendo un tipo 2 SCS de distribución de lluvia común en precipitaciones de tipo convectivo:

$$\log(q_u) = C_0 + C_1 * \log(T_c) + C_2 * [\log(T_c)]^2$$

T_c es el tiempo de concentración en horas; los coeficientes $C_0, C_1, y C_2$ serán dados por la siguiente tabla:

Rainfall Distribution Type	I_a / P	C_0	C_1	C_2
II	0.1	2.553	-0.615	-0.164
	0.3	2.465	-0.623	-0.117
	0.35	2.419	-0.616	-0.088
	0.4	2.364	-0.599	-0.056
	0.45	2.292	-0.570	-0.023
	0.5	2.203	-0.516	-0.013

Tabla 10. Coeficientes para la ecuación pico de descarga. (USDA, 1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Para un valor de F_p igual a 0.72, obtenido de la Tabla 9, obtenemos el valor de C_0 , C_1 y C_2 a partir de una interpolación de los valores de la Tabla 9 para un valor de $I_a/P = 0.3755$.

$$C_0 = 2.392 \quad C_1 = -0.607 \quad \text{y} \quad C_2 = -0.071$$

Calculamos el tiempo de concentración con la fórmula de Kirpich, dada con anterioridad y obtenemos un valor de **$T_c = 268$ minutos**, para $L = 25000$ metros y $H = 269$ metros.

$$T_c = \frac{1}{52} * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$$

Con todos estos valores, obtenemos el valor del caudal unitario pico de descarga q_u , a partir de la siguiente ecuación:

$$\log(q_u) = C_0 + C_1 * \log(T_c) + C_2 * [\log(T_c)]^2$$

$$\log(q_u) = 2.392 + (-0.607) * \log(268) + (-0.071) * [\log(268)]^2 = 0.5$$

$$q_u = 3,16$$

A partir de este valor y con el resto de los parámetros, obtenemos el caudal pico de descarga que nos proporciona el método, a partir de la siguiente expresión:

$$Q_p = 4.3044 * 10^{-4} * q_u * Escorrentía * A * F_p$$

$$Q_p = 4.3044 * 10^{-4} * 3.16 * \left(\frac{14,65}{1000}\right) * (144 * 10^6) * 0,72 = 2064,90 \frac{m^3}{s}$$

Este caudal ha sido generado con los datos de precipitación de la tormenta ocurrida durante el episodio del Ciclón Peth el 4 de junio de 2010. Posteriormente, a partir de las ecuaciones de regresión que se describen en el siguiente apartado de este capítulo, obtendremos diferentes caudales para distintos periodos de retorno.

También se podría obtener una estimación más exacta del caudal pico, así como de todo el hidrograma, utilizando programas que aplican el procedimiento del hidrograma unitario en toda su extensión. Para ello harían falta datos que no disponemos.

II.VI Ecuaciones de regresión.

A continuación, se exponen las ecuaciones de regresión facilitadas por el *Manual de Carreteras del Ministerio de infraestructura y transporte del Sultanato de Omán (2010)* para el cálculo de caudales para distintos periodos de retorno.

Para su empleo, se han creado unos mapas de predicción de intensidad de lluvia para los mismos periodos de retorno, a partir de los cuales obtenemos un valor de precipitación a partir de una distribución espacial dada.

La derivación del conjunto de ecuaciones se realizó a partir de un modelo de regresión múltiple o escalonada.

Se ha aplicado este modelo, a partir del cual se han obtenido dos ecuaciones diferentes, unas para la región de Dhofar, situada al sur del país y otras para el resto de la superficie del país. Estas ecuaciones se usan en conjunto con las técnicas de transformación lluvia-escorrentía, en nuestro caso, con el método SCS, descrito en el apartado anterior.

Nuestra cuenca se encuentra situada en la región noreste del país, por lo que las ecuaciones a emplear son las siguientes:

Periodo de retorno	Ecuación de regresión
5 años	$Q_5 = 2.557 A^{0.526} MSS^{0.127} P_5^{0.772} R_{off}^{0.506}$
10 años	$Q_{10} = 2.517 A^{0.557} MSS^{0.144} P_{10}^{0.798} R_{off}^{0.605}$
25 años	$Q_{25} = 0.851 A^{0.745} MSS^{0.243} P_{25}^{0.862} R_{off}^{0.62}$
50 años	$Q_{50} = 0.629 A^{0.908} MSS^{0.301} P_{50}^{0.742} R_{off}^{0.548}$
100 años	$Q_{100} = 0.175 A^{0.95} MSS^{0.245} P_{100}^{0.887} R_{off}^{0.298}$
500 años	$Q_{500} = 9.993 A^{0.948} MSS^{0.250} P_{10}^{0.120} R_{off}^{0.157}$

Tabla 11. Ecuaciones de regresión para distintos periodos de retorno, Omán. (*Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010*)

Donde,

Q_n : caudal pico correspondiente a n años de periodo de retorno en m^3/s .

A : Área de la cuenca (Km^2).

MSS : pendiente del tramo de mayor longitud dentro de la cuenca (m/m). A continuación, se describen los detalles para el cálculo de este parámetro.

P_n : intensidad de lluvia estimada para el periodo de retorno n en mm. Para facilitar el uso de estas ecuaciones, se han confeccionado mapas para la distribución espacial de intensidad de lluvia estimada para cada periodo de retorno dentro del Sultanato de Omán; estos mapas se muestran a continuación en las Figuras 32, 33, 34, 35 y 36.

R_{off} : Parámetro de escorrentía (mm/mm) calculado en base al modelo empírico del US SCS.

Mapas de distribución espacial de intensidad de lluvia estimada

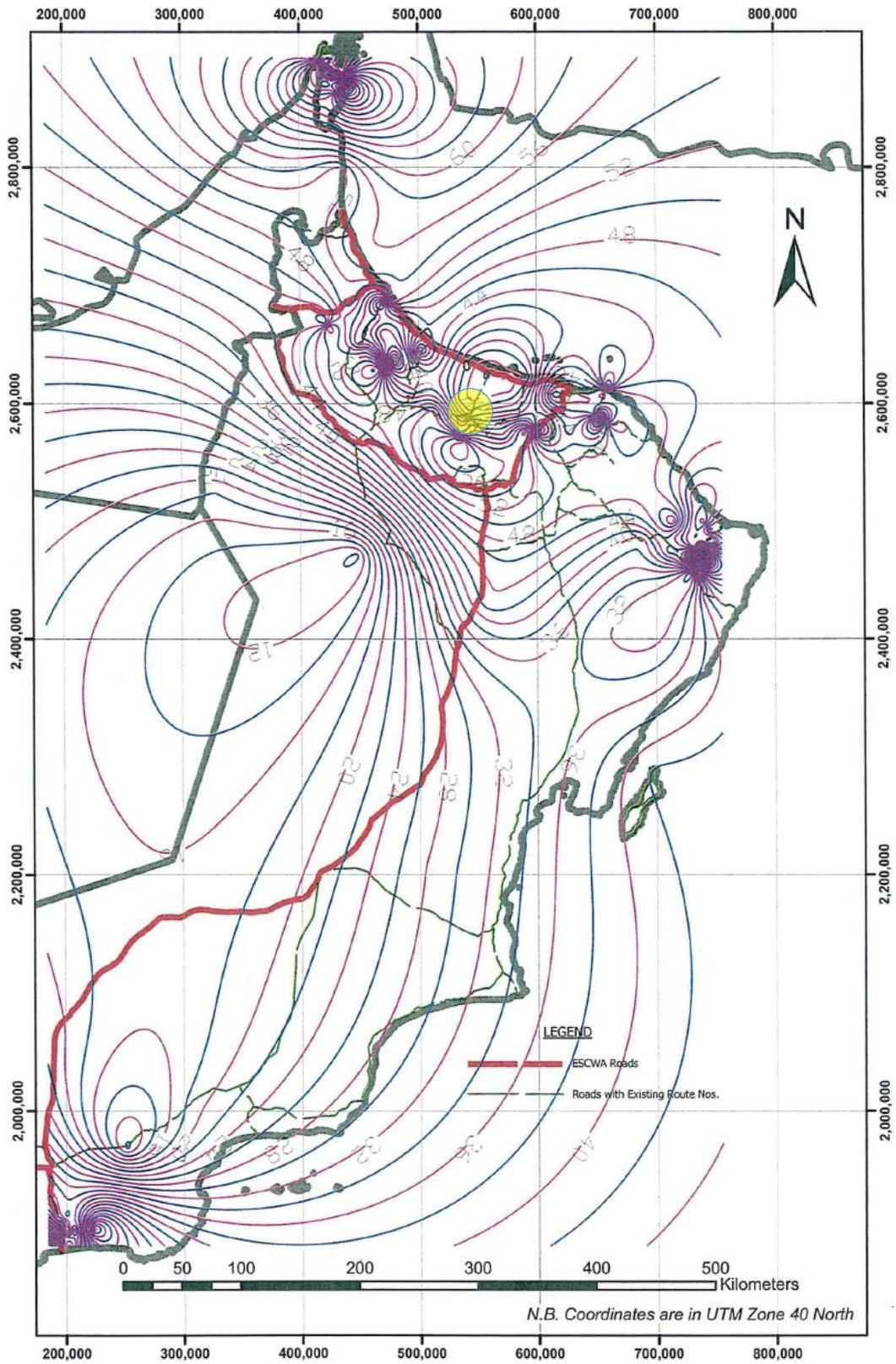


Figura 32. Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 5 años.
(Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

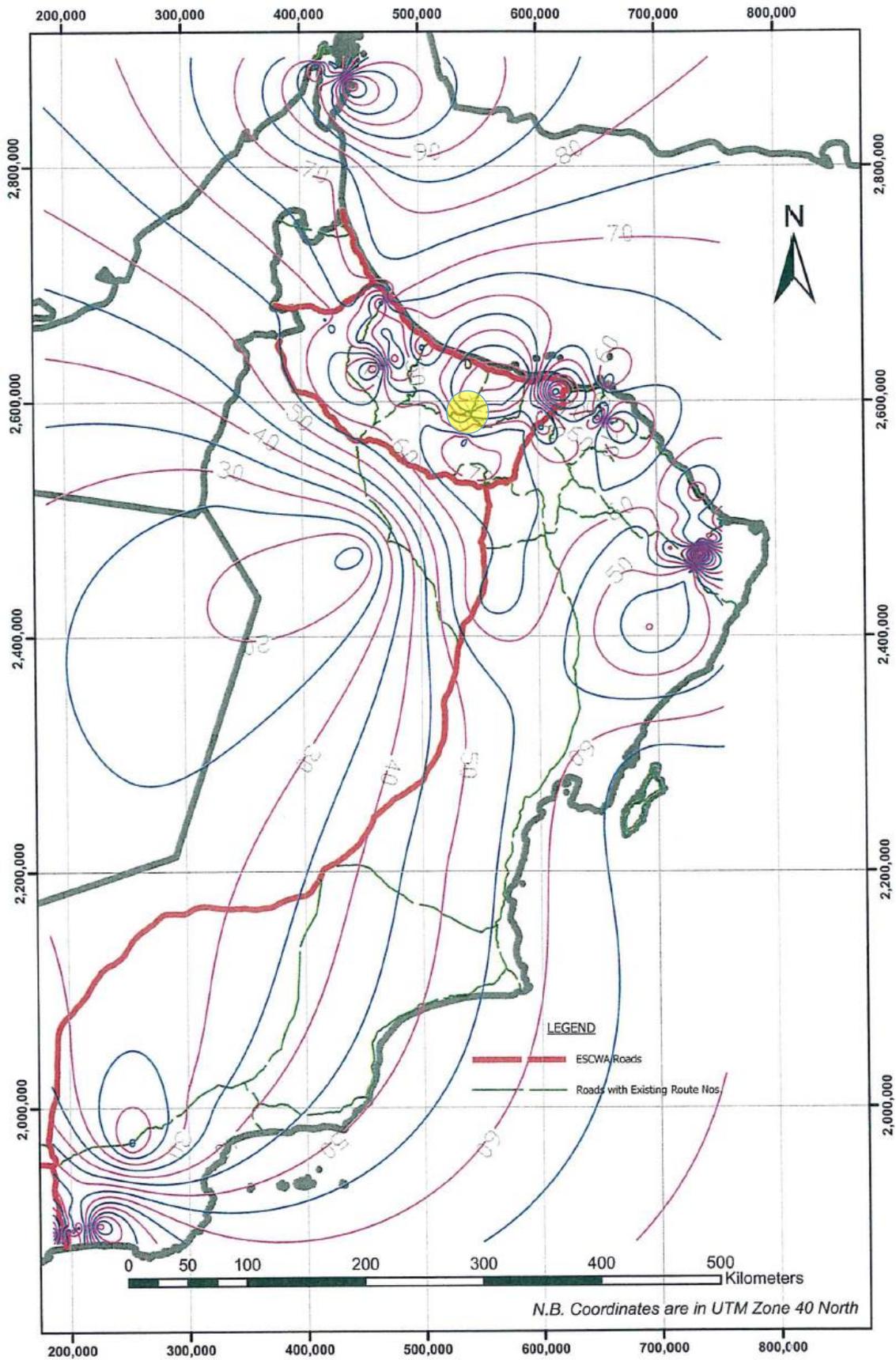


Figura 33. Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 10 años. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

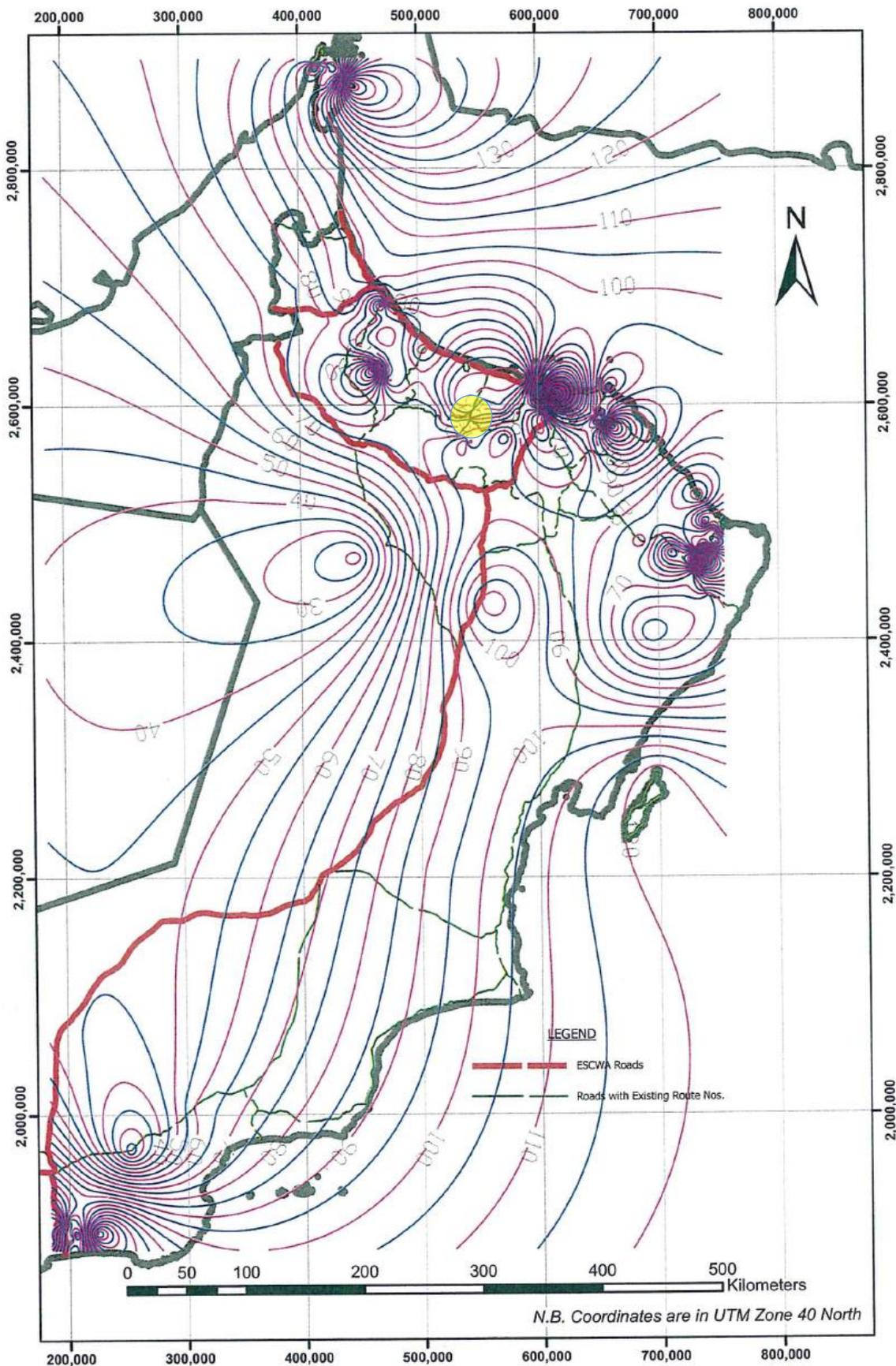


Figura 34. Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 25 años.
 (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

