



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio hidrológico y de peligro
de inundación para parques
solares fotovoltaicos en la zona
norte de México**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

José Arturo Rodríguez Heyer

ASESOR DE INFORME

Dr. José Luis Aragón Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

RESUMEN

Los parques solares son la fuente de generación energética renovable con mayor auge en los últimos años en México. El crecimiento de estas tecnologías tanto en México como en el mundo, hace necesario plantearse nuevos métodos ingenieriles que hagan posible su desarrollo constructivo, operativo y de mantenimiento. Debido a esto, conocer los peligros implícitos desde una etapa temprana de planeación, ayudará a comprender la viabilidad constructiva, operativa y económica del mismo.

SOWITEC México es la empresa desarrollo de proyectos de energía renovable con mayor relevancia en México y en el mundo. Al día de hoy, SOWITEC México ha instalado 4 parques eólicos en el país con más de 1 gigavatio de producción eléctrica anual. Iniciando labores desde abril del 2017, actualmente soy el responsable de la elaboración y revisión de estudios técnicos y del diseño de infraestructura civil para los proyectos eólicos y solares, participando en más de 5 proyectos de más de 1,000 hectáreas de superficie.

Las inundaciones pueden generar daños humanos y materiales. Para su estudio, es importante conocer el fenómeno buscando saber dónde, cuándo y cómo es que puede llegar a afectar, con el fin de generar medidas que permitan mitigar los daños y emprender acciones de protección. Para evaluar los peligros derivados de una inundación, planteé una metodología basada en la extrapolación de datos de las estaciones de medición de precipitación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), así como en la información topográfica a detalle proporcionada por el departamento de ingeniería de la empresa y en las distintas fuentes de información oficiales de libre acceso.

Este trabajo se basa en el estudio que realicé para un proyecto solar de 2,346 hectáreas de superficie, localizado en el estado de Sonora, México, dentro de la cuenca río Yaqui, región hidrológica Sonora Sur (RH09), en donde analicé un total de 8 cuencas de aportación, determiné las lluvias de diseño, así como los gastos y avenidas de diseño. Por último, realicé una modelación bidimensional que me permitió determinar un índice de peligro por inundación en el sitio y plantear de forma general las obras hidráulicas para el parque.

ÍNDICE

1	Antecedentes.....	1
1.1	Descripción de la empresa	1
1.2	Puesto en la empresa.....	4
1.2.1	Misión del puesto	4
1.2.2	Responsabilidades y funciones.....	4
1.2.3	Actividades	4
1.2.4	Logros alcanzados	5
2	Conceptos básicos: inundaciones	7
2.1	Definición	7
2.2	Clasificación	8
2.3	Consecuencias y medidas de mitigación	8
2.4	Peligro por inundación.....	9
3	Metodología.....	13
3.1	Recursos utilizados para su elaboración	13
3.2	Delimitación de una cuenca.....	14
3.3	Características hidrológicas de una cuenca.....	16
3.3.1	Pendiente media del cauce principal	16
3.3.2	Tiempo de concentración.....	17
3.3.3	Tiempo de retraso	17
3.3.4	Tiempo pico.....	18
3.4	Análisis de frecuencias	18
3.4.1	Probabilidad de excedencia	18
3.4.2	Riesgo de falla	19
3.5	Lluvias de diseño	19

3.5.1	Número de escurrimiento	21
3.5.2	Precipitación directa	21
3.6	Gastos de diseño	22
3.7	Hidrogramas de diseño	23
3.8	Modelación hidráulica	23
3.9	Diseño de obras hidráulicas	23
3.10	Índice de peligro por inundación.....	26
4	Caso de aplicación	29
4.1	Zona de estudio	31
4.2	Cuencas de aportación	31
4.3	Curvas I-D-Tr	33
4.4	Parámetros para el diseño de avenidas.....	36
4.4.1	Número de escurrimiento	37
4.4.2	Precipitación Efectiva.....	38
4.4.3	Frecuencia y Probabilidad de Excedencia	39
4.5	Avenidas de diseño	39
4.6	Modelación bidimensional.....	43
4.7	Evaluación del peligro de inundación.....	48
5	Descripción y análisis de resultados.....	50
6	Conclusiones.....	55
	Referencias	57
	Anexos	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. CEO Frank Hummel en el parque eólico “Vientos del Altiplano”	2
Figura 2. Posicionamiento global de la empresa	2
Figura 3. Parque eólico “Palo Alto”	4
Figura 4. Análisis y muestreo de suelo alterado	6
Figura 5. Parque solar inundado en Reino Unido	9
Figura 6. Modelo digital de elevaciones	11
Figura 7. División de una cuenca hidrográfica	15
Figura 8. Cuneta para camino de terracería	24
Figura 9. Canal no revestido	25
Figura 10. Canal con revestimiento de concreto	26
Figura 11. Escala de peligro	27
Figura 12. Zonas de clima seco en México	28
Figura 13. Fotografía de alto detalle de la zona de estudio	29
Figura 14. Modelo digital de elevaciones de la zona de estudio (msnm)	30
Figura 15. Cuencas identificadas para la zona de estudio	32
Figura 16. Polígonos de Thiessen para las estaciones climatológicas más cercanas	33
Figura 17. Curvas I-D-Tr para la zona de estudio	36
Figura 18. Hidrogramas para las 8 cuencas de estudio	43
Figura 19. Modelo digital de terreno del polígono	44
Figura 20. Malla de flujo bidimensional (5m)	45
Figura 21. Condiciones de borde del modelo	46
Figura 22. Profundidades máximas para $Tr = 250$ años (m)	47
Figura 23. Velocidades máximas para $Tr = 250$ años (m/s)	47
Figura 24. Zonas con profundidades iguales o superiores a los 20 cm	48
Figura 25. Zonas con profundidades iguales o superiores a los 50 cm	49
Figura 26. Índice de peligro calculado	51
Figura 27. Zonas con alto peligro de inundación	52
Figura 28. Zonas de peligro por velocidades altas	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las cuencas.....	32
Tabla 2. Variables regionales para la zona de estudio.....	34
Tabla 3. Precipitación máxima en 24 horas (mm).....	34
Tabla 4. Error relativo (%)	35
Tabla 5. Datos para la construcción de curvas I-D-Tr (mm/h).....	35
Tabla 6. Clasificación de las cuencas por su tamaño	37
Tabla 7. Parámetros de selección para la duración de la tormenta.....	37
Tabla 8. Número de escurrimiento (N) para cada cuenca	38
Tabla 9. Precipitación total (mm).....	38
Tabla 10. Precipitación directa (mm)	39
Tabla 11. Frecuencia, probabilidad de excedencia y riesgo de ocurrencia (%)	39
Tabla 12. Precipitación Total (mm).....	40
Tabla 13. Precipitación Efectiva (mm).....	40
Tabla 14. Caudales máximos (m^3/s).....	40
Tabla 15. Relación de tiempo para la construcción de hidrogramas unitarios sintéticos SCS (horas).....	41
Tabla 16. Relación de gastos para la construcción de hidrogramas unitarios sintéticos SCS (m^3/s)	42
Tabla 17. Parámetros de superficie para el análisis de inundación	49
Tabla 18. Caudales máximos en m^3/s para un $Tr = 250$ años.....	50

Introducción y objetivo

Las energías renovables son una fuente cada vez más popular, barata y amigable con el ambiente. También, estas son conocidas como “energías limpias” debido a la huella de carbón tan baja que producen con respecto a otras fuentes de generación de energía. En México, las principales fuentes de generación de energía renovable son: geotérmica, eólica, solar y biomasa. En este sentido, Oaxaca y Veracruz son los estados con más proyectos eólicos y de biomasa. Así mismo, Sonora, Chihuahua y Durango son los estados con más parques fotovoltaicos (Forbes, 2018). Se estima que para el año 2024, el 43 por ciento de la energía del país procederá de fuentes renovables y, además, sólo en los próximos 3 años se estima una inversión de 8,600 millones de dólares, siendo ya el segundo sector con mayor inversión en el país, sólo después de la automotriz. Con esto, no sorprende que los parques solares sean la fuente de generación energética renovable con mayor auge en los últimos años en México, pasando de 9 parques en el año 2015, a 23 en el 2017, acorde a los datos de la Secretaría de Energía (SENER, 2018).

El auge de estas tecnologías tanto en México como en el mundo, hace necesario plantearse nuevos métodos ingenieriles que hagan posible su desarrollo constructivo, operativo y de mantenimiento. Estos métodos deben ser capaces de adaptarse a las condiciones de cada región, pero al mismo tiempo, ser capaces de sentar las bases para el entendimiento de los principales problemas ingenieriles, así como de las posibles soluciones a las problemáticas que pudiesen surgir en cada una de las fases de este tipo de proyectos. De ésta forma, uno de los tópicos más importantes para la viabilidad del proyecto, es la naturaleza de los fenómenos naturales a los cuales se pudiese enfrentar. Debido a esto, conocer los peligros implícitos desde una etapa temprana de planeación, ayudará a comprender la viabilidad constructiva, operativa y económica del mismo. Para un proyecto solar los peligros naturales más frecuentes se relacionan con las características mecánicas e hidráulicas de los suelos, así como con las características hidrológicas de la región. Ambas cuestiones son objeto de práctica y estudio de dos grandes ramas de la ingeniería civil: la geotecnia y la hidráulica, respectivamente. En este trabajo me enfocaré en este último.