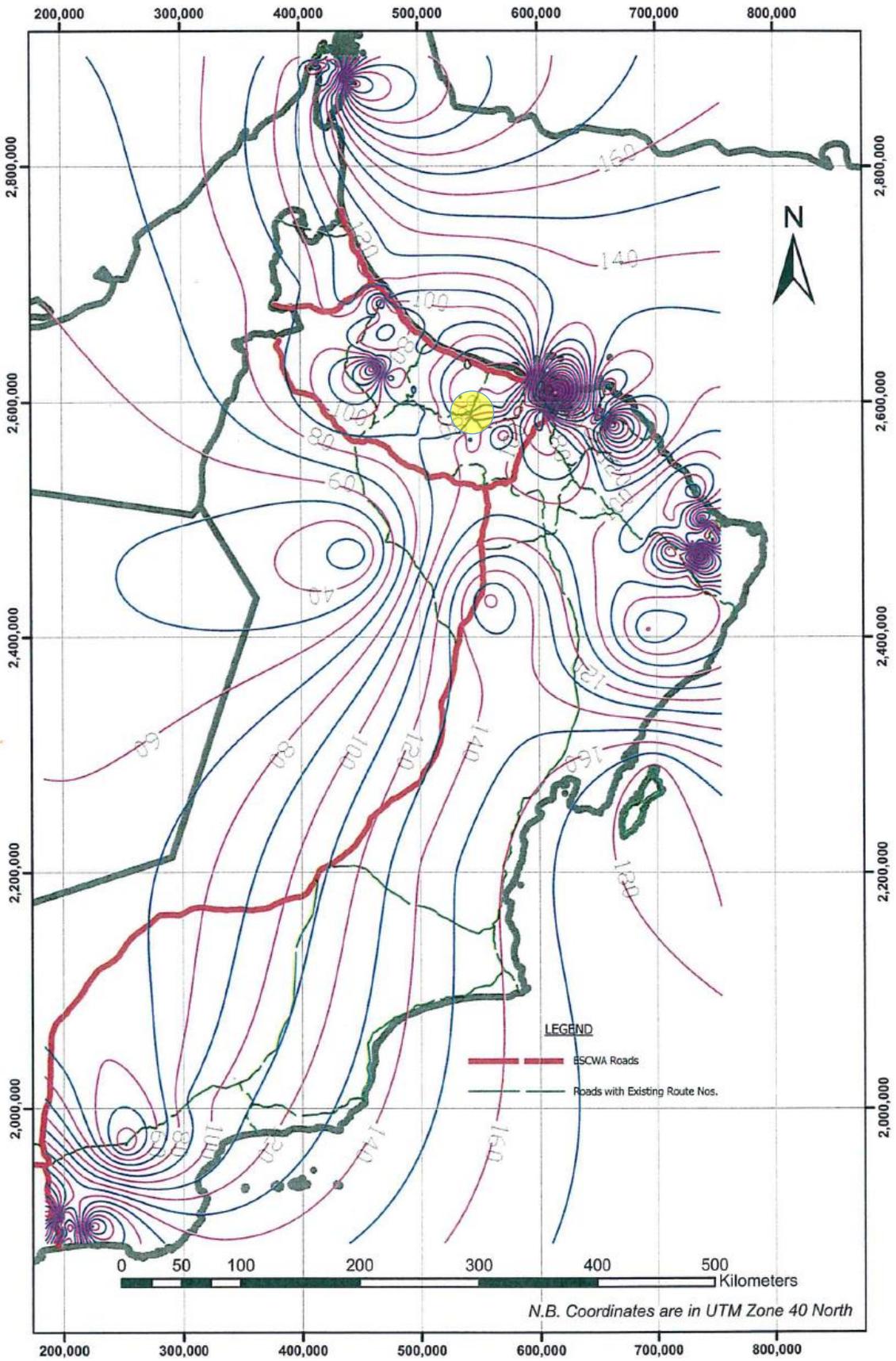


Figura 35. Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 50 años.
 (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

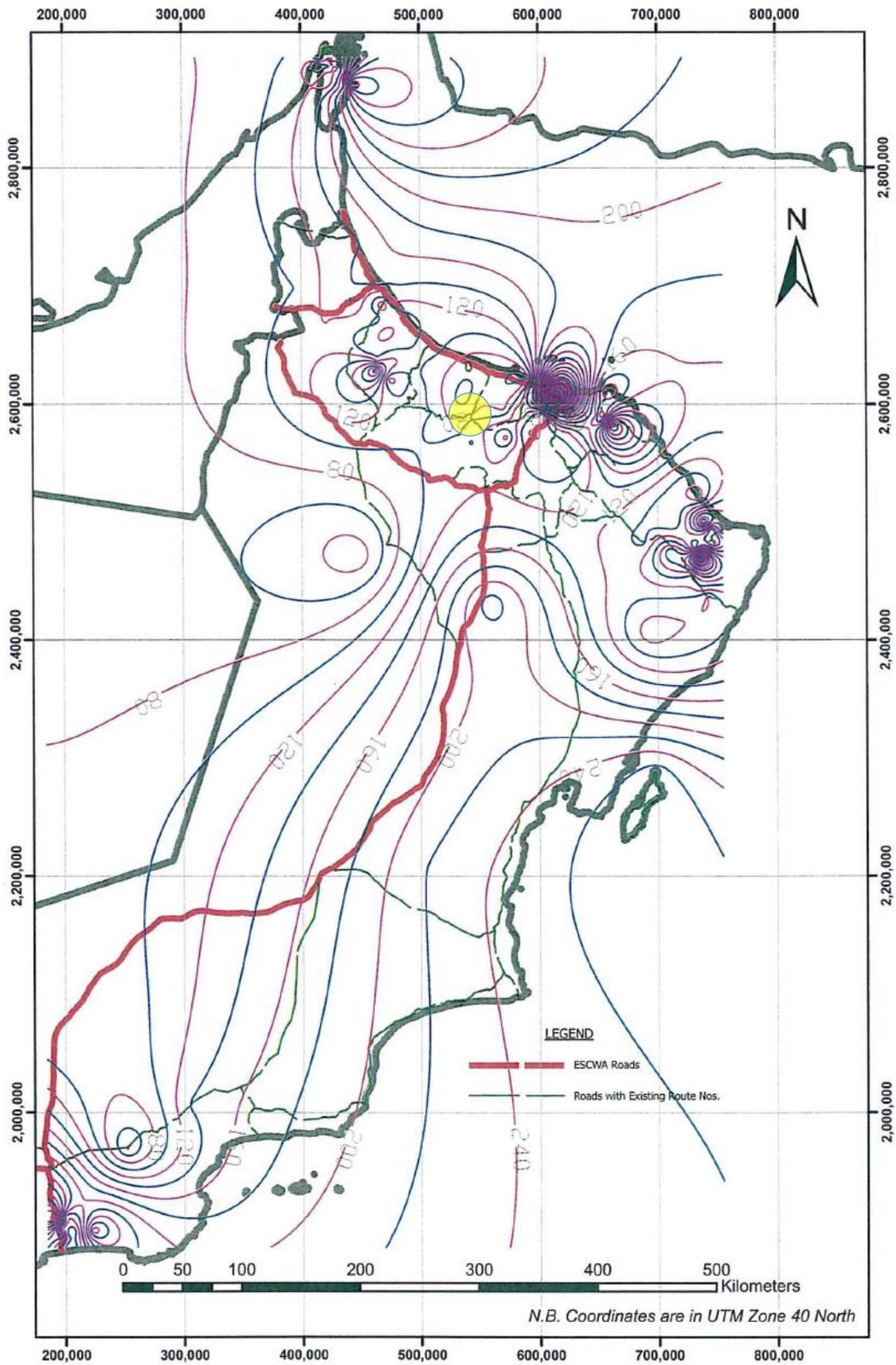


Figura 36. Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 100 años.
 (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Cálculo del parámetro *MSS*

Para calcular el parámetro *MSS* de la ecuación de regresión, debemos identificar el cauce de mayor longitud de la cuenca. Una vez identificado el cauce, obtenemos su pendiente media a partir de restar la elevación de salida del cauce a la elevación máxima de la cuenca y dividir el resultado por la longitud obtenida.

Cálculo del parámetro de escorrentía *Rof f*

El parámetro de escorrentía está basado en los cálculos del método del SCS. Se formula como la relación entre la escorrentía calculada por el método del SCS descrito en apartados anteriores y la precipitación obtenida.

Se asume que el parámetro de escorrentía es función directa de la intensidad de lluvia, la cual varía con el periodo de retorno.

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros descritos a partir de los datos obtenidos en los mapas de distribución espacial de lluvia que recogen las figuras 32 a 36.

PARÁMETROS CALCULADOS

Periodo de retorno (Años)	Intensidad de lluvia (mm)	Escorrentía (mm)	<i>MSS</i> (504-235)/25000	<i>Rof f</i> (mm/mm)
5	36	0	0,01076	0
10	50	1.13		12,965
25	65	4.28		3,425
50	80	9.03		1,622
100	100	17.35		0,844

Tabla 12. Resultados de parametros a introducir en ecuaciones de regresión para la región de estudio.

DATOS Y RESULTADOS ECUACIONES DE REGRESIÓN

El Anexo II contiene el cálculo y resultados de las ecuaciones de regresión que se proponen en este apartado.

ECUACIÓN EMPÍRICA PARA ESTIMACIÓN DE LA INUNDACIÓN

La siguiente formulación empírica fue desarrollada por el Ministerio de Recursos Hídricos y Medioambiente de Omán en 2002, y es actualmente aplicada para el cálculo de inundaciones en proyectos para cuencas con una extensión mayor de 10 km². (Esta ecuación es conocida como, la ecuación empírica de 2002).

$$Q_{qma} = 1.91 * A^{0.76} * Nm^{-0.15} * SL^{0.2}$$

Donde,

Q_{qma} es el caudal medio anual (m³/s).

A es el área de la cuenca (Km²).

Nm es la proporción de área sin montaña (plana y aluvial) del total de la cuenca, (ratio).

SL es la pendiente de la cuenca, considerando el afluente de mayor recorrido, tomando el 15% menos de su longitud medida desde el punto más alejado de la cuenca hasta su desembocadura (m/Km) = (Z-H)/0.85L.

L es la longitud del cauce principal de la cuenca (km).
 Z es la elevación media del 15% de L medido desde el borde de la cuenca (m).
 H es la elevación de la desembocadura (m).

Esta formulación empírica proporciona la media anual de inundación. Consecuentemente, su resultado deberá ser multiplicado por un factor de corrección para obtener el valor de inundación para cada periodo de retorno.

La siguiente tabla muestra los valores del factor de corrección:

Periodo de retorno (Años)	Año base (1998)
	1.0
5	1.9
10	2.8
20	3.8
50	5.0
100	5.9

Tabla 13. Valores de factor de crecimiento para cada periodo de retorno. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

Para evaluar la aplicabilidad de la formula, se realizaron comprobaciones estimando el flujo en todos los medidores de caudal disponibles.

Se ha realizado una comparación para diferentes cuencas, para los periodos de retorno de 50 y 100 años, con los resultados de:

- Datos recogidos de las lecturas en las estaciones de aforo disponibles.
- Las ecuaciones de regresión desarrolladas.
- La ecuación empírica de 2002.

Los resultados de esta comparación se muestran en las gráficas de dispersión que recoge la Figura 37 y la Figura 38. El estudio se ha realizado para cuencas de 400 km² de superficie aproximada.

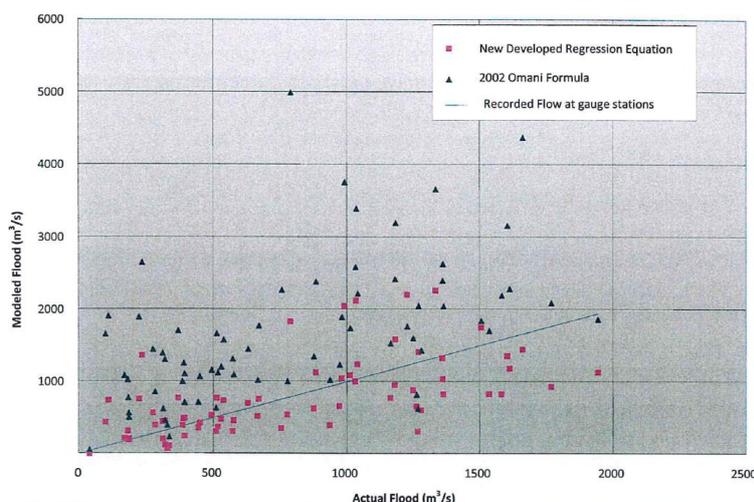


Figura 37. Comparación entre la ecuación empírica de de 2002 y las nuevas ecuaciones de regresión para 50 años de periodo de retorno para inundaciones de volumen menor o igual a 2000 m³/s. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

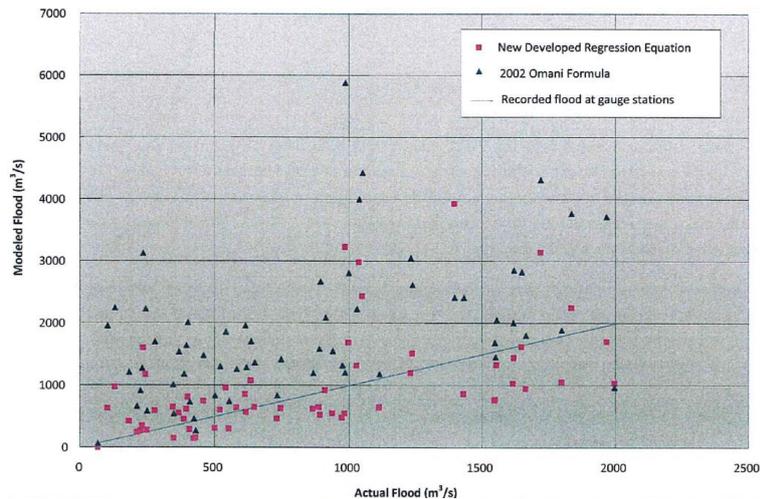


Figura 38. Comparación entre la ecuación empírica de 2002 y las nuevas ecuaciones de regresión para 100 años de periodo de retorno para inundaciones de volumen menor o igual a 2000 m³/s. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)

En el análisis de las gráficas de las Figuras 37 y 38, podemos observar, por ejemplo, como para inundaciones menores que 2000 m³/s, para un periodo de retorno de 100 años, la formulación empírica de 2002 da resultados más elevados que la nueva formulación desarrollada. Además, tiende a obtener casi el doble de los caudales reales registrados. Sin embargo, para resultados de periodo de retorno 100 años o más de 2000 m³/s de caudal punta, ambas ecuaciones ofrecen similares resultados.