El objetivo de este trabajo es el de determinar el peligro por inundación del área en donde se plantea la construcción de un parque solar fotovoltaico, en el estado de Sonora, México.

Por lo anterior, los objetivos particulares planteados para este trabajo son los siguientes:

1. Determinar las lluvias de diseño para la zona de estudio.
2. Calcular los hidrogramas de los escurrimientos que afectaran el polígono del proyecto utilizando el método de Chow y el hidrograma unitario sintético adimensional del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos
3. Modelar los hidrogramas obtenidos para la zona del polígono mediante el programa HEC-RAS, en su versión 5.0.3.
4. Establecer mediante mapas aquellas zonas con peligro de inundación, derivado de un evento de precipitación extraordinario.
5. Plantear aquellas obras que garanticen la seguridad del parque y permitan el desahogo de los volúmenes escurridos dentro del mismo.

1 Antecedentes

El presente informe trata de la realización de un estudio hidrológico y uno hidráulico que permita determinar el peligro de inundación para parques solares localizados en la zona norte de México. De esta forma, conocer los parámetros hidrológicos del área en donde se proyecta el parque, permitirá al ingeniero hidrólogo determinar de forma cuantitativa los volúmenes de agua precipitados dentro del mismo, así como los escurrimientos de las cuencas aportantes al área del parque. Así mismo, un estudio hidráulico más profundo permitirá conocer el peligro derivado de una precipitación en la zona, como en el caso de las inundaciones, que son un tema de suma importancia para los proyectos fotovoltaicos, ya que se debe evaluar la vulnerabilidad del parque y del personal mismo frente a este tipo de amenazas y, que del mismo modo, los involucrados en el desarrollo del proyecto puedan considerar el peligro frente a dicha amenaza y evaluar la viabilidad del proyecto, mediante un análisis exhaustivo que le permita al ingeniero hidráulico generar un plan de mitigación de daños mediante obras de infraestructura hidráulica capaz de satisfacer las necesidades para el desahogo de los escurrimientos que pudiesen afectar la zona del proyecto.

A continuación, presento una breve reseña de la empresa, así como de mis funciones y logros alcanzados dentro de la misma.

1.1 Descripción de la empresa

SOWITEC Group fue fundada en 1993 por Frank Hummel en Sonnenbühl, Alemania (Figura 1). Su actividad principal es el desarrollo de proyectos de generación de energía renovable. En total, SOWITEC ha instalado más de 100 aerogeneradores en 30 parques eólicos a lo largo del territorio alemán.



Figura 1. CEO Frank Hummel en el parque eólico “Vientos del Altiplano”

Con más de 200 empleados, SOWITEC ha establecido su presencia en el mercado internacional creando entidades asociadas en Francia, Brasil, Argentina, Uruguay, Chile, México, Perú, Colombia, Arabia Saudita, Kazajistán y Rusia (Figura 2). También se desarrollan actualmente planes para representaciones en otros países.

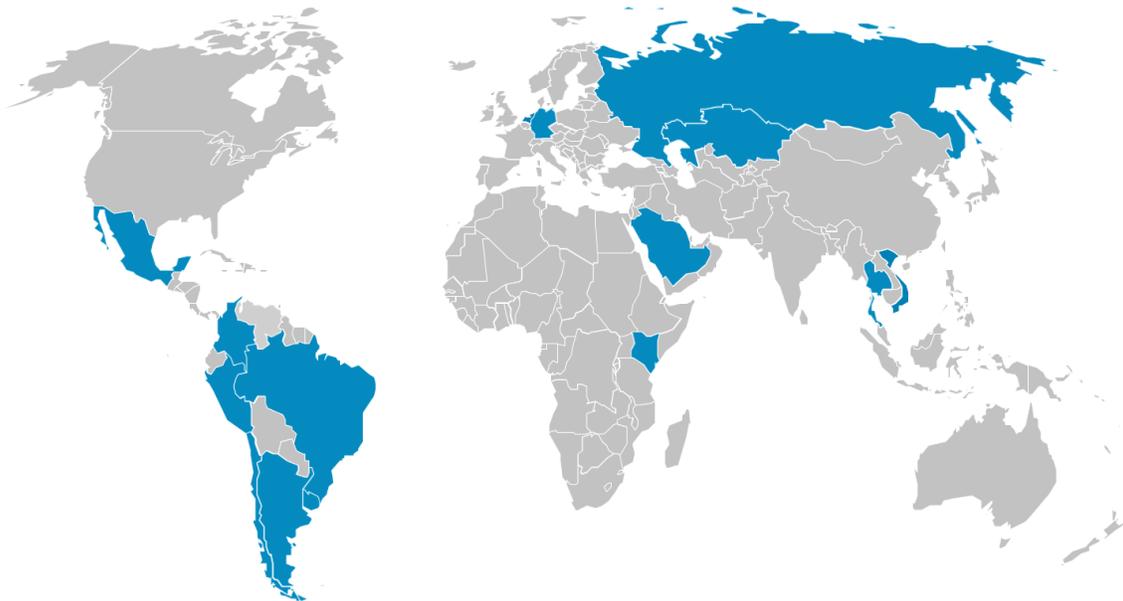


Figura 2. Posicionamiento global de la empresa

En cuanto al desarrollo de proyectos, SOWITEC provee un servicio integral, comenzando por la identificación del sitio, el arrendamiento de tierras, la obtención de permisos de construcción y acceso a la red eléctrica, gestión técnica en la fase de construcción y, finalmente, la operación del parque. El equipo de especialistas del grupo SOWITEC está respaldado por 20 años de experiencia, lo cual asegura una operativa diligente y profunda en todas las fases de planificación. Este *know-how* permite que SOWITEC encuentre sitios adecuados aún en aquellos terrenos que plantean ciertos desafíos y diseñe un plan apropiado de construcción.

Uno de los puntos más importantes en SOWITEC, son las mediciones de viento e irradiación solar llevadas a cabo por medio de torres de medición, así como también por los dispositivos SODAR (*Sonic Detection and Ranging*) propios. Numerosos investigadores y expertos de origen nacional e internacional proveen a los especialistas del departamento de desarrollo de SOWITEC una excelente plataforma de conocimiento que crece continuamente.

Al día de hoy, se encuentran instalados 4 parques eólicos en el país con más de 1 gigavatio de producción eléctrica anual, desarrollados en su totalidad por SOWITEC (Figura 3):

- Dominica / San Luis Potosí
- Palo Alto / Jalisco
- Vientos del Altiplano / Zacatecas
- Amistades / Coahuila



Figura 3. Parque eólico “Palo Alto”

1.2 Puesto en la empresa

Inicié contrato como becario en abril del 2017 y hoy día tengo la posición de Ingeniero Civil Junior con más de un año en el cargo.

1.2.1 Misión del puesto

Diseñar las infraestructuras civiles asociadas a centrales de generación eléctrica renovable, así como la realización de estudios técnicos civiles.

1.2.2 Responsabilidades y funciones

Responsable de la elaboración de estudios técnicos y del diseño de la infraestructura civil requeridos para los proyectos eólicos y solares.

1.2.3 Actividades

Elaboración de estudios técnicos civiles o, en su caso, elaboración de cronogramas de trabajo y presupuestos para realizar los estudios técnicos civiles correspondientes, así como el diseño de estructuras civiles asociadas a centrales de generación eléctrica renovable.

1.2.4 Logros alcanzados

Al día de hoy, he logrado desarrollarme en diversas áreas de la ingeniería, así como en el uso de sistemas de modelación hidrológica e hidráulica (HEC-RAS, IBER, HEC-HMS), y sistemas de información geográfica (SIG) como: QGIS, ArcGIS y AutoCAD 3D. Así mismo, al día de hoy, mis actividades han consistido en la elaboración y revisión de estudios geotécnicos preliminares (Figura 4), estudios hidrológicos básicos y preliminares, trabajos de reconocimiento en campo y elaboración de pozos a cielo abierto con ensayos *in situ* de muestras alteradas. Mis destrezas y habilidades de competencia en SOWITEC se han caracterizado por la adaptabilidad, dedicación, rápido aprendizaje, pensamiento crítico e innovador, toma de decisiones, trabajo en equipo y fácil manejo y dominio de software.

A continuación, presento una lista con las principales actividades que he realizado dentro de la empresa:

- Elaboración, seguimiento y conclusión de los procesos de liberación de cauces federales con el Organismo de Cuenca Lerma Santiago, ubicado en Guadalajara, para un parque solar fotovoltaico en desarrollo de 2,000 ha de superficie.
- Elaboración de tres estudios geotécnicos preliminares para parques con más de 1,000 ha de superficie.
- Elaboración, seguimiento de trámites y liberación de 2 predios de más 2,000 ha por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- Supervisión de trabajos de exploración en campo mediante 6 pozos a cielo abierto, así como la extracción de muestras alteradas y elaboración de ensayos *in situ* y notas técnicas descriptivas del suelo.
- Elaboración de dos estudios hidrológicos básicos junto con análisis por peligro de inundación y mapas de zonas de amenaza para parques con más de 2,000 ha de superficie; uno de ellos se describe en este trabajo.



Figura 4. Análisis y muestreo de suelo alterado

2 Conceptos básicos: inundaciones

Las inundaciones pueden generar daños humanos y materiales, por lo cual es importante comprender la magnitud que podría tener dicho fenómeno con el fin de generar medidas que permitan mitigar los daños y emprender acciones de protección que, en este caso, se enfocarán en el caso de una central de generación eléctrica solar localizada sobre una zona semi desértica con presencia de cauces.

2.1 Definición

De acuerdo con el glosario internacional de hidrología, una inundación es el “desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua” (UNESCO, 2012). En este caso, “confines normales” debe entenderse como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños o pérdidas económicas y humanas que, por ende, no represente peligro alguno para su entorno. Por otro lado, los investigadores del Grupo de Análisis de Situaciones Meteorológicas Adversas (GAMA, 2018), definen una inundación

como “la ocupación por parte del agua de zonas o regiones que habitualmente se encuentran secas como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que puede drenar el propio cauce del río.” De ésta forma y, para efectos de este trabajo, una inundación es un fenómeno en el cual el agua precipitada excede la capacidad de infiltración del suelo y ésta comienza a acumularse en zonas que normalmente no estarían ocupadas por el agua. Estas pueden ser causadas por precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente por el volumen precipitado sobre la zona afectada.

2.2 Clasificación

Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2014), las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo a su tiempo de duración (rápidas o lentas), así como por el mecanismo que las generó; por exceso de lluvia (pluviales), por desbordamiento de ríos (fluviales), por marea de tormenta (producida por ciclones tropicales en las costas), por falla o mala operación de obras hidráulicas.

2.3 Consecuencias y medidas de mitigación

Las inundaciones pueden generar daños humanos y materiales, por lo cual requieren de medidas de protección para mitigar las posibles afectaciones que puedan ocasionar. Acorde al CENAPRED, estas medidas pueden ser de dos tipos: medidas estructurales (construcción de obras hidráulicas), medidas no estructurales (indirectas o institucionales).

Las medidas estructurales contemplan la construcción de obras hidráulicas que sirvan para evitar o mitigar los daños provocados por una inundación y pueden contemplar: obras de retención, almacenamiento y derivación del agua, así como modificaciones al cauce (canalizarlo o entubarlo), construcción de bordos o muros de encauzamiento. Estas obras estarán principalmente enfocadas en mantener el agua dentro del cauce del río y en evitar que el agua alcance ciertas zonas de interés (CENAPRED, 2014).

Por otra parte, las medidas no estructurales se enfocan al uso del suelo, lo cual posibilita la delimitación de zonas inundables bajo diferentes escenarios, relacionando la magnitud del evento con el área afectada (Figura 5). El objetivo es que una vez que se hayan identificado

las zonas potencialmente inundables, se definan los usos del suelo de acuerdo con el valor económico de los bienes o de las posibles pérdidas generadas por la interrupción o deterioro de la infraestructura que pueda haber en dicho sitio (CENAPRED, 2014).



Figura 5. Parque solar inundado en Reino Unido

2.4 Peligro por inundación

Para este trabajo es posible definir el peligro por inundación como la potencial amenaza de daño material y humano derivado de un fenómeno de lluvia extraordinario. Para su estudio es importante conocer el fenómeno buscando saber dónde, cuándo y cómo es que puede llegar a afectar. De esta forma, para evaluar los peligros derivados de una inundación, es necesario comprender la magnitud y el comportamiento que podría tener este fenómeno en el sitio de interés. Así mismo, es importante comprender que ninguna precipitación es constante y que el escurrimiento que se genera, irá variando de acuerdo a la intensidad de la lluvia y a las características de la zona en donde ocurra (tamaño, pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, etc.).

Debido a esto, es posible caracterizar la precipitación para un determinado momento como una altura o lámina expresada en milímetros y, la intensidad como la precipitación llovida a lo largo de un determinado tiempo, expresada en milímetros por hora. También, al ser esto una variable independiente del área, permite convertir la lluvia en volumen precipitado para

cualquier subárea dentro de la cuenca que se esté estudiando; recordando que, una cuenca es aquella superficie de terreno en donde si fuese un terreno impermeable, la totalidad del agua escurriría hacia un mismo punto de salida o de descarga. De esta manera, es posible comparar la altura de la lámina de agua generada por la lluvia en diferentes puntos dentro de la misma cuenca y para distintos momentos dentro del tiempo de duración de la tormenta.

Con base en lo antes dicho, es posible identificar dos aspectos importantes con respecto al análisis del peligro de inundación para un sitio en específico: el primero está relacionado con la probabilidad de ocurrencia de un evento de precipitación extraordinaria y, el segundo, con el comportamiento hidráulico que tendrá la zona de interés una vez ocurrido dicho evento. Por ejemplo, para el caso de estudio, la probabilidad de ocurrencia de un evento de precipitación dentro de un tiempo determinado, se encontrará en función de la frecuencia o periodo de retorno y del tiempo de vida útil del proyecto. Por otro lado, la respuesta del sitio ante un evento de precipitación máximo extraordinario estará en función de las características morfológicas y propiedades del suelo, así como del uso del suelo y vegetación existente.

Una forma de analizar mediante recursos digitales las características de una zona a nivel morfológico, es mediante un modelo digital de elevación (MDE). Este es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, lo cual permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (Figura 6). Estos valores están contenidos en un archivo de tipo ráster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados (INEGI, 2018).

En México se cuenta con el recurso digital conocido como Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), el cual es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, y cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X y Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Estos puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular a cada 15 metros (INEGI, 2013).

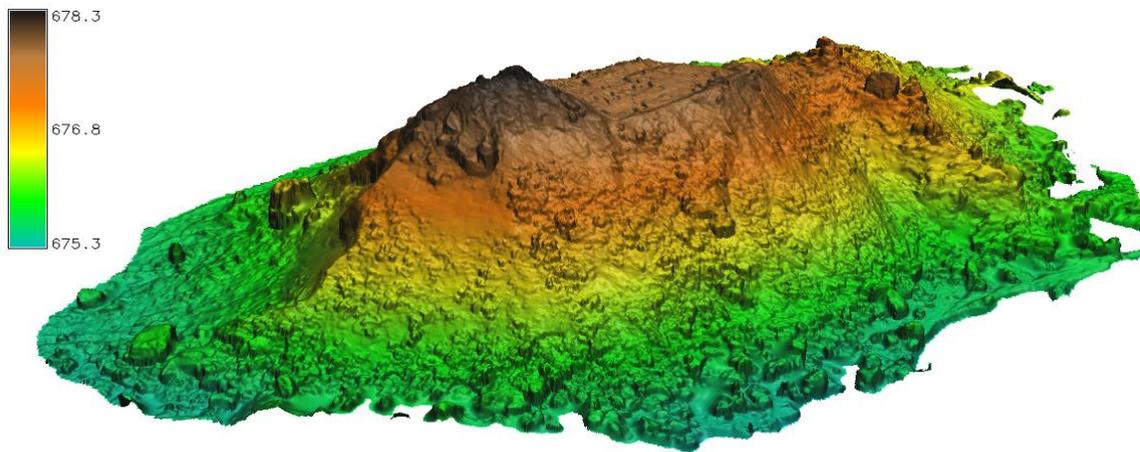


Figura 6. Modelo digital de elevaciones

Así mismo, el INEGI proporciona herramientas que permiten determinar el contexto hidrográfico, edafológico y el uso de suelo y vegetación del sitio. Estos se definen a continuación:

Contexto hidrográfico

- Permite conocer los escurrimientos que afectan la zona de estudio, así como la condición de los mismos; efímero, intermitente o perene. Esto se realiza con base al conjunto hidrográfico escala 1 : 50,000 del INEGI y mediante el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL, 2018).

Contexto edafológico

- Permite identificar y describir los tipos de suelo existentes en la zona, con base a la clasificación de los suelos del Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, por sus siglas en inglés *World Reference Base for Soil Resources*). Para la clasificación edafológica de los suelos, se utiliza el conjunto de datos vectorial edafológico escala 1: 250,000 serie II, el cual contiene información actualizada de los diferentes grupos de suelos que existen en el territorio, obtenida durante el período 2002-2006 (INEGI, 2018).

Contexto de uso de suelo y vegetación

- Permite identificar y describir los tipos de vegetación y uso de suelo en la zona, con base en el sistema de clasificación de los tipos de vegetación de México y ordenados por grandes grupos de vegetación. Dicha información geográfica digital contiene datos estructurados en forma vectorial codificados de acuerdo con el diccionario de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, obtenidos a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes de satélite Landsat TM8 seleccionadas del año 2014 (INEGI, 2018).