La formulación empírica de la fórmula de 2002 no considera entre sus parámetros la precipitación; los resultados obtenidos para las ecuaciones de regresión aportan valores de caudal más elevados que los obtenidos con la fórmula empírica, por lo que, de forma general, se recomendará el empleo de las ecuaciones de regresión desarrolladas para el cálculo de caudales. Además, para caudales mayores de 1500 m³/s y 2000 m³/s, para 50 y 100 años de periodos de retorno respectivamente, ambas ecuaciones son equivalentes.

CAPÍTULO IV. MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN.

GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Se entiende como **riesgo de inundación** a la situación potencial de pérdida o daño a personas, bienes materiales o servicios, como consecuencia del anegamiento de sectores normalmente secos por inundaciones a las que se asocia una severidad (intensidad y magnitud) y frecuencia o probabilidad de ocurrencia, determinadas. La Directiva Europea de Inundaciones lo define como la “combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de las posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a una inundación” (*Art.2.2. Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación*).

Partiendo del principio de que, el "desastre" natural no es la **inundación** sino sus consecuencias, la experiencia nos lleva a poder afirmar que dependerá de un eficiente Plan de Gestión Ambiental poder minimizar muchos de los problemas ambientales, económicos y **sociales** que se producen, después de que la **inundación** haya pasado.

Existe una herramienta que, usada con criterio y de forma homogénea en todos los ámbitos de la planificación, adquiriría un gran potencial, estos son los Mapas de Peligrosidad y Mapas de Riesgo de Inundación.

Un mapa de peligrosidad es a groso modo el cálculo representado de la zona inundable; obtenido este, se define el mapa de riesgo de inundación como la incorporación a la zona inundable de los usos del suelo en esa zona, pudiendo establecer así una estimación de los daños esperados.

Actualmente, en Omán, existen mapas de peligrosidad creados en 1992.

Expuesto por diferentes personas implicadas en la planificación tanto hidrológica como urbanística, estos mapas nunca han sido una herramienta de referencia a la hora de tomar decisiones por ningún organismo público. Por lo que tampoco se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del riesgo que conlleva la inundación en cada zona.

Como ejemplo se muestra a continuación; la Figura 39 contiene un mapa de la zona de Muscat, región donde está ubicada la capital del país que presenta el mismo nombre. Como se puede observar el mapa muestra tres zonas diferentes en función del riesgo de inundación; en color rojo presenta un riesgo elevado, azul riesgo medio y riesgo bajo se representa en color amarillo. Este mapa representaría un mapa de peligrosidad. A pesar de la clasificación, se ve como los asentamientos están presentes en cualquier zona, ya esté clasificada o no, sin tener en cuenta el impacto de que sean inundadas.

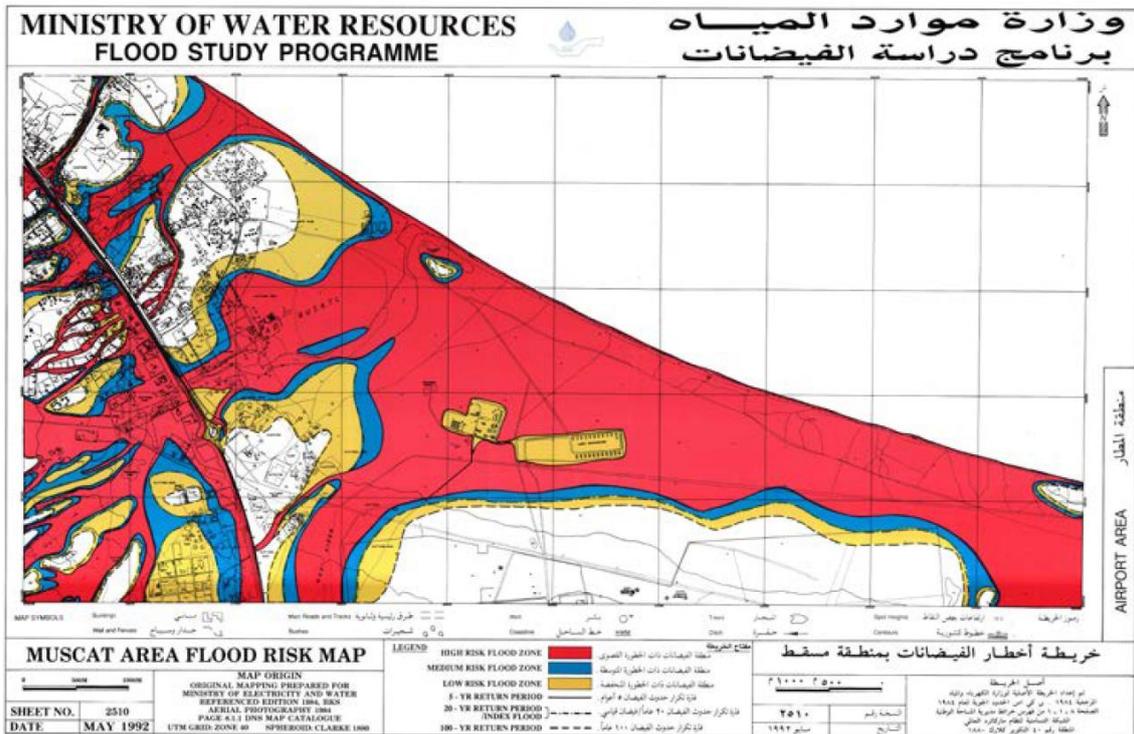


Figura 39. Mapa de peligrosidad área Muscat. (Sultanato de Oman, 1992).

Cuando se crearon estos mapas, en 1992, estos se destinaron a ser usados por todos los organismos relacionados con la planificación, y además fueron también dados a los siguientes agentes:

- Royal Court
- Royal Omani Police
- Supreme Council for Planning
- Gobierno de todos los municipios.

Los mapas de inundación fueron recibidos por cada una de las entidades nombradas, pero nunca fueron realmente usados o consultados de manera efectiva.

El Ministerio de Recursos Hídricos advierte a la población sobre los riesgos de inundación, pero no le compete la responsabilidad sobre los mismos. Por tanto reconoce y expresa que los consejos dados no son legalmente vinculantes, sino que solo se han de tener en cuenta a modo de recomendaciones.

Tras varios encuentros con distintos responsables de diferentes organismos y stakeholders para intercambio de información sobre el asunto de referencia, parece que las responsabilidades en materia de gestión de inundaciones no se han definido por el momento de una forma exhaustiva y surgen dudas acerca de las responsabilidades que conllevan los eventos de inundación.

Un adecuado análisis de la situación, que incluya la selección y diseño de las medidas más eficaces y sostenibles para la mitigación de los efectos adversos de las inundaciones, tanto estructurales como no estructurales, requiere de un detallado conocimiento del problema, lo que implica el desarrollo de los trabajos topográficos, hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos necesarios para la elaboración de los denominados Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación.

La cartografía anterior debe cruzarse con la información relativa a la vulnerabilidad del territorio en lo relativo a la salud humana, el medio ambiente y la actividad económica, para la determinación pormenorizada del riesgo por inundación y la elaboración de los mapas asociados. Estos mapas deben servir de punto de partida para la posterior redacción de unos **Planes de Gestión del Riesgo de Inundación**, y por tanto, deben aportar los elementos de juicio para una elección razonada de soluciones.

La adecuada gestión del riesgo de inundación debe efectuarse teniendo en cuenta los costes incurridos en su reducción y los beneficios esperados.

En conjunto, los mapas de peligrosidad y riesgo, deberán proporcionar una visión realista y precisa del problema, constituyendo así un instrumento eficaz para la gestión futura del riesgo de inundación asociado a las zonas más problemáticas del territorio, asegurando un eficiente empleo de los recursos económicos disponibles para la mitigación de los daños potenciales y una compatibilización más sostenible de las necesidades de desarrollo de la sociedad con los riesgos naturales del medio físico ocupado.

En cuanto a los elementos a recopilar en los mapas, pueden ser múltiples y diversos, al igual que los sistemas de representación. Su inclusión dependerá de las escalas de trabajo, del método utilizado y de la finalidad o aplicación del mapa. La peligrosidad puede cartografiarse en tres zonas: alta, media y baja; en las que deben establecerse limitaciones y restricciones de uso.

IMPACTOS DE LAS AVENIDAS EN INUNDACIONES

Entre los efectos e impactos de las inundaciones están:

- La Profundidad del agua.
- Permanencia temporal del agua.
- Velocidad de la corriente.
- Capacidad erosiva.
- Arrastre de sólidos.
- Depósito de sólidos.
- Otros fenómenos geológicos asociados.

El primer y mayor daño de la inundación es el propio anegamiento de agua y su profundidad en zonas normalmente secas, lo que conlleva la humectación de suelos, con la consiguiente pérdida de capacidad portante de los terrenos, y de las estructuras y edificaciones construidas en ellos, pudiendo afectar a su cimentación y estabilidad estructural o la pérdida de determinados cultivos y vegetación por quedar sumergidos y apartados del oxígeno atmosférico. Además, las instalaciones de servicios como tendidos eléctricos, redes de comunicaciones, oleoductos, etc. y vías de comunicación y transporte, pueden quedar sumergidas, con el consiguiente riesgo de rotura o interrupción del servicio.

También la inmersión de los bienes materiales, como mobiliario o vehículos a motor produce su deterioro o daño irreparable, con las consiguientes pérdidas económicas.

En este sentido existen una serie de valores umbral de profundidad de lámina de agua a partir de los cuales se incrementan significativamente los daños, como los 0,8 metros, cifra promedio sobre la que se inundan los enseres ubicados sobre mesas, encimeras y estantes ("efecto mesa"). En el caso de instalaciones y mercancías tóxicas y peligrosas como vertederos de residuos, fábricas de productos químicos, centrales térmicas y nucleares, el daño es susceptible de agravarse, ya que se podría producir una dispersión y difusión de los contaminantes en la corriente. Profundidades más elevadas y sobre todo cambios bruscos en la misma, como por ejemplo escalones o pozas, pueden suponer igualmente un peligro para la integridad física de seres humanos y animales, fundamentalmente para aquellas personas que

por su corta edad, su longevidad o diferentes enfermedades y discapacidades, tienen alta vulnerabilidad.

Es importante a su vez considerar el tiempo de permanencia de la lámina de agua, ya que la inundación, puede agravar los efectos antes mencionados, provocando la pérdida de cultivos o la inestabilidad de cimentaciones, mientras que rápidas desecaciones reducirían los daños significativamente, ya que además minimiza la decantación de materiales finos en el lecho. En inundaciones costeras y litorales, el anegamiento de zonas continentales por aguas marinas produce la salinización de los suelos y de los acuíferos en los que se infiltran.

Por otro lado, puede causar mayores o menores daños la avenida en función de velocidad de la corriente, que en ocasiones puede, por impacto directo o indirecto (socavación o transporte de materiales), derribar y arrastrar enseres y personas.

Con velocidades superiores a 1 m/s y con cierto calado, se considera suficiente para arrastrar a una persona.

Especialmente peligrosos son los cambios bruscos de velocidad, como los que se producen en resaltos hidráulicos, en los que la liberación de energía es tal que cualquier elemento atrapado en la corriente presentará dificultad para ser recuperado o rescatado.

Cuando se crean avenidas de tipo torrencial, las velocidades pueden superar incluso los 4 o 6 m/s, valores con los cuales se arrastran objetos voluminosos pesados, e incluso se crean remolinos y peligrosos fenómenos de succión del aire por efecto Venturi y sobrepresiones por cavitación.

En tercer lugar, la fuerza o energía de la corriente puede erosionar el lecho y las márgenes del cauce, produciendo socavación de infraestructuras e inestabilidad de laderas, desencadenando movimientos de materiales con los consiguientes daños asociados a personas, bienes o infraestructura.

Un cuarto efecto susceptible de causar daños es la carga sólida arrastrada por el agua, ya sea en suspensión, carga de fondo o en flotación.

Los materiales detríticos, producirán diferentes efectos hidráulicos en la corriente, como aumentar su densidad y viscosidad y disminuir su velocidad, con el consiguiente aumento de la altura de la lámina de agua.

CAPÍTULO V. MODELO HIDRÁULICO. IBER

CARACTERIZACIÓN DEL MODELO

Durante un evento de crecida es habitual que el flujo de agua no quede restringido a la línea central unidireccional de un caudal principal, sino que el caudal desborde ocupando las márgenes y llanura de inundación. En estas situaciones, así como en confluencias de ríos, flujos alrededor de estructuras, curvas pronunciadas o entornos urbanos, la simplificación del flujo a una dimensión resultaría insuficiente, la simplificación a dos dimensiones es aceptable si las variaciones de las componentes horizontales en la vertical son pequeñas y si la distribución vertical de presiones es hidrostática; es en este caso en el que se pueden aplicar las ecuaciones de aguas someras integradas en la vertical. En cualquier caso, el modelo más preciso de representación de ríos, corresponderá a un modelo en tres dimensiones.

La modelización de procesos hidrodinámicos, o la evaluación de zonas inundables, se realiza cada vez con más frecuencia con modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad (2D Shallow Water Equations, 2D-SWE, o ecuaciones de St.Venant bidimensionales).

Estas ecuaciones se obtienen a partir de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes, asumiendo una distribución de presión hidrostática y una distribución uniforme de la velocidad en la profundidad. Estas aproximaciones se cumplen de forma aceptable en flujos fuertemente bidimensionales, donde la dimensión espacial horizontal es muy superior a la vertical (calado), como ocurre, en nuestro caso de estudio, en la mayoría de la superficie de la cuenca, que conforma la planicie y desembocadura del Wadi.

En estos casos, el flujo queda definido de forma adecuada en cada punto por las dos componentes de la velocidad horizontal y el calado, siendo la componente vertical de la velocidad despreciable.

Actualmente la principal aplicación de los modelos de aguas someras bidimensionales es la hidráulica fluvial y el cálculo de las corrientes de marea en zonas costeras.