Con respecto a la precipitación, es importante conocer la cantidad de agua que se acumula en duraciones generalmente menores a un día, ya que esta información permitirá generar modelos que ayuden a entender el comportamiento histórico de las precipitaciones ocurridas

para una cierta región y, de esta forma, poder estimar su comportamiento para distintos periodos de tiempo. Para su medición, se utilizan pluviómetros o pluviógrafos; el primero mide la cantidad de lluvia acumulada para un determinado tiempo y, el segundo, registra la cantidad de lluvia precipitada a lo largo de la duración de la tormenta.

Esta información es posible de obtener a partir de los registros de las estaciones climatológicas que se encuentran dentro del país. Desde el punto de vista de las inundaciones, el método ideal para su estudio se basa en la información de las estaciones que registran los datos pluviográficos, sin embargo, la mayoría de las estaciones climatológicas en el país sólo registran datos pluviométricos, por lo cual, para estimar el escurrimiento, se recomienda utilizar un modelo lluvia-escurrimiento.

El periodo de retorno (T_r) es el tiempo que, en promedio, transcurre para que un evento de determinada magnitud sea igualado o excedido (Méllice & Reason, 2007). Normalmente, el tiempo suele medirse en años y, la magnitud del evento puede ser el escurrimiento expresado como un cierto gasto o, como una lámina de precipitación o una profundidad de inundación (tirante). Cabe señalar que, un evento analizado no ocurre exactamente en el número de años que indica el periodo de retorno, sino que puede variar y este valor sólo sería una estimación para la cantidad de lluvia que puede caer en un cierto instante en el tiempo.

En lo que respecta a la construcción del parque, será importante considerar los procesos de preparación del sitio mediante operaciones de desmonte y despalme. Estas operaciones generan cambios sustanciales en el comportamiento hidráulico de la zona impactada. Por un lado, el coeficiente de rugosidad asociado a las características superficiales del sitio disminuye y las velocidades de los escurrimientos aumentan y, por otra parte, las condiciones de relieve se modifican y las depresiones topográficas que formaban antes las cárcavas de los cauces, disminuyen o desaparecen. De esta forma, las obras de infraestructura hidráulica para un parque solar fotovoltaico dependerán de las condiciones hidráulicas del terreno una vez modificado, así como del peligro de inundación existente.

3 Metodología

La metodología planteada en este apartado permite el análisis hidrológico e hidráulico de la superficie de un polígono proyectado para la creación de un parque solar de generación de energía eléctrica en la zona norte de México. Así mismo, esta metodología está basada en la extrapolación de datos de las estaciones de medición de precipitación de la CONAGUA, así como en la información topográfica a detalle proporcionada por el departamento de ingeniería de la empresa y en las distintas fuentes de información oficiales de libre acceso.

3.1 Recursos utilizados para su elaboración

La elaboración de este apartado se basa en la utilización de siguientes recursos digitales oficiales y de libre acceso descritos a continuación:

Recurso digital del polígono

- Geometría del polígono del proyecto en formato kml o shp

Modelo digital de elevaciones

- Continuo de elevaciones mexicano escala 1:50 000
- MDT del proyecto obtenido de la fotogrametría

Red hidrográfica escala 1:50 000

- Geometría de las subcuencas, corrientes y cuerpos de agua existentes dentro de la zona de interés.

Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1 : 250 000 Serie II (continuo nacional)

- Capa seccionada acorde a las características edafológicas de las distintas zonas del país en formato shp

Conjunto de datos vectorial uso de suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VI (capa unión)

- Capa seccionada acorde a las características de uso de suelo y vegetación de las distintas zonas del país en formato shp

Conjunto de datos vectorial de las estaciones climatológicas de México

- Conjunto de puntos georeferenciados que representan la ubicación de las estaciones climatológicas junto con información relevante de cada una de ellas.

3.2 Delimitación de una cuenca

Las cuencas son unidades del terreno, definidas por la división natural de las aguas debida a la conformación del relieve (CONAGUA, 2015). En México, la Conagua ha definido un total de 731 cuencas hidrológicas para propósitos de administración de las aguas nacionales. Por otro lado, las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas de México, con un total de 37 regiones hidrológicas (RH). De esta forma, una cuenca puede ser dividida en espacios definidos por la relación entre el drenaje superficial y la importancia que tiene con el cauce principal, por lo cual, el trazo de la red hídrica es fundamental para delimitar los espacios en que se puede dividir la cuenca (Faustino & García, 2004). A un curso principal llega un afluente secundario, este comprende una subcuenca. Luego al curso principal de una subcuenca, llega un afluente terciario, este comprende una microcuenca, además están las quebradas que son cauces menores (Figura 7).



Figura 7. División de una cuenca hidrográfica

Para identificar cuencas, es posible utilizar la aplicación geoespacial del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL). Esta aplicación contiene datos espaciales enriquecidos con topología de redes geométricas como la red hidrográfica escala 1:50 000, la cual modela los escurrimientos de los flujos de agua en cuencas hidrográficas y, además, incluye funciones de redes para análisis de cuencas, cálculo de caudales y trayectoria de los flujos de agua (SIATL, 2018).

Por otra parte, para delimitar las cuencas, así como para la obtención del área y la longitud del cauce principal, es posible utilizar el programa QGIS, versión 2.18.11, el cual contiene herramientas capaces de delimitar las cuencas de manera cuasiautomática con base al modelo de elevaciones de la región que comprenda la subcuenca (OSGeo, 2018).

3.3 Características hidrológicas de una cuenca

Planteé un análisis que permitiera definir los parámetros del contexto hidrológico de las cuencas con influencia para la zona del proyecto. Los parámetros que permiten definir el contexto hidrológico de la región, serán las siguientes: uso de suelo y vegetación, edafología y fisiografía. Del mismo modo, el contexto hidrológico también contempla aquellos parámetros que permitirán definir el tiempo de duración de la tormenta sobre la zona de estudio y son los siguientes: tiempo de concentración, tiempo de retraso y tiempo pico.

3.3.1 Pendiente media del cauce principal

Para la obtención de la pendiente media del cauce principal, utilicé el método de Taylor y Schwartz, el cual consiste en calcular la pendiente media de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión (Aparicio, 1992). Esta misma fórmula es posible de extrapolar para el caso en el que las longitudes de los tramos no sean iguales mediante la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{l_3}{\sqrt{S_3}} \dots \frac{l_i}{\sqrt{S_i}}} \right)^2$$

Ecuación 1

Donde:

- S = Pendiente media del tramo del cauce.
- L = Longitud total del tramo del cauce.
- l_i = Longitud del tramo i del cauce
- S_i = Pendiente del tramo i del cauce

3.3.2 Tiempo de concentración

Es el tiempo que tarda en escurrir una gota de agua precipitada desde el punto más lejano de la cuenca hasta el punto de salida o de descarga. El tiempo de concentración (T_c) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.01 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- T_c = Tiempo de concentración (h)
- L = Longitud del cauce principal (m)
- S = Pendiente media del cauce (%)

Esta ecuación se utiliza para estimar el tiempo de concentración de cuencas naturales cuya extensión no sobrepase los 3,000 km² (Breña, 2003).

3.3.3 Tiempo de retraso

Se define como el tiempo que transcurre entre el centroide del hietograma de lluvia efectiva y el tiempo pico del hidrograma de escurrimiento directo (Breña & Jacobo, 2006). El tiempo de retraso (T_L) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$T_L = 0.00505 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- T_L = Tiempo de retraso (h)
- L = Longitud del cauce principal (m)
- S = Pendiente media del cauce (%)

3.3.4 Tiempo pico

Es el tiempo que transcurre desde que se inicia el escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma (Chow, et al., 1964). El tiempo pico (T_p) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$T_p = \frac{D_e}{2} + T_L$$

Ecuación 4

Donde:

- T_p = Tiempo pico (h)
- D_e = Duración en exceso (h)
- T_L = Tiempo de retraso (h)

Además, la duración en exceso con la que se tiene mayor caudal de pico, se puede considerar como el tiempo de concentración (T_c), siempre que se trate de cuencas pequeñas (SIAPA, 2014).

3.4 Análisis de frecuencias

Este análisis permitirá conocer la probabilidad de que un evento de lluvia se presente en un determinado tiempo, así como el riesgo de que dicho evento ocurra según el tiempo de vida útil de la obra proyectada en el sitio en el cual se localiza. Esta información es importante para la selección del periodo de retorno o frecuencia a modelar.

3.4.1 Probabilidad de excedencia

La magnitud de un evento extremo esta inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos moderados (Chow, et al., 1964). De esta forma, la probabilidad de excedencia (p) de un evento, representa la probabilidad de que un evento con una determinada frecuencia (Tr) se presente en cualquier año. Para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$p = \frac{1}{T_r}$$

Ecuación 5

Para esto, se supone que la información hidrológica analizada es independiente y esta idénticamente distribuida, y el sistema hidrológico que la produce, se considera estocástico, así como independiente del espacio y del tiempo (Chow, et al., 1964).

3.4.2 Riesgo de falla

Para conocer el riesgo en eventos máximos anuales para una obra hidráulica, se utiliza la siguiente ecuación:

$$r = 1 - (1 - p)^L$$

Ecuación 6

Donde r es la probabilidad o riesgo de que ocurra el evento máximo al menos una vez en L años o, en el tiempo de vida útil de la obra o proyecto (Chow, et al., 1964).