Los modelos de aguas someras bidimensionales necesitan como datos principales de entrada:

- La topografía de la zona de estudio.
- La rugosidad del terreno.
- El caudal que atraviesa el cauce de estudio.

El caudal de cálculo se obtiene generalmente a partir de formulaciones empíricas sencillas que lo relacionan con la precipitación y la forma de la cuenca, o mediante modelos hidrológicos de transformación lluvia-escorrentía que asumen un gran número de simplificaciones.

De esta forma obtendremos primero el caudal o el hidrograma de cálculo mediante un modelo hidrológico, imponiéndolo posteriormente como condición de contorno en una sección concreta del modelo hidráulico de aguas someras. Este tipo de procedimiento tiene el inconveniente de tener que trabajar tanto con un modelo hidrológico como con un modelo hidráulico. Además, en una cuenca real la aportación de escorrentía al caudal del cauce principal se produce de forma distribuida a lo largo de todo el cauce, y no únicamente en una o dos secciones del río.

En los últimos años se han producido avances significativos en los modelos numéricos de aguas someras. Los nuevos esquemas numéricos desarrollados permiten modelar el flujo sobre topografías complejas, incluso para calados muy pequeños y con presencia de zonas secas. Estos avances, junto con la mejora de rendimiento en las herramientas de cálculo, plantea la posibilidad de que todo el proceso de escorrentía pueda ser simulado directamente por un modelo bidimensional de aguas someras. De hecho, la escorrentía superficial no deja de ser un flujo de agua cuya dimensión horizontal es muy superior al calado.

MODELO IBER

Uno de los trabajos con mayor relevancia que ha realizado el CEDEX con la Dirección General del Agua en los últimos años ha sido el desarrollo, conjuntamente con la Universidad de La Coruña, la Universidad Politécnica de Cataluña y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), del modelo matemático bidimensional IBER.

IBER es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen variable para el estudio hidromorfológico de cauces.

El campo de aplicación de IBER es muy amplio, siendo su principal finalidad el estudio hidrodinámico en ríos. Permite estudiar además el transporte de sedimentos en los cauces y dispone de herramientas para realizar análisis de inundabilidad. También es adecuado para estudiar el flujo de mareas en estuarios y realizar simulaciones de rotura de presas, entre otras.

El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, transporte de sedimentos así como de calidad de las aguas. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros.

El motor numérico de Iber es el código FORTRAN F90, que resuelve las ecuaciones Navier Stokes 2D integradas en profundidad para aguas poco profundas, conocidas como de Saint Venant, con ecuaciones de cierre turbulento. Para resolver estas ecuaciones se emplea el método de los volúmenes finitos. Iber emplea un esquema numérico tipo “upwind”.

MÉTODO DE COWAN PARA LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE MANNING EN EL LECHO DEL CAUCE

El *Soil Conservation Service (SCS)* propone el método de Cowan (*Cowan, 1956*) para la estimación de la rugosidad en cauces. Este método se basa en la estimación de un valor inicial de la rugosidad y su posterior modificación, según unos valores correctores, para obtener un valor final de la rugosidad. El *US Geological Survey (USGS)* modifica el método de Cowan y lo publica en una guía para la selección de la rugosidad del cauce como método de Cowan modificado (Arcement y Schneider, 1990). Este método expresa el coeficiente de rugosidad como:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$$

Donde:

n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

n_0 es la rugosidad debida a los materiales del cauce.

n_1 es la rugosidad debida al grado de irregularidad del cauce a lo largo del tramo.

n_2 es la rugosidad debida a las variaciones de la sección transversal del cauce a lo largo del tramo.

n_3 es la rugosidad debida al efecto de las obstrucciones a lo largo del tramo.

n_4 es la rugosidad debida a la presencia de vegetación en el tramo.

m es la rugosidad debida a la sinuosidad (meandros) del tramo.

Los valores de la rugosidad debida al material, n_0 , propuestos por Cowan se pueden tomar como valores orientativos teniendo en cuenta que estos valores solo consideran la composición del lecho de una manera muy general. Sumando a n_0 los factores debidos a la irregularidad de las secciones (n_1) y a la variación de la sección transversal (n_2) a lo largo del tramo, se obtiene un número de Manning base (n_b) función de la geometría de la sección y del material que forma el cauce. A este valor habría que añadirle la rugosidad debida a la vegetación (n_4), a la presencia de obstrucciones (n_3) y al trazado en planta del río (m).

$$n_b = (n_0 + n_1 + n_2)$$

En la Tabla 14 se recogen los valores tabulados para los distintos parámetros del método de Cowman, así como los valores escogidos en este TFM.

Condiciones del cauce		Valores		Descripción	Valor elegido
Material	Tierra	n_0	0,020	Cauces de arcilla	0,028
	Roca cortada		0,025	Cauces en roca	
	Grava fina		0,024	Cauces de grava	
	Grava gruesa		0,028		
Grado de irregularidad	Bajo	n_1	0,000	Canaes excavados lisos	0,020
	Menor		0,005	Canales excavados en buenas condiciones	
	Moderado		0,010	Canales con alguna erosión en márgenes	
	Alto		0,020	Canales naturales con secuencias de rápidos y remansos, bolos, raíces descubiertas.	
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0,000	Casi uniforme	0,005
	Ocasionalmente alternante		0,005	Contracciones y expansiones infrecuentes	
	Frecuentemente alternante		0,010 - 0,015	Contracciones y expansiones frecuentes	
Efecto de las obstrucciones	Pequeño	n_3	0,000	Ocupan < 5% del cauce	0,000
	Menor		0,010 - 0,015	Ocupan entre el 5-15% del cauce	
	Apreciable		0,020 - 0,030	Ocupan entre el 15-50% del cauce	
	Alto		0,040 - 0,060	Ocupan > 50% del cauce	
Vegetación	Baja	n_4	0,005 - 0,010	El calado es mayor que tres veces la altura de la vegetación	0,000
	Media		0,010 - 0,025	El calado es entre una y tres veces la altura de la vegetación	
	Alta		0,025 - 0,050	La altura de la vegetación es la del calado	
	Muy alta		0,050 - 0,100	La altura de la vegetación es el doble del calado o la vegetación es muy densa	
Cantidad de meandros	Menor	m	1,000	Sinuosidad entre 1,0 y 1,2	1,000
	Apreciable		1,150	Sinuosidad entre 1,2 y 1,5	
	Alta		1,300	Sinuosidad > 1,5	

Tabla 14. Valores y resultados del método de Cowman para determinar el número de Manning estimado en el lecho del cauce.

Teniendo en cuenta estos datos, obtenemos el valor de n :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m = (0,028 + 0,020 + 0,005 + 0,010 + 0,0075) * 1 = 0,053$$

Modelo digital del terreno

Durante el transcurso del trabajo desarrollado, ante la falta de definición de los modelos digitales del terreno obtenidos y ante la imposibilidad de conseguir un trabajo realizado con anterioridad de mayor precisión, se llevó a cabo un levantamiento del terreno mediante equipo GPS para el análisis del terreno en determinados tramos de la cuenca, elegidos por su proximidad al núcleo urbano de población de Rustaq, y entre otros motivos por su posibilidad de acceso.

Debido a la enorme extensión de los cauces, las condiciones meteorológicas y la imposibilidad de acceder con vehículos a la zona, la toma de datos se hizo árdua tarea, quedando representados pequeños tramos de cauce, de los que utilizaremos únicamente los circundantes al núcleo de población, a partir de ellos se generan mapas de riesgo y peligrosidad por inundación del área donde se concentra la mayor población de esta zona. La Figura 40 muestra la distribución de puntos generados.

El modelo digital del terreno que conforma la base para la realización del modelo tiene una resolución de 30 metros y el sistema de referencia de coordenadas es EPSG: 32640, WGS 84/ UTM 40N.

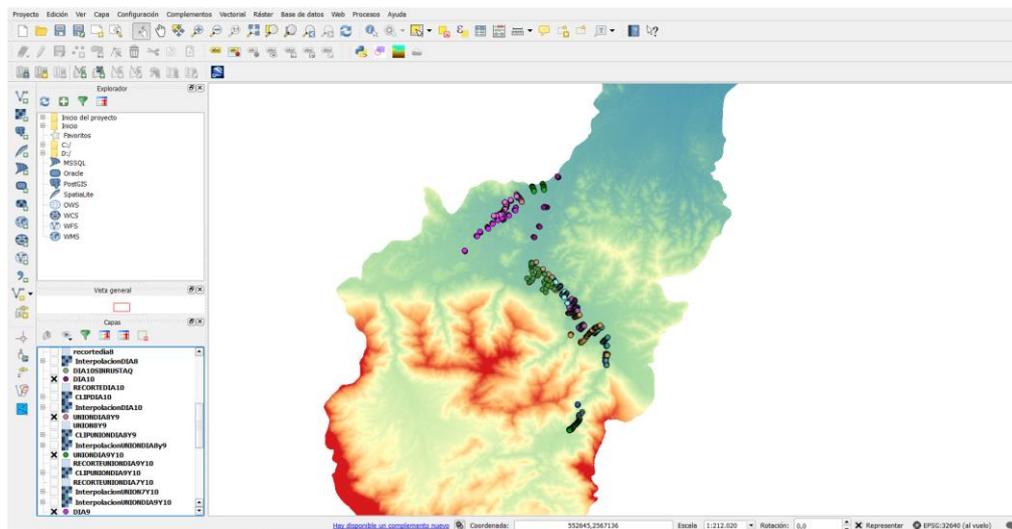


Figura 40. Levantamiento de puntos con GPS.

Se ha procedido a la selección de puntos, considerando únicamente los que definen el tramo en el que una avenida, a su paso por el área de población, podría afectar a la inundación de la misma. Quedando como muestra la Figura 41.

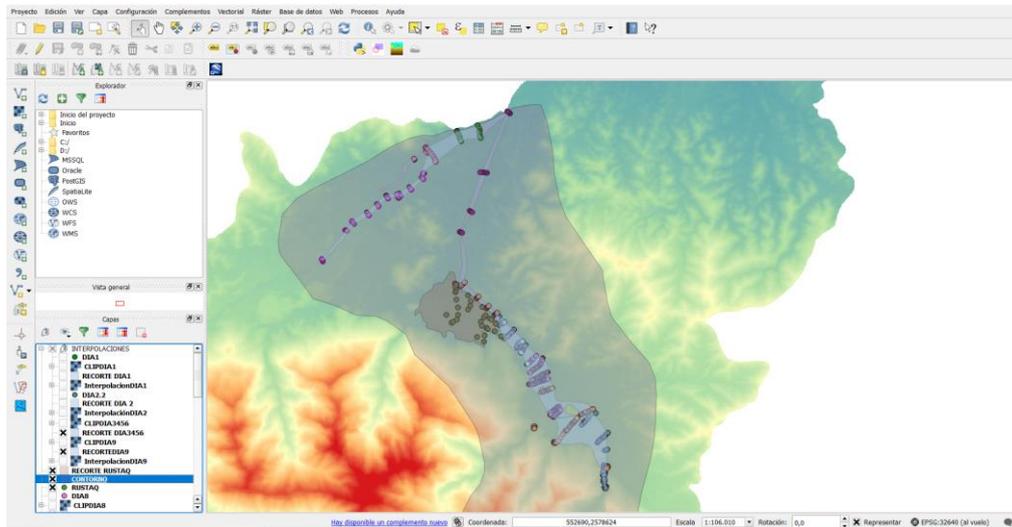


Figura 41. Área de estudio seleccionada.

Geometría

Se ha realizado el recorte de la capa ráster de la zona para trabajar con una geometría de tamaño adecuado para la generación de resultados. A esta capa ráster incorporaremos los datos tomados en campo para una mayor definición en la zona de los cauces.

Así queda el tramo de cauce definido a partir de los datos de cauces tomados en campo. Las condiciones de contorno en IBER han de ser definidas en el contorno de la superficie estudio introducida. Así, el modelo presentará dos entradas de caudal constante, indicadas en rojo y una salida, identificada con una flecha azul en la Figura 42. La población de Rustaq se ve sombreada en color marrón y el área más grande sombreada es el tramo de la cuenca de estudio.

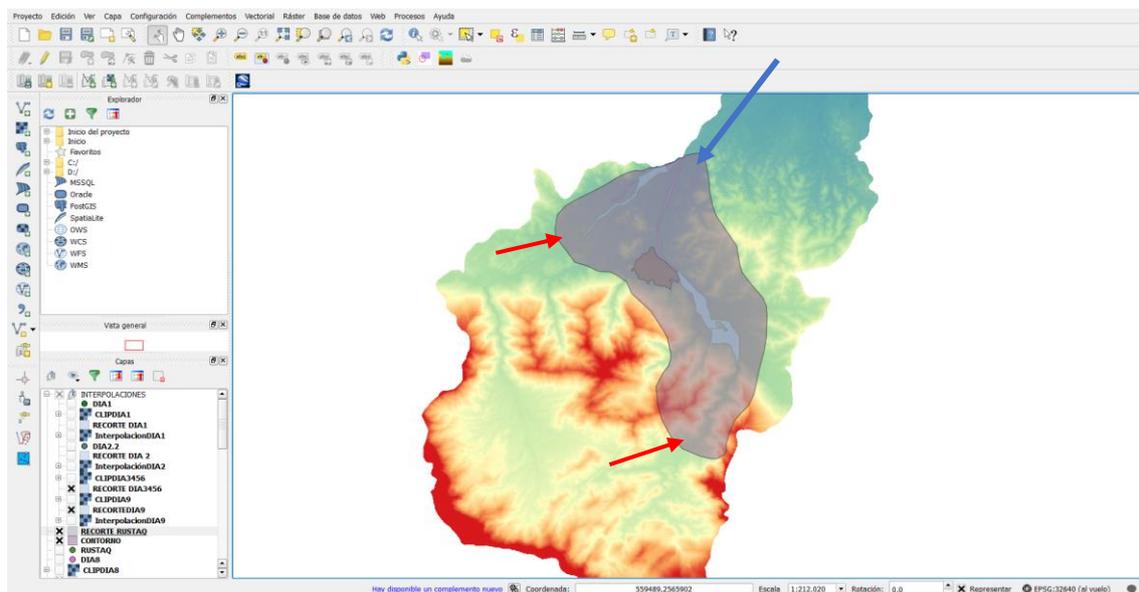


Figura 42. Definición de entradas y salidas de caudal en el modelo IBER.

Procedemos a importar la geometría en IBER. Y modificamos la misma con las interpolaciones de superficie obtenidas a partir de datos de puntos tomados con GPS, para alcanzar una mayor precisión en las zonas de cauce. La Figura 43 muestra la visual de la

geometría obtenida. La geometría está formada por una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN, *Rectangular Triangulated Irregular Network*), esta red ha sido creada a partir de un archivo ASCII que contiene la información topográfica del área de estudio.

Una vez se ha importado el archivo, se colapsa la geometría, de manera que los triángulos que inicialmente han sido creados de forma independiente pasarán a crear una superficie formada por triángulos que compartirán sus lados comunes.

La opción de utilizar RTIN proporciona geometrías muy aproximadas a la topografía “real”, con un número optimizado de elementos y muy robustas frente a problemas de mallado o numéricos. Posteriormente será necesario transformar esta geometría en una malla de cálculo.

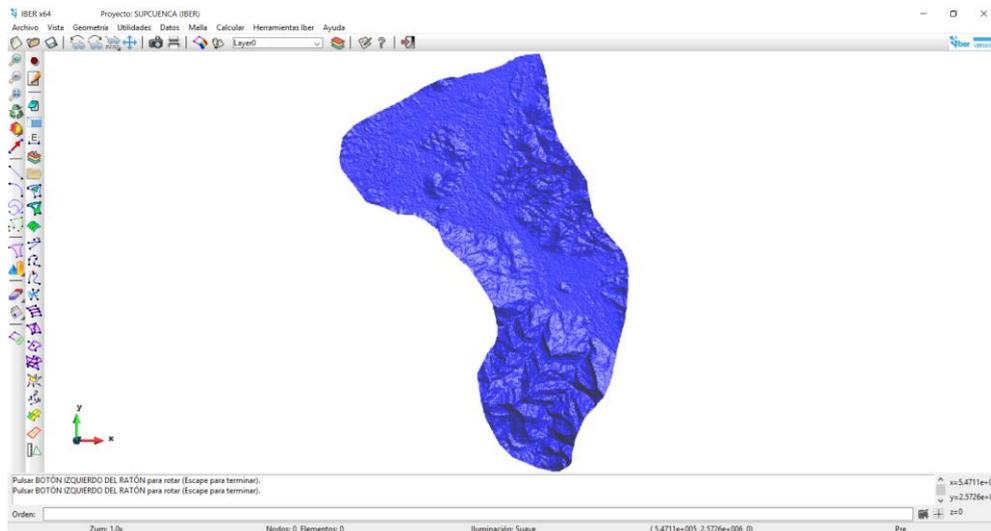


Figura 43. Geometría del terreno en el modelo IBER

Mallado

A partir de la geometría, generamos la malla de cálculo. Accedemos a través del menú Malla, No estructurada, y asignamos tamaño a las superficies que han sido creadas.

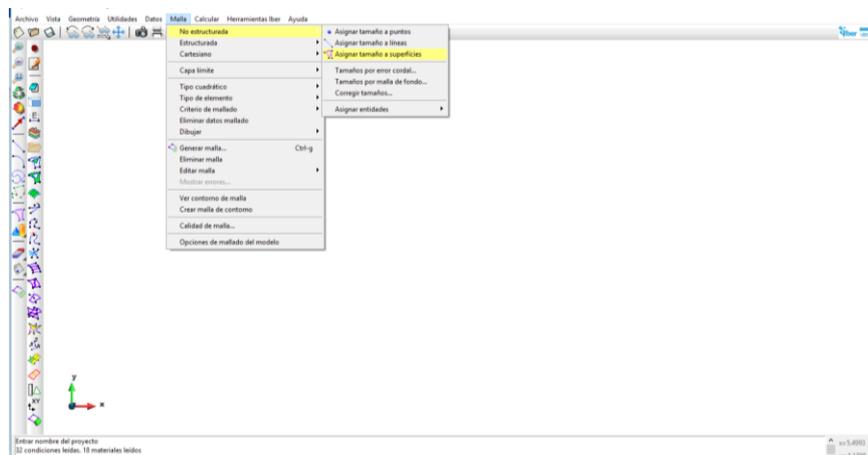


Figura 44. Menú acceso a malla no estructurada en el modelo IBER

A partir de la ventana de entrada de valor que se muestra en la Figura 45 asignamos un tamaño de 5 m. a los elementos de la malla.

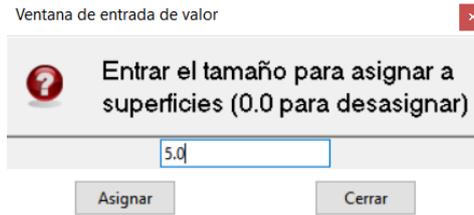


Figura 45. Ventana de asignación del tamaño del elemento de malla en el modelo IBER

Una vez asignadas las superficies generamos la malla de cálculo. Para ello introducimos un tamaño para los elementos que se van a generar en la ventana que aparece en la Figura 46. Se ha asignado un tamaño a los elementos a generar de 10.

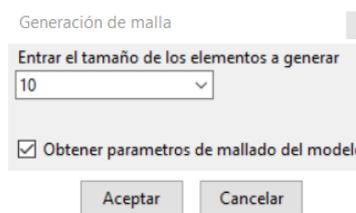


Figura 46. Ventana de generación de malla en el modelo IBER

Aceptada la generación de malla, obtenemos una nueva ventana con información del proceso de mallado, que contiene información en tiempo real del número de nodos y elementos generados, y una gráfica que muestra la evolución temporal del número de nodos generados y la memoria consumida, se muestra la ventana generada en la malla de cálculo en la Figura 47. Finalizado el proceso de mallado obtenemos los datos que ha generado la malla.

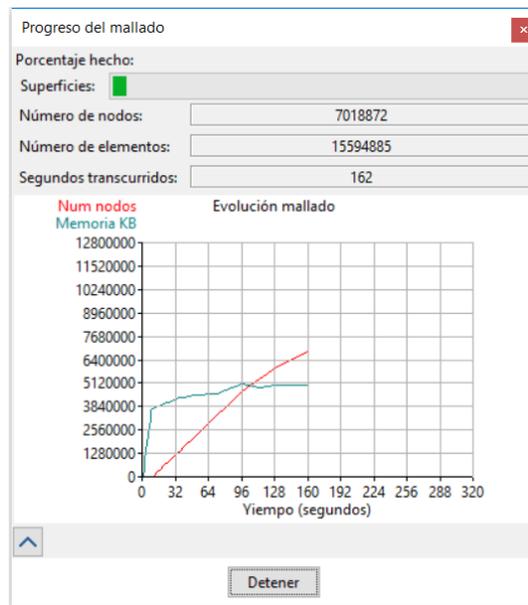


Figura 47. Ventana de evolución del mallado en el modelo IBER

Características de la simulación.

a) Datos del problema

Obtenida la malla de cálculo, introducimos los datos del problema y las condiciones de contorno del modelo. En las figuras que se muestran a continuación se visualizan todos los valores de los parámetros elegidos en cada submenú del programa para la simulación.

Para el acceso a los datos de este apartado entramos en el menú Datos/Datos del Problema y vamos seleccionando cada uno de los submenús que nos aparecen para introducir los parámetros que definirán el resultado de la simulación.

Se introducen los “Parámetros de tiempo” dentro del apartado Datos del problema, se definen:

- Instante inicial: valor del instante de tiempo de inicio del cálculo.
- Tiempo máximo de simulación: valor del instante de tiempo final del cálculo.
- Intervalo de resultados: fija el incremento de tiempo entre instantes de escritura de resultados.

Instante inicial (s)	0
Tiempo máximo de simulación (s)	172800
Intervalos de resultados (s)	1800

Tabla 15. Datos del Problema. Parámetros de tiempo introducidos.

Con los datos de la pestaña *General* ventana que muestra la figura 51 se fijan algunos parámetros de cálculo y del esquema numérico.

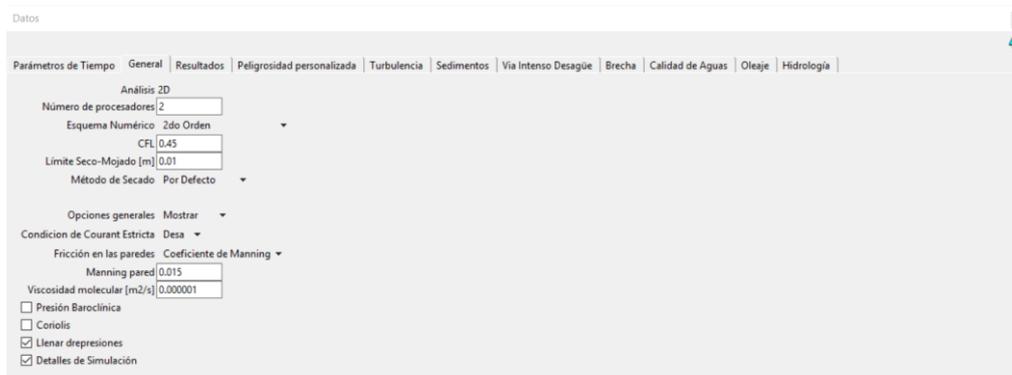


Figura 48. Ventana de Datos del Problema. General.

A continuación, se comentan las opciones de la ventana de la Figura 48:

- El *número de procesadores* introduce los procesadores que se quieren emplear en el cálculo. Iber tiene implementada una versión de paralelización en OPEN MP, que permite emplear varios procesadores.
- El *esquema numérico* nos permite elegir entre un esquema numérico de primer orden o uno de segundo orden. A menor orden, menor coste computacional y menor precisión.
- *CFL* es el valor del número de Courant-Friedrichs-Levy para conseguir un esquema numérico estable. Se ha considerado el valor (0,45).
- El *límite Seco-Mojado*, expresado en metros, es el umbral de calado para considerar que un elemento esta seco y no se realice ningún cálculo hidrodinámico en él.

- El *método de secado* elegido, por defecto, hace que en Iber, cuando un elemento tiene un calado inferior al valor límite elegido en un instante de tiempo, por defecto lo considere seco, y guarda en memoria el valor de dicho calado. Para volver a estar mojado, el elemento debe “llenar” antes ese calado. Es un método robusto y con el cual el tiempo de cálculo no depende del proceso de secado-mojado.
- *Condición de Courant Estricta*, cambia la manera de determinar el lado mínimo para el cálculo de la condición de Courant.
- La opción de *fricción en las paredes* permite decidir si se considera o no la rugosidad en las paredes verticales del contorno, así como el método para calcularla. Se puede definir por el *Coefficiente de Manning* o la *Altura de rugosidad*.
- El *llenado de depresiones*, llena numéricamente las depresiones de la topografía.
- Por último, al activar la opción *Detalles de Simulación*, se crea un archivo con los detalles de la simulación.

En la Figura 49, se muestra la pestaña de *Resultados*, Iber permite configurar los resultados que se quieren analizar. Están disponibles las variables hidráulicas básicas, así como los valores máximos, que guarda el máximo valor de la variable correspondiente, en cada celda, a lo largo del tiempo de simulación.

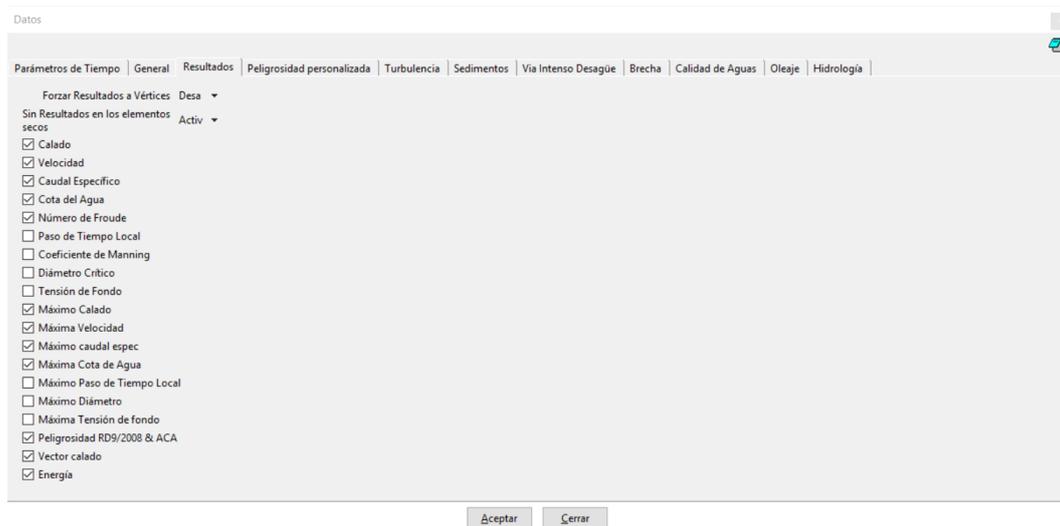


Figura 49. Ventana de Datos del Problema. Resultados.

Para determinar los índices de peligrosidad que se verá reflejada en los mapas, se ha empleado el gráfico que muestra la Figura 50. Con ello, se han obtenido los valores que se muestran en la tabla de la ventana que aparece en la Figura 51, y se han establecido tres niveles de peligrosidad, en función del riesgo para las vidas humanas, en Leve, Moderado y Grave que se corresponderían con los intervalos 3, 2 y 1 de las Figura 50, respectivamente.

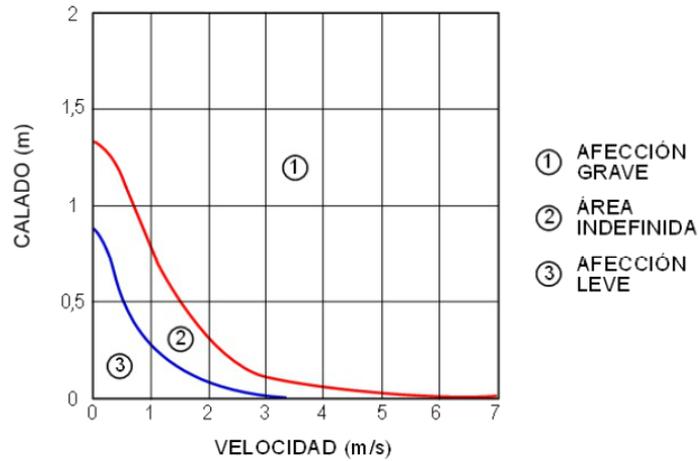


Figura 50. Riesgo para las vidas humanas en función del calado y la velocidad. Fuente: Federal Emergency Management Agency, USA

Se considera afección grave aquella que no puede ser reparada de forma inmediata, impidiendo permanentemente y sin alternativa el servicio, como consecuencia de los potenciales daños derivados del calado y la velocidad de la onda.

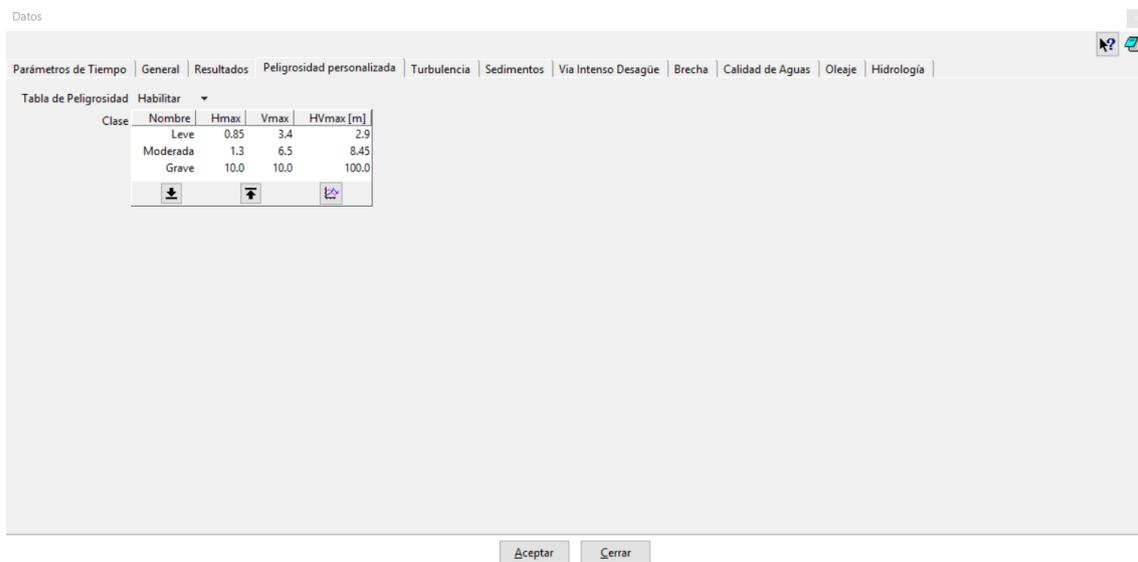


Figura 51. Riesgo para las vidas humanas en función del calado y la velocidad. Fuente: Federal Emergency Management Agency, USA

La ventana que muestra la Figura 55 permite indicar si se considerará la turbulencia en la simulación.