3.5 Lluvias de diseño

Para determinar el evento de lluvia extraordinario, es común utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de la lluvia (I), con respecto al tiempo de duración de la precipitación (D) y a la frecuencia de incidencia o periodo de retorno (Tr), según el tipo de obra y ubicación del sitio (Chow, et al., 1964). Para esto, utilicé las curvas de intensidad - duración - periodo de retorno (I-D-Tr), las cuales representan el comportamiento más desfavorable de una precipitación para una determinada zona y para un determinado periodo de retorno.

Para la construcción de las curvas de intensidad - duración - periodo de retorno, consideré los métodos propuestos para la construcción de curvas I-D-Tr de las estaciones climatológicas de México, utilizando la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional

(SMN). Esta metodología propone la obtención de curvas I-D-Tr a partir de los parámetros regionales (a, b, c, f), así como los valores de lluvias de una hora de duración y periodos de retorno de 2 y 10 años (P_1^2 y P_1^{10} , respectivamente), los cuales se obtienen a partir del cociente lluvia-duración (R), que relacionan la lluvia con duración de una hora y dos años de periodo de retorno (P_1^2) con la lluvia de 24 horas de duración e igual periodo de retorno (P_{24}^2) (Campos, 1990).

La propuesta para este análisis, está basado en la serie calculada de las precipitaciones máximas en 24 horas; que incluye el tratamiento estadístico de la misma serie (estimación de valores faltantes, descarte de datos dudosos u *outliers* y pruebas de consistencia estadística).

Para este análisis, utilicé el programa Sistema de Información Hidrológica para Intensidades Máximas (SIHIMAX), el cual me permite tabular las series de datos, aplicar pruebas de consistencia visuales y numéricas a las series de datos, completar las series de datos (llenado de datos), así como aplicar 29 ajustes de funciones de distribución a las series de máximos anuales de precipitación (Merlos, 2017). Su aplicación se basa en la estimación de precipitaciones de diseño asociadas a distintos períodos de retorno mediante su extrapolación por métodos estadísticos. De esta forma, una vez que se tienen analizados los datos de información climática, el programa procede a realizar extrapolaciones para determinar los parámetros para la construcción de curvas I-D-Tr que permitirán determinar cualquier evento de lluvia extraordinario. Para esto, es muy importante considerar estaciones con un mínimo de 25 años de registros, de forma que permita una estimación más aguda o certera del evento de lluvia extraordinario.

Por otra parte, la precipitación en exceso o precipitación efectiva (Pe), está en función del número de escurrimiento (N). Así mismo, siempre y cuando se trate de cuencas pequeñas, la duración o tiempo pico (T_p) podrá considerarse igual al tiempo de concentración de la cuenca (Chow, et al., 1964).

3.5.1 Número de escurrimiento

El número de escurrimiento (N) es un valor asociado al uso, tipo y composición del suelo, así como a la pendiente y al estado de humedad del terreno (Fuentes & Franco, 1996). Su cálculo depende de los valores descritos en los anexos I y II.

Para su cálculo, utilicé de los archivos vectoriales de la capa edafológica escala 1:50 000 y la capa de Uso de Suelo y Vegetación en la misma escala, así como el programa QGIS, el cual permite la manipulación de ambas capas mediante sus distintas herramientas SIG (Sistema de Información Geográfica), con el fin de determinar los parámetros que permitan obtener el número de escurrimiento para cualquier zona.

3.5.2 Precipitación directa

La precipitación directa es la fracción de la precipitación que no se infiltra en el subsuelo y, por tanto, que aporta al volumen del escurrimiento superficial. Este se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Pe = \frac{(P - \frac{5,080}{N} + 50.8)^2}{P + \frac{20,320}{N} - 230.2}$$

Ecuación 10

Donde:

- P_e = Precipitación efectiva (mm)
- P = Precipitación total observada o calculada (mm)
- N = Número de escurrimiento (adim)

El valor de la precipitación P es posible de obtener a partir de las curvas I-D-Tr. Así mismo, es necesario obtener el o los valores de número de escurrimiento según las características del sitio en estudio.

3.6 Gastos de diseño

Para el cálculo de los gastos de diseño, utilicé el método de Chow, el cual está basado en la teoría del Hidrograma Unitario y de la curva S, la cual permite obtener otros hidrogramas unitarios con duraciones diferentes (Chow, et al., 1964).

Cuando sobre una cuenca de área (A) llueve en exceso un centímetro por hora durante d horas, la curva S define al final un gasto de equilibrio (Qe) de $2.778 \cdot A/d$.

Por otra parte, el caudal máximo (Q_p) del escurrimiento directo es igual al producto de la lluvia en exceso (Pe) por el caudal máximo del hidrograma unitario (q_p); ambas cantidades son función de la duración o tiempo pico (T_p), el cual originalmente no se conoce. Posteriormente, se define el factor de reducción del pico (Z) como el cociente entre q_p y Q_p , por lo cual:

$$q_p = 0.2778 \frac{A \cdot Z}{T_p} \quad \text{Ecuación 7}$$

De esta forma, la ecuación del caudal máximo será:

$$Q_p = 0.2778 \frac{A \cdot Z \cdot P_e}{T_p} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- q_p = Gasto pico unitario (m^2/s)
- Q_p = Gasto pico (m^3/s)
- A = Área de la cuenca (km^2)
- T_p = Tiempo pico (h)
- Z = Factor de reducción (adim)

- P_e = Precipitación efectiva (mm)

3.7 Hidrogramas de diseño

Los hidrogramas son la representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo y, en orden cronológico, de tal modo que el área bajo el hidrograma sea el volumen de agua que ha pasado por el punto de salida, en el intervalo del tiempo expresado en el hidrograma.

Para su construcción, utilicé el hidrograma unitario adimensional del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), el cual es uno de los métodos más conocidos para derivar hidrogramas unitarios hoy en día (Mockus, 1972). Para la aplicación de este método es necesario haber calculado previamente el tiempo pico y el caudal máximo de cada cuenca para un cierto periodo de retorno y, posteriormente, obtener los datos faltantes de caudal con respecto al tiempo con base en los datos para la construcción de hidrogramas del Anexo III.

3.8 Modelación hidráulica

Para realizar la modelación hidráulica, utilicé el programa HEC-RAS en su versión 5.0.3. Para ello, utilicé el modelo digital de terreno (MDT) de alta resolución obtenido a partir de la topografía de detalle de los procesos fotogramétricos, así como una aproximación de flujo no permanente mediante las ecuaciones de onda difusiva, con base a los métodos de resolución propuestos por el mismo programa HEC-RAS, versión 5.0.3 (Brunner, 2016).

3.9 Diseño de obras hidráulicas

Debido a la escasez de información con respecto al tema de estudios de inundación para parques solares o, incluso, para inundaciones en zonas rurales en México y en una gran parte del mundo, no había certidumbre de cómo interpretar los resultados obtenidos de la modelación hidráulica, ocasionando confusión para la dirección, para los *Business Developers* y para el mismo inversionista. Debido a esto, la dirección solicitó generar un apartado para el estudio que permitiera dar mayor claridad y certidumbre al tema de peligro por inundación en el parque, así como a las obras hidráulicas necesarias para el desahogo de los volúmenes de agua escurridos dentro del mismo. De este modo, utilicé una escala de

peligro que relaciona la inundación con las obras hidráulicas necesarias para salvaguardar la infraestructura del parque.

El primer paso fue buscar antecedentes en el tema de estudios hidrológicos para parques solares, y encontré diversas fuentes procedentes de parques desarrollados en California (una de las mayores potencias internacionales en el tema). Esta información me permitió visualizar una forma para analizar y comprender los efectos de una inundación en un parque solar, sin embargo, aún no esclarecía el tema en cuanto a la inundación y su relación con las obras de infraestructura hidráulica requeridas para el parque. El segundo paso fue conocer y comprender el funcionamiento de los distintos tipos de obras hidráulicas más utilizadas en el país para el desahogo de caudales de distintas magnitudes.

Para determinar el tipo de infraestructura, en primer lugar, consideré las obras de desahogo para lluvias con periodo de retorno (T_r) menor a 5 años, y cuya probabilidad de ocurrencia (r) será muy alta, considerando la vida útil del proyecto (L). Cabe mencionar que para la construcción del parque se considera una pendiente mínima del terreno del 2 % en la dirección y sentido de los escurrimientos principales, lo cual permite el drenaje superficial a menor escala. Dichas obras pueden ser cunetas para los caminos internos, externos u otros (Figura 8).



Figura 8. Cuneta para camino de terracería

En segundo lugar, se encuentran las obras de desahogo para lluvias con periodos de retorno de más de 5 años y menores de 100 años, cuya probabilidad de ocurrencia será baja o muy baja (en función del periodo de retorno seleccionado). Estas obras estarán relacionadas directamente con el peligro de inundación del sitio y podrán considerarse obras como zanjas o canales de dimensionamiento adecuado para el desahogo de los volúmenes de caudal estimados (Figura 9).



Figura 9. Canal no revestido

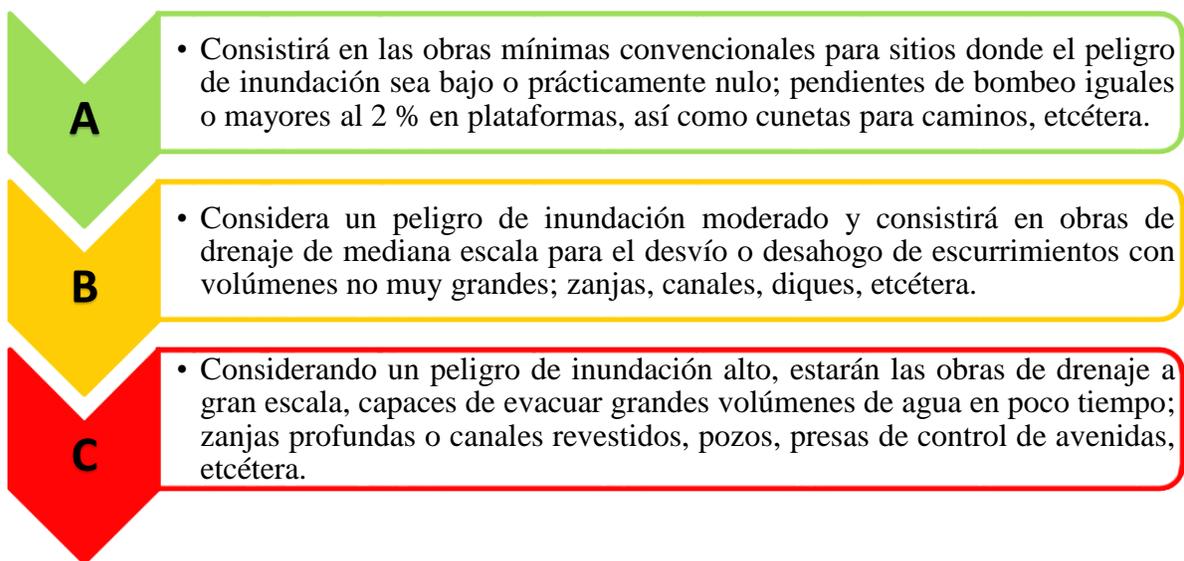
En caso de que el periodo de retorno sea mayor a 100 años, será necesario evaluar a profundidad los efectos de una inundación sobre la infraestructura de la central y así determinar el tipo de obras hidráulicas que permitan mitigar las consecuencias de dicho evento o, según sea el caso, evitar las zonas con peligro para la construcción de la infraestructura del parque. Las obras propuestas para este tipo de situación pueden ser: zanjas profundas, diques, presas para el control de avenidas o, incluso, canales revestidos de concreto u otros materiales (Figura 10).



Figura 10. Canal con revestimiento de concreto

3.10 Índice de peligro por inundación

El índice de peligro por inundación que he planteado, es un valor dado en porcentaje que va de 0 a 100 por ciento y se refiere al nivel de amenaza existente para que en una determinada zona ocurra un evento de precipitación extraordinario con el potencial de ocasionar daños humanos y materiales. Para esto, planteé tres niveles de peligro con relación al dimensionamiento de obras hidráulicas para el desahogo de los volúmenes escurridos dentro del polígono de estudio:



Por lo anterior, propuse un índice obtenido a partir de la relación del área mojada de profundidad igual o mayor a 50 centímetros ($A_{m[50cm]}$) y el área mojada de profundidad igual o mayor a 20 centímetros ($A_{m[20cm]}$), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Pi(\%) = \frac{A_{m(50cm)}}{A_{m(20cm)}} * 100$$

Ecuación 11

Si el área total mojada (A_m) representa la superficie total que se encuentra por debajo de la lámina de agua generada por la lluvia, el área mojada $A_{m[20cm]}$ corresponde a la fracción de superficie de la lámina de agua que pudiese generar peligro en caso de inundación y, al mismo tiempo, el área mojada $A_{m[50cm]}$ corresponde a la fracción de la lámina de agua que directamente representa un peligro frente a una inundación. De esta forma, planteé la siguiente escala de peligro de inundación para el desarrollo de un parque solar:



Figura 11. Escala de peligro

Bajo esta estructura, los alcances se verían limitados a un análisis bajo las condiciones de relieve naturales, esto es, sin considerar labores de desmonte y despalme ni ningún tipo de infraestructura correspondiente al proyecto. Esto se debió a que aún no se contaba con el proyecto ejecutivo del parque. Así mismo, las obras serían planteadas de forma conceptual y sin ninguna información técnica, debido a lo antes mencionado. Por otro lado, el estudio sí permitiría generar un alcance bastante aproximado de las obras hidráulicas necesarias para salvaguardar la infraestructura del proyecto.

Es importante mencionar que, este método se centra en zonas con clima seco en sus distintas variantes, esto debido a la similitud observada entre las características de sus suelos, fenómenos de precipitación, vegetación, así como en la distribución y tamaño de sus cauces (Figura 12).

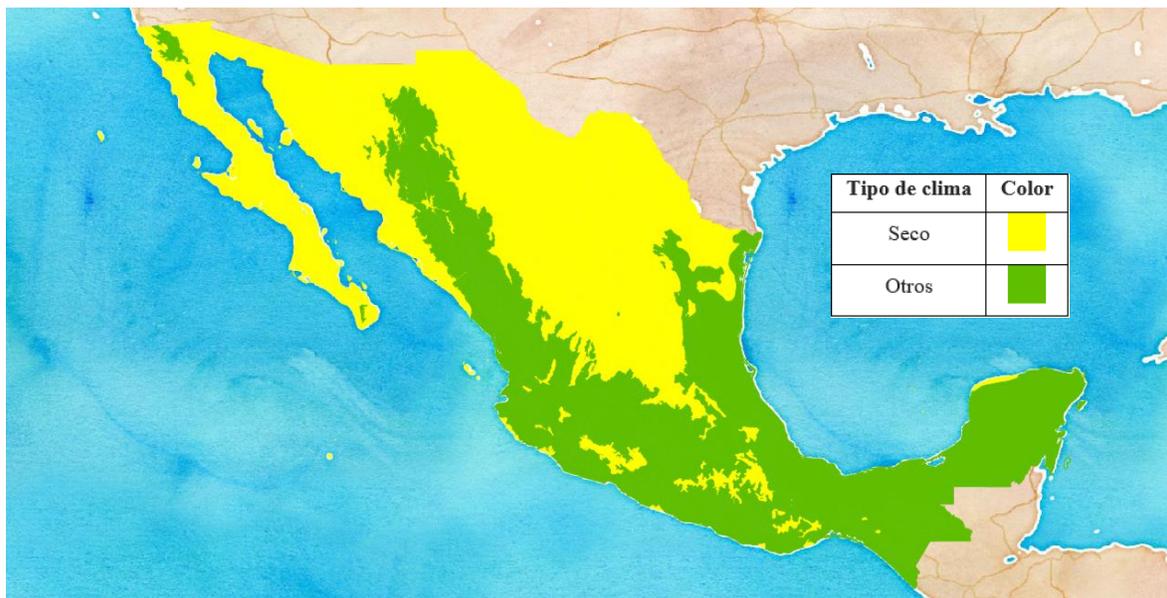


Figura 12. Zonas de clima seco en México

4 Caso de aplicación

Desde sus inicios, la posición geográfica de este proyecto despertó incertidumbre debido a la amplia cantidad de líneas de flujo que se apreciaban desde el visualizador Google Earth, algo poco frecuentemente de trabajar debido a los posibles aumentos en los costos del proyecto y a la incertidumbre que esto pueda generar para el cliente (Figura 13).

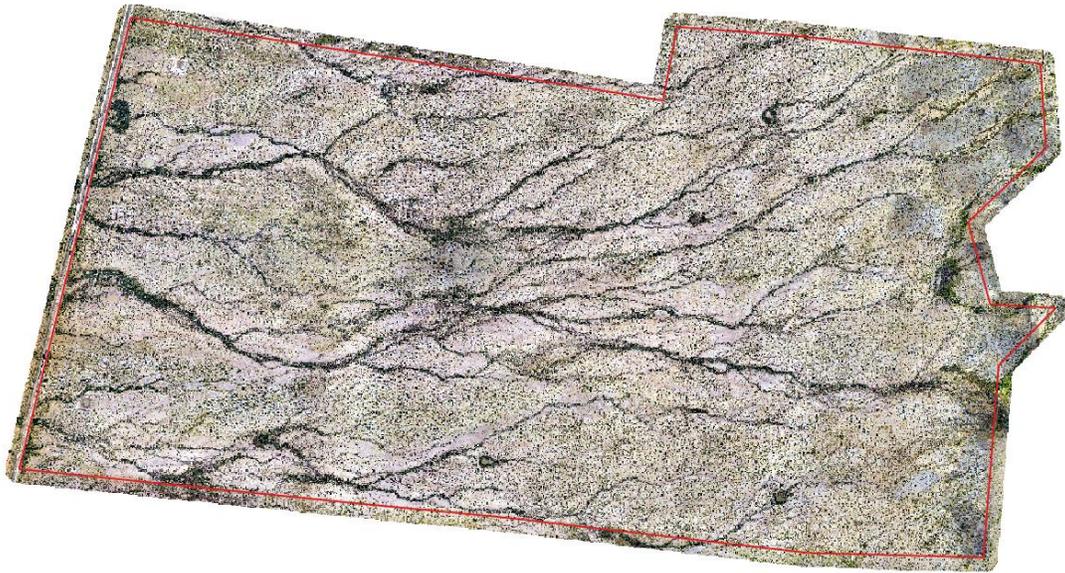


Figura 13. Fotografía de alto detalle de la zona de estudio

Con esto, el departamento de ingeniería comenzó con las labores de inspección en campo para posteriormente realizar un levantamiento topográfico sobre el área de interés mediante fotogrametría, lo cual implica el procesamiento de fotografías áreas con una precisión de pixel de 12 x 12 centímetros tomadas a 400 metros de altura mediante un dron. El procesamiento de esta información permitió generar un modelo digital de elevaciones, el cual sirve para caracterizar las formas de relieve y los elementos u objetos presentes sobre la superficie del sitio (Figura 14).