El modelo de turbulencia elegido es el de mayor complejidad de los cuatro modelos que presenta Iber. Requiere la introducción del calado límite por debajo del cual no se aplica.



Figura 52. Ventana de Datos del Problema. Turbulencia. K-epsilon.

b) Rugosidad

Un paso fundamental para la simulación es la asignación de la rugosidad a todos los elementos del modelo. Iber presenta diferentes formas de aplicar la rugosidad al terreno, es este caso se ha aplicado a través de la opción *Uso del Suelo*, desde el menú *Rugosidad*.

Por falta de datos más precisos, se ha utilizado en método de Cowman para la obtención de la rugosidad y el valor obtenido se ha aplicado a todo el modelo, por considerar que prácticamente la totalidad de los cauces y zonas de inundación presentan las mismas características. El valor de coeficiente de Manning obtenido ha sido 0.053, según se detalla en la Tabla 14, al inicio de este capítulo. Se introduce en el modelo como se muestra en la Figura 53.

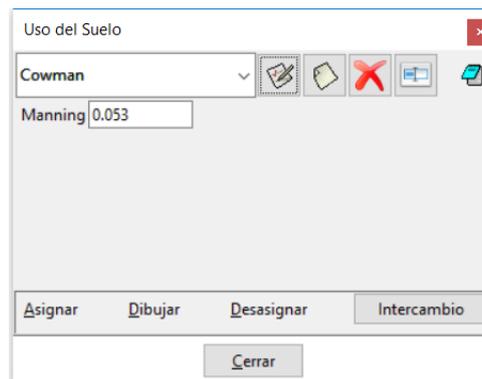


Figura 53. Ventana de asignación de rugosidad por uso del suelo.

c) Hidrodinámica

Condiciones de contorno

Una vez introducidos los datos que se aplicarán al modelo, se asignan las condiciones de contorno y condiciones iniciales a través del menú *Hidrodinámica*.

Para la realización de la simulación, son parámetros imprescindibles las condiciones de contorno y condiciones iniciales, el resto de los parámetros que presenta el menú *Hidrodinámica* serán opcionales en función del tipo de problema que se quiera llevar a cabo.

Se definen las condiciones de contorno a partir de las condiciones de entrada y las condiciones de salida, Figuras 54 y 55 respectivamente.

Se va a realizar una simulación de caudal constante con el caudal pico del evento, debido a que no hay datos del hidrograma, se realizará el cálculo del caudal con los métodos propuestos para este fin en Omán. Los resultados quedarán del lado de la seguridad al no producirse la atenuación del caudal pico durante la simulación.

La asignación de la condición de entrada se realiza en términos de *Caudal Total*, esta reparte el caudal introducido en toda la sección. El régimen subcrítico establece que la condición de entrada estará afectada por el flujo de aguas abajo. El modelo se ha definido con dos puntos de entrada y una sección de salida, establecidos como se refleja en la Figura 42. Esta condición se aplica por considerar un flujo en régimen lento, alimentando así el modelo con un caudal constante.

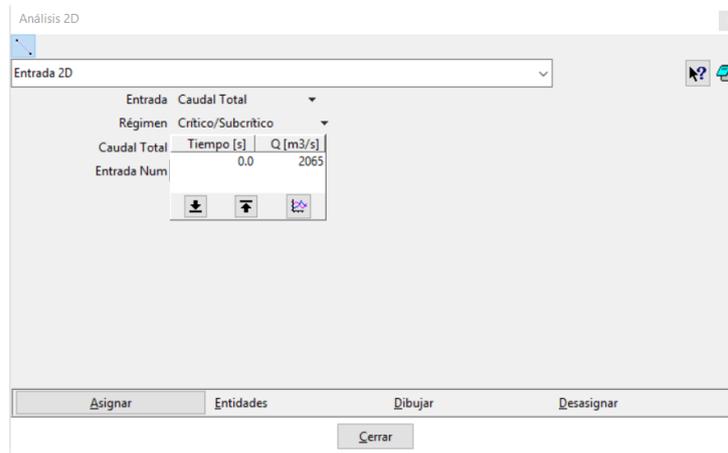


Figura 54. Ventana de asignación de condición de entrada. Condiciones de contorno.

Con la condición de contorno de salida, se indica el lugar por el que debe salir el agua en el modelo. En el resto de las secciones, el agua siempre encontrará una barrera que no puede sobrepasar.

Se asigna al modelo una salida en régimen rápido, en la que se permite asignar condiciones de régimen crítico.

La condición adoptada de calado crítico es comúnmente aplicada en el caso de inundaciones repentinas.

Condiciones iniciales

Estas condiciones son las que definen el estado inicial del modelo en el inicio de la simulación. Asumen que la velocidad del agua es nula en el instante inicial y permiten establecer el calado o nivel de lámina de agua inicial. Deben ser asignadas sobre la totalidad del dominio de cálculo.

Se ha asignado una condición de calado igual a cero, con la cual se considera que todo el dominio está seco al inicio de la simulación.

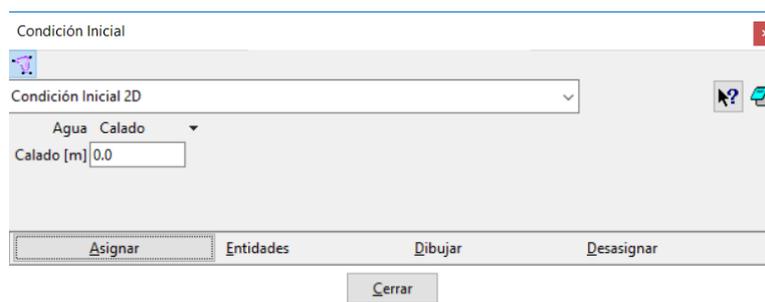


Figura 55. Ventana de asignación de calado inicial. Condiciones iniciales.

Resultados

Para mostrar los resultados de IBER con información ampliada, el estudio se ha centrado en el área de población de **Rustaq** y el área aguas abajo de la localidad por ser la que mayor densidad de población presenta.

El cauce, a su paso por la localidad, presenta un régimen efímero, en condiciones normales no lleva agua. Se observan asentamientos en la superficie ocupada por el cauce, así como la inundación de estos cuando el cauce transporta agua en un evento de tormenta.

Así mismo se ve como el agua sobrepasa carreteras y vías de comunicación que forman parte del cauce seco.

En los siguientes apartados se analiza el episodio calculado para la tormenta que tuvo lugar el 6 de junio de 2007 a consecuencia del ciclón Gonu, que por su gran intensidad equivale a la calculada para un periodo de retorno de 50 años teniendo en cuenta los datos de intensidad de lluvia que aportan los mapas creados por el Ministerio de Transporte, que se muestran en el apartado II.IV. Debido a que las ecuaciones de regresión para mayores periodos de retorno no muestran confianza, no se detallan los resultados para mayores periodos de retorno.

Finalmente se muestra un mapa de peligrosidad con los parámetros definidos en la Figura 54 y se analizan las principales zonas que quedan afectadas por la tormenta. En este sentido la legislación española, mediante el RD 9/2008 por el que se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por RD 846/1986, establece que para considerar la probabilidad de que una corriente produjese graves daños sobre las personas y los bienes, las condiciones hidráulicas durante la avenida deberán cumplir al menos uno de los siguientes criterios:

- a) Calado $> 1\text{m}$
- b) Velocidad $> 1\text{m/s}$
- c) Producto Calado x Velocidad $> 0.5\text{m}^2/\text{s}$

Con estos valores de referencia podemos observar los resultados que se muestran a continuación y confirmar que, en cualquiera de los casos, el cauce en un evento de tormenta va creando áreas clasificadas según lo anterior, en las que se podrían producir graves daños sobre las personas y los bienes durante la mayoría del total de su recorrido.

Análisis Evento ciclón Gonu

Al lanzar el cálculo, en la pantalla que muestra la Figura 56 aparece el avance de comprobación de conectividades, es decir, la relación entre los diferentes elementos de cálculo.

- *Initial volume*: indica el volumen inicial, el cual depende del caudal que se le haya asignado como condición de entrada y de las líneas donde se le asigna la condición de entrada. Depende de si se considera todo seco o no.
- *Simulation time*: indica el tiempo de simulación que lleva en segundos, y los intervalos de tiempo que se van visualizando son los intervalos que se han definido. En Datos del problema, Parámetros de tiempo.
- *Time step*: es el tiempo de paso de cálculo que se establece como condición para garantizar la estabilidad y convergencia del método.
- *Time*: es el tiempo en que se ha obtenido ese resultado, viene expresado por la hora en tiempo real.

- Q_{in} : es el caudal de entrada en m^3/s . este caudal debe coincidir con el asignado en las condiciones de entrada.
- Q_{out} : es el caudal de salida y viene expresado en m^3/s .

Se observa como en el paso de tiempo 18000, el caudal de salida ya ha igualado el caudal de entrada.

Información de salida para 'current'

NUMERICAL SCHEME: Roe 2nd Order

Initial volume: 2161.48 m3

Simulation time	Time step	Time	Q_{in}	Q_{out}
0.000	1.00000	23:37:00:10	0.000	0.000
1800.171	0.23819	0:32:06:30	3519.462	0.000
3600.094	0.18961	1:26:55:03	3519.462	0.000
5400.011	0.22049	2:24:21:04	3519.462	0.000
7200.127	0.18224	3:24:12:97	3519.462	0.000
9000.045	0.24317	4:24:21:25	3519.462	0.000
10800.024	0.18434	5:25:06:35	3519.462	0.000
12600.203	0.23697	6:26:38:46	3519.462	0.000
14400.131	0.23278	7:28:25:50	3519.462	0.000
16200.022	0.14724	8:30:23:33	3519.462	1562.597
18000.087	0.19477	9:32:36:07	3519.462	3380.167
19800.183	0.24645	10:34:34:03	3519.462	3707.531
21600.177	0.24067	11:36:29:46	3519.462	3735.592
23400.012	0.25936	12:42:00:00	3519.551	3839.729
25200.004	0.23665	13:49:29:73	3519.462	3844.863
27000.044	0.23425	14:57:15:58	3519.545	3837.272
28800.216	0.23884	16:05:30:61	3519.462	3853.127

Cerrar

Figura 56 . Cuadro de información del proceso de cálculo

A continuación, se muestran en diferentes imágenes los resultados de la inundación en el paso de tiempo de simulación equivalente a un tiempo de 18000 segundos, donde podemos ver los valores máximos de la inundación.

La Figura 57 muestra los valores de calado que la inundación va dejando a su paso. Existen valores en las zonas del cauce de hasta 4 m. de inundación, localizándose zonas puntuales en las que el calado alcanzaría valores de hasta 7 m.



Figura 57. Representación de los resultados de máximo calado en m.

El análisis de la velocidad en el tramo muestra valores medios que alcanzan los 3m/s. (Figura 58).

Por último, se ha obtenido el parámetro caudal específico que alcanza valores en el cauce principal entre 13 y 19 m²/s. (Figura 59).

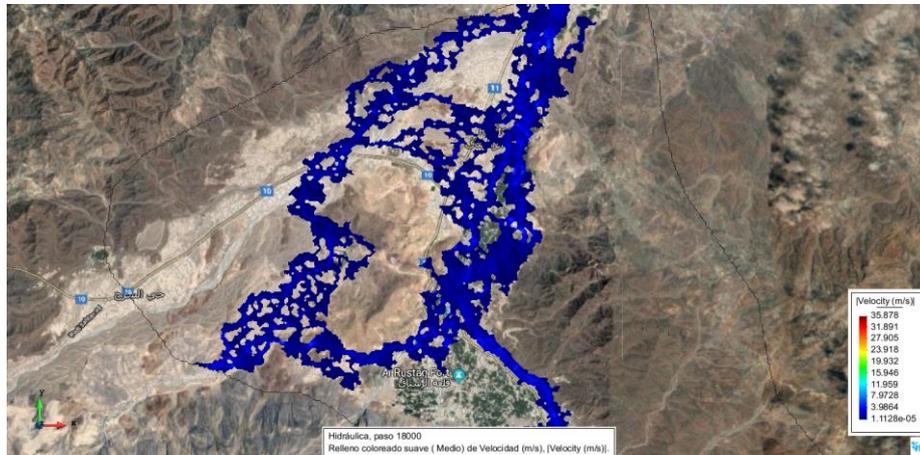


Figura 58. Representación de los resultados de máxima velocidad en m/s.

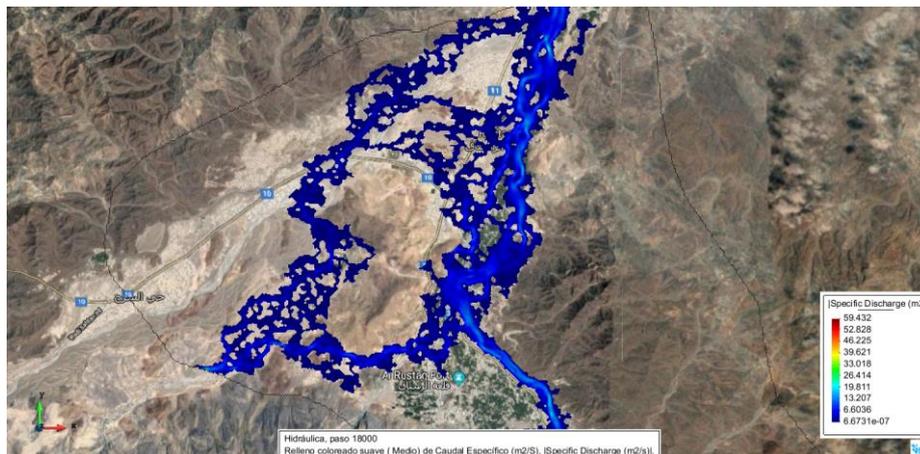


Figura 59. Representación de los resultados de máximo caudal específico en m²/s.

El análisis de los resultados muestra como principal afección la inundación de zonas de asentamientos de población en las que encontramos viviendas, áreas de cultivo, zonas comerciales e infraestructuras afectadas, principalmente carreteras y caminos de acceso.

Los resultados del mapa de peligrosidad establecen zonas con máxima peligrosidad a lo largo de todo el cauce. Es de destacar que en este caso sería un factor muy importante a tener en cuenta ya que el cauce se presenta en estado seco durante todo el año. Si bien en su mayor parte no está ocupado ya que el terreno es muy irregular y rocoso, si que hay existencias de asentamientos en algunas zonas concretas incluso se ve atravesado en ocasiones por carreteras y caminos de acceso a las viviendas y zonas comerciales.

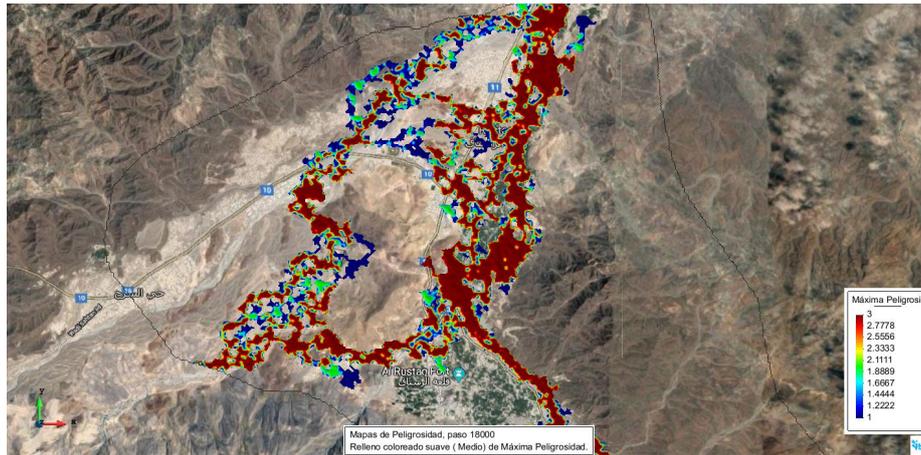


Figura 60. Representación de los resultados de máxima peligrosidad.

En la Figura 61 se han seleccionado 4 áreas en las que el área de máxima peligrosidad se ve ocupada por asentamientos de población y por tanto deberían ser consideradas como áreas de especial atención y protección.

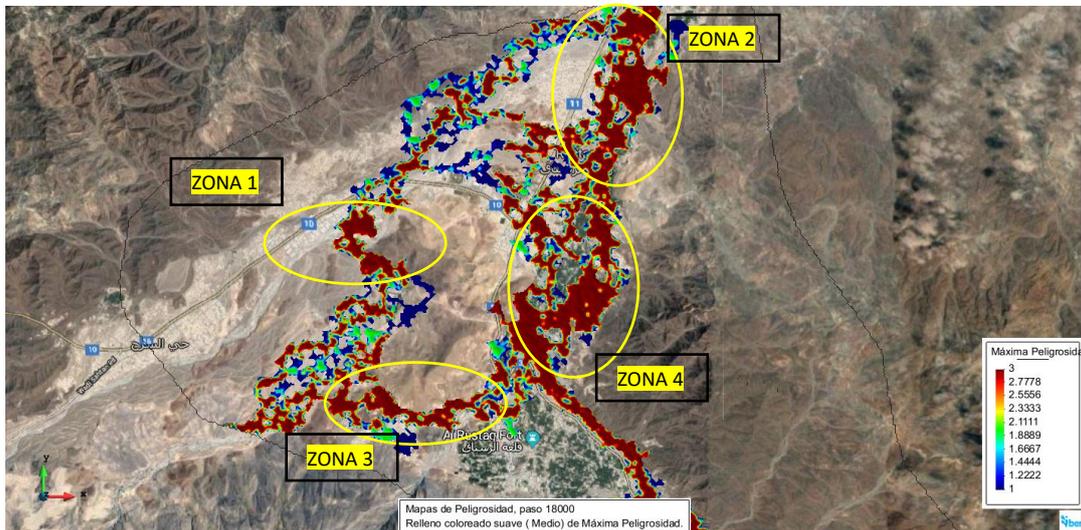


Figura 61. Selección de principales áreas afectadas. Representación de los resultados de máxima peligrosidad.

En la Figura 62 y siguientes se muestran con detalle las zonas seleccionadas por su máxima peligrosidad y se analizan los asentamientos que han tenido lugar en las mismas.

La Figura 62 corresponde a los asentamientos de la Zona 1. Se aprecian diferentes zonas comerciales, áreas industriales, zona residencial y edificios públicos que de forma continuada atraen concentraciones de personas. En esta zona, el calado alcanza los 2 m. según el mapa de calados máximos.



Figura 62. Área afectada 1.

Las Figuras 63 y 64 muestran zonas que también son gravemente afectadas por la inundación, clasificadas como Zonas 2 y 3 en la Figura 61bis, se trata de zonas con viviendas rurales, zona principalmente de cultivos y edificios públicos que de forma continuada atraen concentraciones de personas.



Figura 63. Área afectada 2.



Figura 64. Área afectada 3.

Por último, la Figura 65 muestra el área seleccionada como Zona 4. Este enclave en el que se localizan numerosas edificaciones residenciales presenta elevada peligrosidad por estar situado justo en la falda de las montañas.

Todo el area que queda encerrada en la falda de la montaña presenta especial peligrosidad, ya que las pronunciadas pendientes y los cauces convertidos gran parte de las veces en grandes cañones de roca, hacen que los calados sean elevados y la velocidad sea mayor que en las zonas aguas abajo.



Figura 65. Área afectada 4.

En los eventos de ciclones ocurridos en Omán, esta localidad siempre se ha considerado como una de las más afectadas por su situación geográfica que deja a toda su población indefensa y a la vez su elevada densidad de población, que ante un episodio de inundación estas característica hacen que aumenten los daños a personas y materiales cuantificados.

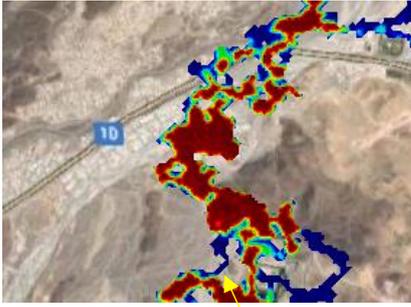


Figura 62bis. Área afectada 1.

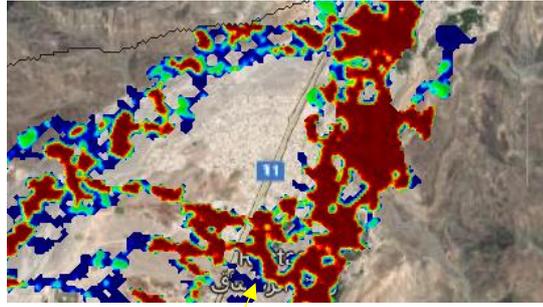


Figura 63bis. Área afectada 2.

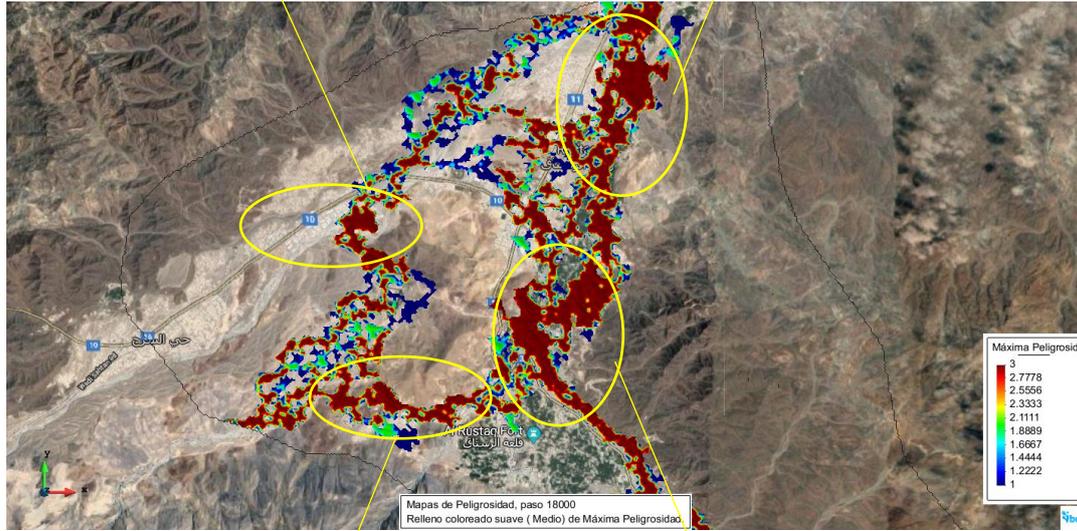


Figura 61bis. Selección de principales áreas afectadas. Representación de los resultados de máxima peligrosidad.

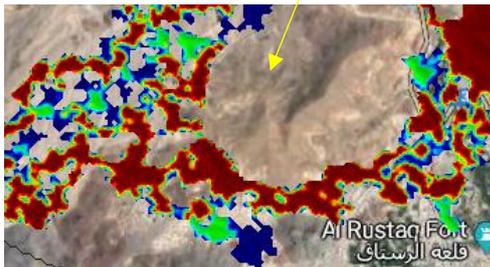


Figura 64bis. Área afectada 3.

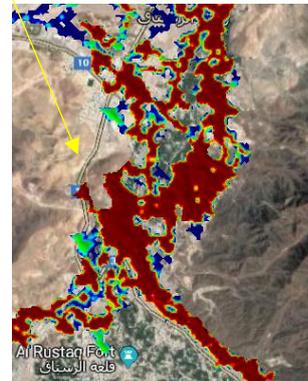


Figura 65bis. Área afectada 4.

CONCLUSIONES

La gestión de recursos hídricos adquiere cada vez más la necesidad de enfoques y estudios multidisciplinares.

Una gestión integrada requerirá la visión de los sistemas medioambientales por parte de ecólogos, geólogos y profesionales del sector, la experiencia técnica de ingenieros, el conocimiento del mercado por parte de economistas y la apreciación de los factores sociales y políticos aportados por personal científico y profesionales del ámbito de las ciencias sociales, sin olvidar el apoyo de los legisladores. Esto es, es un campo que acoge y necesita de aportaciones de multitud de profesionales.

El interés por establecer el camino hacia una mejor planificación de los recursos hídricos se ha visto reforzado, más aun, por la población y todas las comunidades al aceptar la conexión entre el cambio climático y el aumento de sucesos climáticos extremos, ya sean inundaciones, o sequías.

Surge la cuestión de si la población ha de estar preparada para resistir y hacer frente a estos eventos climáticos extremos, o si, por el contrario, hemos de adaptarnos al cambio y cambiar nuestras costumbres en función de la evolución de los patrones climáticos, como ha ocurrido a lo largo de la historia, cuando las poblaciones migraban en busca de recursos.

El comportamiento social es uno de los pilares que se ha de tener en cuenta en la planificación territorial, existe la necesidad de dotar los territorios en función de las necesidades presentes sin obviar las necesidades futuras.

En este estudio se ha analizado el caso concreto de una zona de Omán, la población de Rustaq, a falta de datos concretos sobre la evolución de la población en la misma, se han recabado los datos de población y crecimiento demográfico del país. Omán ha experimentado el siguiente crecimiento demográfico, en datos de los últimos cincuenta años:

	1970	1990	2000	2010	2017
Población total	732.000	1.868.000	2.264.000	2.782.000	4.550.538

Tabla 16. Valores de número de habitantes en Omán en los años 1970, 1990, 2000, 2010 y 2017 que muestran el crecimiento demográfico de los últimos 50 años. Wikipedia.

La población se duplica aproximadamente cada dos décadas según los datos conocidos en 1970.

Aproximadamente el 50% de la población de Omán reside en las zonas de Muscat y Al-Batinah. EL 45% de la actual población se corresponde con ciudadanos expatriados. Por lo general trabajadores que acuden principalmente de India, Pakistán, Bangladesh, Marruecos, Jordania y Filipinas. El 78 % de la población, actualmente reside en los núcleos de población urbanos.

El nivel de conocimiento y la falta de interés en estudios hidrológicos hace que los asentamientos de población no tengan en cuenta las consecuencias de cualquier evento climatológico adverso, es decir no hay una ordenación urbanística acorde con las condiciones hidrológicas del territorio. Las poblaciones proceden de asentamientos rurales y se desarrollan en torno a ellos, desarrollando infraestructuras que permiten el acceso a estos núcleos de población, que se sitúan en zonas de abundantes recursos, agua y tierra de cultivo principalmente.

No es un asunto menos importante la escasez de agua que presenta el país en general. Las posibilidades de encontrar nuevas fuentes de agua son muy limitadas. El gobierno trabaja en el aumento de suministros de agua, adoptando medidas para la conservación y mejorando las políticas de gestión.

Hoy en día la implicación de todas las comunidades se hace necesaria para que una política de agua pueda resultar exitosa. Se exige que los ciudadanos sean conscientes de que la seguridad alimentaria debe estar por encima de la autosuficiencia alimentaria. El gobierno pretende que, en caso de necesidad, se recurra a la importación de alimentos en el corto o medio plazo para aliviar las presiones sobre los recursos hídricos.

Cuando el asunto empieza a despertar especial interés se introducen valores de políticas de agua en la educación y se trata de sensibilizar a la comunidad ciudadana y administrativa en desarrollar políticas integradas en la gestión de recursos hídricos.

En una encuesta realizada durante el transcurso del proyecto a la población local de diferentes áreas urbanas, el 85% de los encuestados afirmaba que no sabían cómo actuar ante un evento de avenida de inundación, la mayoría de ellos reconocía que el primer instinto es salir de casa e intentar ir a un lugar más seguro, pero no son conscientes del peligro que conlleva una avenida de inundación de elevada velocidad ni siquiera que muchas de las carreteras que permiten la evacuación de estos núcleos de población discurren a través de los cursos de agua o cruzan los mismos.

En el interior de los cauces se han construido vías de acceso a las poblaciones que, por supuesto, son devastadas tras un periodo de fuertes lluvias con el consiguiente coste económico que conlleva la reparación y puesta en servicio.

Todo esto no es muy diferente a lo que ocurre en otros países más desarrollados y con mayores conocimientos en la materia. Lo que es destacable es la desinformación de la población y la falta de planificación que agrava las consecuencias derivadas de estos eventos extremos.

Son numerosos los estudios encontrados y consultados, tanto de empresas particulares, como de instituciones públicas y universidades, que centran sus investigaciones en temas relacionados con los recursos hídricos del país, estudios de aguas subterráneas, almacenamientos de agua en embalses, reutilización, optimización y planificación de regadíos, planificación y uso del suelo, etc. Y todos, bajo las mismas hipótesis concluyen en la misma cuestión, se necesita una buena gestión integrada de todos los recursos hídricos disponibles. No se pueden abordar planteamientos independientes en materia de aguas. Se necesita a su vez una regulación con una legislación que sea eficaz y que toda la información esté disponible para consulta y conocimiento de todos los ciudadanos interesados y afectados.

En cuanto a los resultados obtenidos, resaltar que si bien no existe una gran precisión en los mismos, sí que ha resultado un trabajo muy interesante desde el punto de vista del análisis regional del recurso hídrico, conocer y poder comparar la gestión o falta de la misma entre los distintos países conocidos, en este caso por ejemplo podríamos hacer una comparación entre España y Omán, nos ha aportado una visión de la necesidad que existe en otra región del mundo de aporte de conocimiento, de la propuesta de soluciones técnicas, de promover el apoyo de empresas y profesionales especialistas en esta área geográfica que aun con importantes recursos energéticos y económicos carece de algo que para nosotros está tan a mano como son equipos de profesionales para realizar la toma de decisiones que requiere la planificación de todos los recursos disponibles así como la coordinación entre organismos y entidades responsables.

Por último, los resultados arrojados por el modelo, si que simulan perfectamente la inundación, pero al no disponer de la cartografía adecuada que se emplearía hoy en día con los medios existentes para este tipo de trabajos, se ha trabajado con un modelo digital del terreno

de 30x30 metros y no se puede valorar la exactitud de los resultados, siendo la incertidumbre muy alta en las áreas obtenidas de peligrosidad y riesgo de inundación. Aun así, el resultado general del trabajo ha sido positivo en cuanto a que muestra todas las necesidades y carencias de planificación y gestión ya comentadas y serviría para que los gobiernos no obviasen algo tan evidente como es la imposibilidad de evitar un evento extremo de lluvia y por tanto la necesidad de estudio, de análisis, de toma de datos, etc. que es necesaria para poder abordar proyectos futuros que pudiesen aportar mayor certidumbre y fuesen de utilidad para procurar una mayor resiliencia del territorio y aportar el bienestar y la seguridad necesarios a la población ante la llegada de nuevos eventos de ciclones o inundaciones como los ya ocurridos.

ANEXO 1. HOJA DE CÁLCULO MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO SCS.

HOJA DE CÁLCULO Y RESULTADOS MÉTODO NÚMERO DE CURVA

	Grupo número de curva		A
CN	Número de Curva (CN)	Tabla 8	59
S	Profundidad máxima de almacenamiento (S) (mm)	$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$	176,51
I	Coefficiente inicial de infiltración (I) (mm)	$I = 0,2 * S$	35,30
P	Valor de precipitación dada en 24 h (mm)	P	94
E	Profundidad de escorrentía (mm)	$Escorrentia = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a}$	14,65
A	Área de la cuenca (A) (Km2)	A	144
Fp	Factor de ajuste adimensional (Fp)	Fp (Tabla)	0,72
		$\log(q_u) = C_0 + C_1 * \log(T_c) + C_2 * [\log(T_c)]^2$	0,50
qu	Pico unitario de descarga		3,16
la/P		la/P	0,3755
C0	Coefficiente 0 para la ecuación de caudal pico		2,392
C1	Coefficiente 1 para la ecuación de caudal pico		-0,607
C2	Coefficiente 2 para la ecuación de caudal pico		-0,071
Tc	Tiempo de concentración (min)	$Tc = \frac{1}{52} * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$	268,02
H	Diferencia de cota en tre el punto alto y salida del tramo(m)		269
L	Longitud del tramo (m)		25000
Qp	Caudal pico (m3/s)	$Q_p = 4.3044 * 10^{-4} * q_u * Escorrentia * A * F_p$	2064,90

4 DE JUNIO DE 2010

Percentage of pond and swamp areas	Pp
0	1
0.2	0.97
1	0.87
3	0.75
5	0.72

Table 12.2.5.1 Dimensionless Pond Adjusting Factor (USDA, 1986)

Rainfall Distribution Type	I _a / P	C ₀	C ₁	C ₂
	0.1	2.553	-0.616	-0.164
	0.3	2.465	-0.623	-0.117
	0.35	2.419	-0.616	-0.088
	0.4	2.364	-0.599	-0.056
	0.45	2.292	-0.570	-0.023
	0.5	2.203	-0.516	-0.013

Table 12.2.5.2 Coefficients for Unit Peak Discharge Equation (USDA, 1986)

INTERPOLACION

	C0	C1	C2
0,05	-0,0526	0,017	0,032
0,0255	-0,026826	0,00867	0,01632
	2,419	-0,616	-0,088
	2,392174	-0,60733	-0,07168

ANEXO 2. HOJA DE CÁLCULO ECUACIONES DE REGRESIÓN

HOJA DE CÁLCULO Y RESULTADOS ECUACIONES DE REGRESIÓN

	Tipo hidrológico de suelo		A
NC	Número de Curva (NC)	Tabla X	59
S	Profundidad máxima de almacenamiento (S) (mm)	$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$	176,51
I	Coefficiente inicial de infiltración (I) (mm)	$I = 0,2 * S$	35,30
P	Valor de precipitación dada en 24 h (mm)	P	94
A	Área de la cuenca (A) (Km2)	A	144
E	Profundidad de escorrentía (mm)	$Escorrentía = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a}$	14,65
E5	Profundidad de escorrentía (mm)	5 años	0,00
E10	Profundidad de escorrentía (mm)	10 años	1,13
E25	Profundidad de escorrentía (mm)	25 años	4,28
E50	Profundidad de escorrentía (mm)	50 años	9,03
E100	Profundidad de escorrentía (mm)	100 años	17,35

PRECIPITACIÓN (P)(mm)	MSS	Rof f
36	0,01076	0,000
50	0,01076	12,965
65	0,01076	3,425
80	0,01076	1,622
100	0,01076	0,844

$$Q_5 = 2.557 A^{0.526} MSS^{0.127} P_5^{0.772} R_{of f}^{0.506} \quad 0,00$$

$$Q_{10} = 2.571 A^{0.557} MSS^{0.144} P_{10}^{0.798} R_{of f}^{0.605} \quad 2231,91$$

$$Q_{25} = 0.851 A^{0.745} MSS^{0.243} P_{25}^{0.862} R_{of f}^{0.62} \quad 899,18$$

$$Q_{50} = 0.629 A^{0.908} MSS^{0.301} P_{50}^{0.742} R_{of f}^{0.548} \quad 2005,77$$

$$Q_{100} = 0.175 A^{0.95} MSS^{0.245} P_{100}^{0.887} R_{of f}^{0.298} \quad 366,44$$

ANEXO 3. LISTA DE TABLAS Y LISTA DE FIGURAS.

A) LISTA DE TABLAS:

	Pág.
Tabla 1. Dimensiones cuenca Wadi Al Fara, Omán.	21
Tabla 2. Valores constantes para ecuaciones IDF para las tres zonas hidrológicas. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	30
Tabla 3. Valores de coeficiente de escorrentía asociados con la formulación racional (ASCE, 1960).	32
Tabla 4. Valores de coeficiente de escorrentía en áreas rurales (ASCE, 1960).	33
Tabla 5. Límites de lluvia estacionales en función de las condiciones previas del terreno.(SCS, 1972)	36
Tabla 6. Número de Curva de escorrentía para áreas urbanas.(USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	40
Tabla 7. Número de Curva de escorrentía para áreas rurales cultivadas. (USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	41
Tabla 8. Número de Curva de escorrentía para otras áreas rurales. (USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	42
Tabla 9. Factor de ajuste adimensional. (USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	43
Tabla 10. Coeficientes para la ecuación pico de descarga. (USDA,1986) (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	44
Tabla 11. Ecuaciones de regresión para distintos periodos de retorno, Omán. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	45
Tabla 12. Resultados de parametros a introducir en ecuaciones de regresión para la región de estudio.	51
Tabla 13. Valores de factor de crecimiento para cada periodo de retorno. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).	52
Tabla 14. Valores y resultados del método de Cowman para determinar el número de Manning estimado en el lecho del cauce.	60
Tabla 15. Datos del Problema. Parámetros de tiempo introducidos.	66
Tabla 16. Valores de número de habitantes en Omán en los años 1970, 1990, 2000, 2010 y 2017 que muestran el crecimiento demográfico de los últimos 50 años. Wikipedia.	77

B) LISTA DE FIGURAS:

	Pág.
Figura 1. Imagen del visor espacial que muestra la formación del ciclón en el Golfo de Omán. Fuente: https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=18438	8
Figura 2. Totales de lluvia del 31 de Mayo al 7 de junio de 2007 en el Golfo de Omán. Fuente: https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=18438	9
Figura 3. Patrón de vientos y velocidad de la tormenta el 4 de junio de 2007. Fuente: https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=18438	9
Figura 4. Imagen del visor espacial que muestra la formación del ciclón en el Golfo de Omán. Fuente: https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=44189	11
Figura 5. Imagen de la distribución espacial de lluvia en el Golfo de Omán durante el ciclón Phet. Fuente: https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=44189	12
Figura 6. Imagen de inundación en Muscat.2010	12
Figura 7. División de regiones gobernadas independientemente.	14
Figura 8. Mapa topográfico. Encuadre montañas Norte de Hajar.	15
Figura 9 y 10. Imágenes de Wadi Bani Khalid. Oman.	16
Figura 11. Imagen de área de oasis y cultivos en Jabal Akhdar, Omán. Fuente: TripAdvisor. Abril 2016.	16
Figuras 12 y 13. Imagen de tipologías zonas costeras, Omán	16
Figura 14. Imagen del desierto Al Sharqiyah, Omán.	17
Figura 15. Imagen del desierto de grava, Al Wusta, Omán. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Ond%C5%99ej_%C5%BDv%C3%A1%C4%8Dek/Om%C3%A1n .	17
Figura 16. Imagen del aliviadero presa de hormigón Wadi Dayqah, Omán.	18
Figura 17. Imagen del sistema de falaj superficial, Omán.	18
Figura 18. Ráster de superficie de la cuenca y ráster de las líneas de cauce por las que discurre el agua con distribución de elevaciones por colores en Wadi Al Fara.	21
Figura 19. Esquema de desplazamiento de un frente frío.	24
Figura 20. Distribución anual, por meses, de los distintos patrones de lluvia en Omán.	24
Figura 21. Curva Intensidad – duración - frecuencia.	26
Figura 22. Diferentes zonas de las curvas IDF generadas. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)	27
Figura 23. Curvas IDF generadas para Zona 1. Zonas de alta intensidad. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)	28
Figura 24. Curvas IDF generadas para Zona 2. Zonas de baja intensidad. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)	29
Figura 25. Curvas IDF generadas para Zona 3. Área norte del Sultanato- Región de Musandam. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010)	29
Figura 26. Obtención del número de curva a partir de valores de lluvia y escorrentía.(USDA-SCS, 1964).	35

Figura 27. <i>Curva de capacidad de infiltración a partir del hietograma de tormenta.</i>	37
Figura 28. <i>Diagrama típico de lluvia-escorrentía en diferentes cuencas de la región Al Batinah South. Cuencas Wadi Al Fara y Wadi Maawil.</i>	37
Figura 29. <i>Ubicación del área de estudio. Rustaq, Wadi Al Fara.</i>	38
Figura 30. <i>Imagen aérea. Orografía del área de estudio. Rustaq, Wadi Al Fara.</i>	38
Figura 31. <i>Imagen aérea. Asentamientos del área de estudio. Rustaq, Wadi Al Fara.</i>	39
Figura 32. <i>Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 5 años. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).</i>	46
Figura 33. <i>Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 10 años. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).</i>	47
Figura 34. <i>Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 25 años. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).</i>	48
Figura 35. <i>Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 50 años. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).</i>	49
Figura 36. <i>Distribución espacial de intensidad de lluvia estima en Omán para un periodo de retorno de 100 años. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).</i>	50
Figura 37. <i>Comparación entre la ecuación empírica de de 2002 y las nuevas ecuaciones de regresión para 50 años de periodo de retorno para inundaciones de volumen menor o igual a 2000 m³/s. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).</i>	52
Figura 38. <i>Comparación entre la ecuación empírica de 2002 y las nuevas ecuaciones de regresión para 100 años de periodo de retorno para inundaciones de volumen menor o igual a 2000 m³/s. (Highway Design Manual. Ministry of Transport and Communication. Sultanate of Oman. 2010).</i>	53
Figura 39. <i>Mapa de peligrosidad área Muscat. Sultanato de Oman, 1992.</i>	55
Figura 40. <i>Levantamiento de puntos con GPS.</i>	61
Figura 41. <i>Área de estudio seleccionada.</i>	61
Figura 42. <i>Definición de entradas y salidas de caudal en el modelo IBER.</i>	62
Figura 43. <i>Geometría del terreno en el modelo IBER.</i>	63
Figura 44. <i>Menú acceso a malla no estructurada en el modelo IBER.</i>	63
Figura 45. <i>Ventana de asignación del tamaño del elemento de malla en el modelo IBER.</i>	63
Figura 46. <i>Ventana de generación de malla en el modelo IBER.</i>	64
Figura 47. <i>Ventana de evolución del mallado en el modelo IBER.</i>	64
Figura 48. <i>Ventana de Datos del Problema. General.</i>	65
Figura 49. <i>Ventana de Datos del Problema. Resultados.</i>	67
Figura 50. <i>Riesgo para las vidas humanas en función del calado y la velocidad. Fuente: Federal Emergency Management Agency, USA.</i>	68
Figura 51. <i>Riesgo para las vidas humanas en función del calado y la velocidad. Fuente: Federal Emergency Management Agency, USA.</i>	68
Figura 52. <i>Ventana de Datos del Problema. Turbulencia. K-epsilon.</i>	69
Figura 53. <i>Ventana de asignación de rugosidad por uso del suelo.</i>	69
Figura 54. <i>Ventana de asignación de condición de entrada. Condiciones de contorno.</i>	70
Figura 55. <i>Ventana de asignación de calado inicial. Condiciones iniciales.</i>	70
Figura 56 . <i>Cuadro de información del proceso de cálculo.</i>	72
Figura 57. <i>Representación de los resultados de máximo calado en m.</i>	72
Figura 58. <i>Representación de los resultados de máxima velocidad en m/s.</i>	73

Figura 59. <i>Representación de los resultados de máximo caudal específico en m²/s.</i>	73
Figura 60. <i>Representación de los resultados de máxima peligrosidad.</i>	74
Figura 61. <i>Selección de principales áreas afectadas. Representación de los resultados de máxima peligrosidad en el paso 18000.</i>	74
Figura 62. <i>Área afectada 1.</i>	74
Figura 63. <i>Área afectada 2.</i>	75
Figura 64. <i>Área afectada 3.</i>	75
Figura 65. <i>Área afectada 4.</i>	75
Figura 61bis. <i>Selección de principales áreas afectadas. Representación de los resultados de máxima peligrosidad en el paso 18000.</i>	76
Figura 62bis. <i>Área afectada 1.</i>	76
Figura 63bis. <i>Área afectada 2.</i>	76
Figura 64bis. <i>Área afectada 3.</i>	76
Figura 65bis. <i>Área afectada 4.</i>	76

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Centro de estudios hidrográficos CEDEX. 2016. Modelo Iber 2.0. Manual de Usuario.
- Highwat design manual Ministry of Transport and Communication, Sultanate of Oman 2010
- Instituto Geológico y Minero de España. 2008. Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración.
- Kevin Sene. Springer 2013. Flash Floods. Forecasting and Warning.
- Luis Balairón Pérez. 2000. Gestión de recursos hídricos.
- MAMDOUH SHAHIN, 2006. Water resources and hydrometeorology of thee Arab Region.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino. 2011. Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables.

Enlaces de interés

<https://www.trc.gov.om/trcweb/home> - The Research council of Oman

<http://www.paca.gov.om/> - Public Authorities for Civil Aviation

<http://mrmwr.gov.om> - Ministry of Regional Municipalities and Water Resouces

<http://www.omanws.org.om> – Oman Water Society

www.gutech.edu.om – <https://www.gutech.edu.om/research-consultancy/research-projects/>

German University of technology in Oman