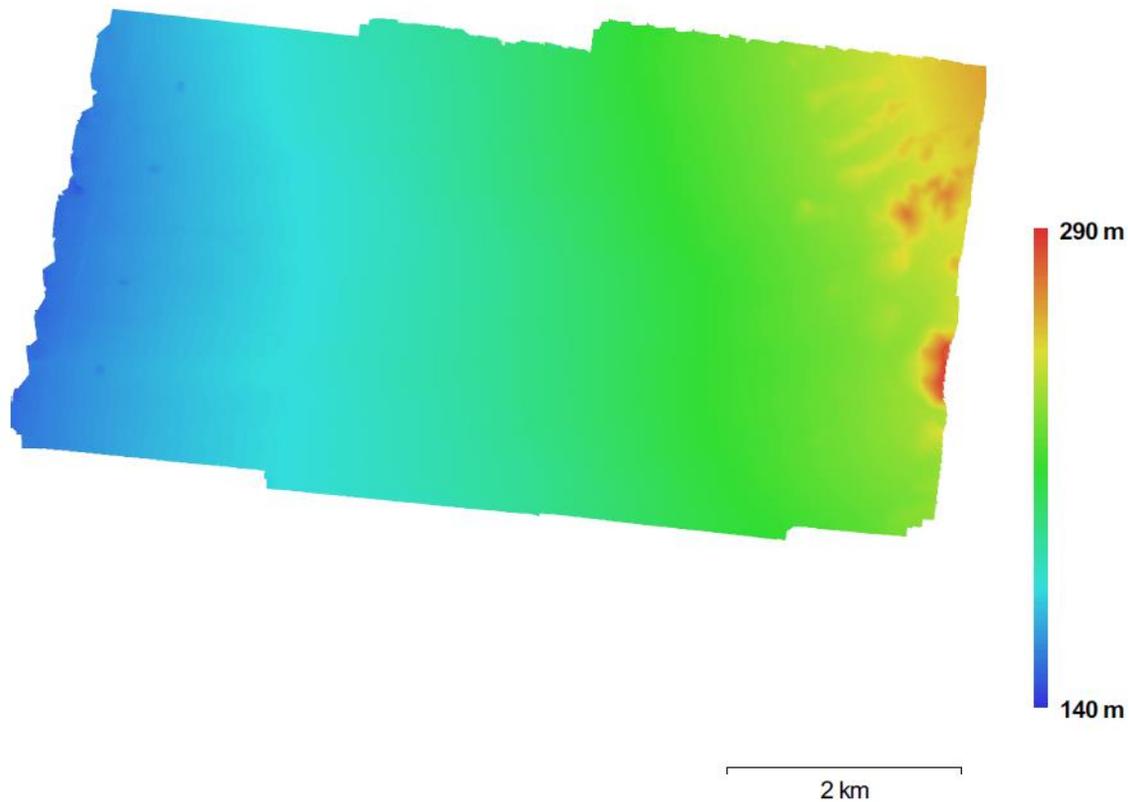


Figura 14. Modelo digital de elevaciones de la zona de estudio (msnm)

Así mismo, fue de especial importancia analizar las características fisiográficas de la zona de estudio para determinar la existencia de cauces y áreas de posible inundación dentro del polígono. De esta forma, el departamento de ingeniería podría llevar a cabo los procesos de liberación de zonas federales o delimitación de cauces federales con la CONAGUA, así como dar certidumbre al cliente con respecto a la viabilidad del proyecto. Para esto, nuestro departamento de ingeniería requirió generar estudios que permitieran determinar la existencia o inexistencia de cauces y, por otro lado, la Dirección solicitó generar un apartado que permitiera dar mayor claridad y certidumbre al tema de peligro por inundación en el parque, así como a las obras hidráulicas necesarias para el desahogo de los volúmenes de agua escurridos dentro del mismo, así como a los posibles peligros asociados a una inundación dentro del sitio, y plantear de forma general las obras hidráulicas necesarias para el proyecto.

4.1 Zona de estudio

Este trabajo se basa en el estudio que realicé para un proyecto solar de 2,346 hectáreas de superficie, localizado en el estado de Sonora, México, dentro de la cuenca río Yaqui, región hidrológica Sonora Sur (RH09). Cabe mencionar que, por motivos de confidencialidad con la empresa, no se me permite revelar la localización exacta del proyecto, por lo que este documento no contendrá ningún dato de referencia geográfica más allá del estatal.

4.2 Cuencas de aportación

Con base en la aplicación geoespacial SIATL, consideré aquellas cuencas cuya área y dirección de flujo de los escurrimientos principales ingresaran al área del polígono. Posteriormente, descargué el modelo de elevaciones escala 1: 50,000 del continuo de elevaciones de mexicano y, mediante la herramienta *r.watershed* (*Programa de análisis de cuenca hidrográfica*) del programa QGIS, creé todas aquellas cuencas asociadas al modelo de elevaciones previamente mencionado, considerando cuencas con un tamaño inferior a 10 hectáreas de superficie. Cabe señalar que, la herramienta para delimitar cuencas de QGIS no arroja las secciones exactas de las cuencas, sino fragmentos de las mismas, por lo que tuve que armar las cuencas que afectarían al sitio con base en las cuencas visualizadas en el SIATL.

Después de identificar y armar las cuencas con influencia, pude obtener el área de las mismas mediante la calculadora de campos del programa QGIS. Así mismo, para conocer la longitud del cauce principal correspondiente a cada una de las cuencas, realicé un análisis de los flujos principales acorde a la información disponible en el SIATL. Posteriormente, manipulé la capa vectorial de la Red Hidrográfica escala 1:50 000 para cortar aquellos tramos que fueran de interés y obtener la longitud de los mismos mediante la calculadora de campos del programa QGIS (Figura 15).

Es importante mencionar que, tanto para la delimitación de las cuencas como para los tramos de los cauces principales, consideré el punto de descarga del cauce principal en el punto de entrada a los límites del polígono de estudio. Por otro lado, para determinar la elevación media de los tramos de los cauces, utilice la ecuación 1 del apartado 3.3.1.

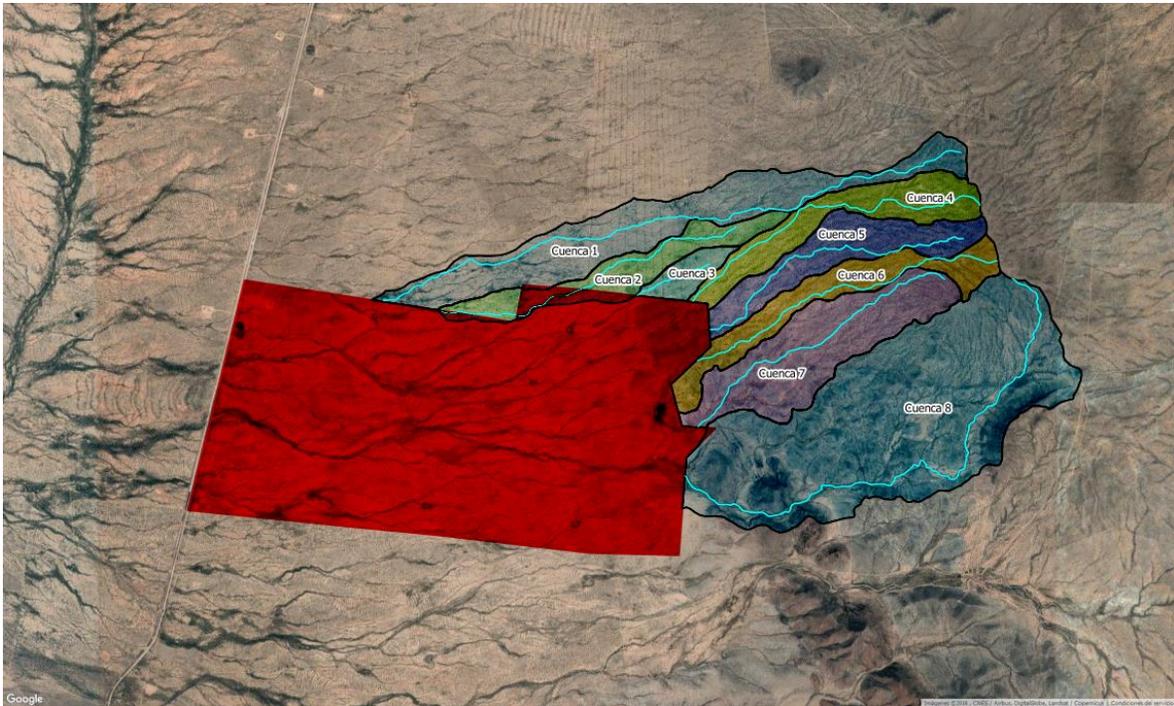


Figura 15. Cuencas identificadas para la zona de estudio

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para cada una de las cuencas identificadas:

Tabla 1. Características de las cuencas

Cuenca	Área (km ²)	Longitud del cauce principal (km)	Elevación del punto más alto (m)	Elevación del punto más bajo (m)	Pendiente media del cauce principal (adim.)	
1	4.42	9.220	373	214	0.0172	
2	1.89	4.786	299	224	0.0157	
3	0.53	1.172	289	268	0.0179	
4	2.12	5.006	380	279	0.0202	
5	2.14	4.463	375	278	0.0217	
6	2.08	5.003	380	272	0.0216	
7	3.49	4.547	372	266	0.0233	
8	10.84	8.437	380	260	0.0142	

4.3 Curvas I-D-Tr

Para su obtención, utilicé los métodos propuestos para la construcción de curvas I-D-Tr de las estaciones climatológicas de México, utilizando la base de datos del SMN (Rivera, et al., 2014).

De esta forma, primero descargué el archivo de metadatos geográficos de las estaciones climatológicas del país (SMN, 2018). Este archivo me permitió visualizar una capa vectorial de puntos geográficamente referenciados en el programa QGIS, en donde también es posible generar polígonos de Thiessen con base en la capa de puntos de las estaciones y mediante las herramientas geométricas de procesamiento para archivos vectoriales; los polígonos de Thiessen son polígonos cuyos lados son equidistantes a los puntos vecinos y mantienen la mínima distancia posible entre ellos. Estos se utilizarán para determinar el porcentaje de influencia de cada estación sobre las cuencas con influencia para la zona de estudio.

Posteriormente, seleccioné la estación base cuya área de influencia comprendiera de forma completa o parcial el área de alguna de las 8 cuencas analizadas (Figura 16):

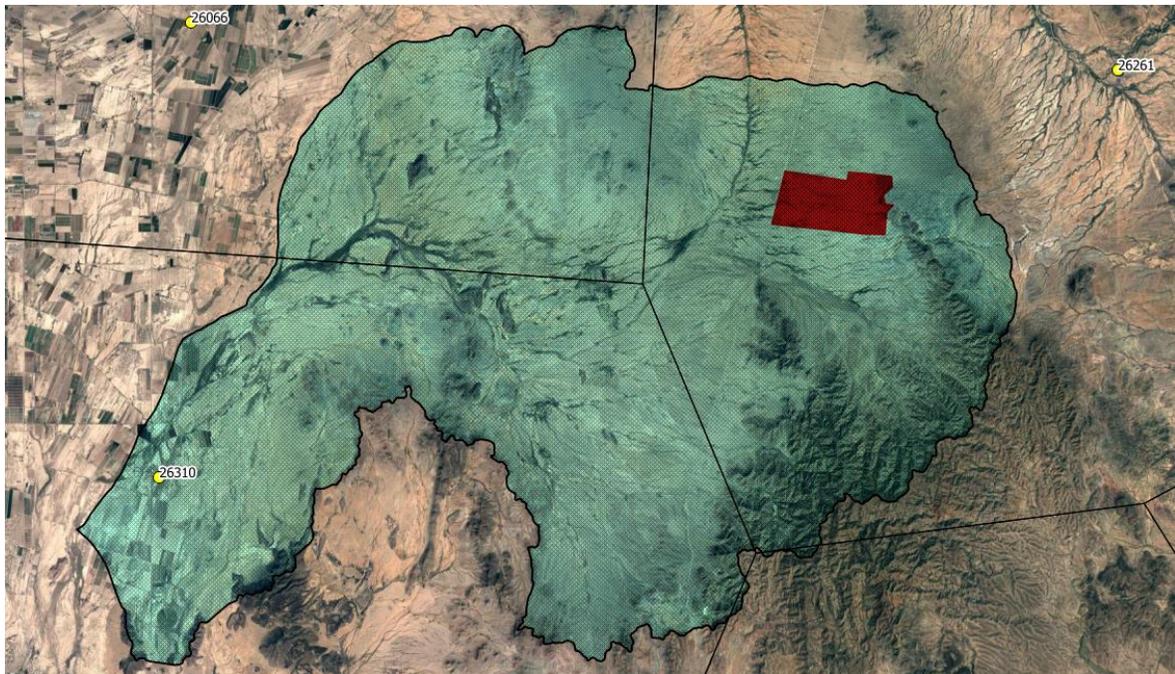


Figura 16. Polígonos de Thiessen para las estaciones climatológicas más cercanas

El análisis que realicé, contó con justo 25 años de registros, por lo cual se considera adecuado. La información de la estación climatológica utilizada (altitud, número de registros y variables regionales) se muestra a continuación:

Tabla 2. Variables regionales para la zona de estudio

Localización			Registro		Variables Regionales						
Latitud	Longitud	Altura	De	A	No. de Datos	P_1^2	P_1^{10}	F	A	B	C
19.51	-99.13	2000	1969	2018	12	97.1	100.7	2.01	16.94	3.82	0.66

Así mismo utilicé la información obtenida a partir del SIATL con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante los procedimientos descritos anteriormente, contra una fuente oficial. De esta forma, contrasté los valores de precipitaciones máximas en 24 horas calculados contra los valores obtenidos del SIATL.

Tabla 3. Precipitación máxima en 24 horas (mm)

Tr (años)	2	10	20	50	100	200	500	1000		
Calculadas	54.99	109.62	130.49	157.51	177.75	197.93	224.54	244.66		
SIATL	52.88	98.20	123.27	153.91	173.62	197.76	223.14	243.79		

Para obtener las discrepancias entre ambos métodos, contrasté ambos valores de precipitaciones máximas en 24 horas mediante el cálculo de un error relativo (ER), utilizando la siguiente ecuación:

$$Error\ Relativo = \left[\frac{P_{max24(calculada)} - P_{max24(SIATL)}}{P_{max24(SIATL)}} \right] \cdot 100 \quad \text{Ecuación 12}$$

De esta forma, el error relativo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Error relativo (%)

Tr (años) **2** **10** **20** **50** **100** **200** **500** **1000**
Error Relativo 4.0% 11.6% 5.9% 2.3% 2.4% 0.1% 0.6% 0.4%

Aquellos valores de error relativo positivos implican una diferencia a favor, mientras que, los valores negativos implican una diferencia en contra. De esta forma, todos los valores de error relativo obtenidos mostraron una diferencia a favor.

Para su construcción, utilicé el método de J.C. Bell para periodos de retorno menores o iguales a 10 años y el método de Cheng-Lung-Chen para periodos de retorno mayores a 10 años (Campos, 1990).

De esta forma, las curvas I-D-Tr obtenidas mediante los métodos de Cheng-Lung-Chen (1983) y J.C. Bell (1969) se muestran en la Tabla 5 y Figura 17:

Tabla 5. Datos para la construcción de curvas I-D-Tr (mm/h)

Duración (min)	Periodo de retorno (años)								
	5	10	25	50	100	250	500		
10	72.08	85.29	108.93	125.28	141.63	163.24	179.59		
20	50.26	59.48	77.69	89.35	101.01	116.42	128.08		
30	39.87	47.18	61.98	71.29	80.59	92.89	102.19		
40	33.59	39.75	52.30	60.15	68.00	78.37	86.22		
50	29.31	34.69	45.64	52.49	59.34	68.39	75.24		
60	26.18	30.97	40.73	46.85	52.96	61.04	67.16		
120	16.80	19.88	26.05	29.96	33.87	39.04	42.95		
180	12.86	15.22	19.90	22.89	25.88	29.83	32.82		
240	10.61	12.55	16.41	18.87	21.34	24.59	27.05		
300	9.12	10.79	14.11	16.23	18.35	21.15	23.27		
360	8.06	9.53	12.47	14.34	16.22	18.69	20.56		
420	7.25	8.58	11.23	12.92	14.60	16.83	18.52		

540	6.10	7.22	9.46	10.88	12.30	14.18	15.60		
660	5.31	6.28	8.25	9.49	10.73	12.36	13.60		
780	4.73	5.59	7.36	8.46	9.57	11.03	12.13		
900	4.28	5.06	6.67	7.67	8.67	10.00	11.00		
1020	3.92	4.64	6.12	7.04	7.96	9.18	10.10		
1140	3.62	4.29	5.67	6.52	7.38	8.50	9.35		
1440	3.07	3.64	4.83	5.56	6.28	7.24	7.97		

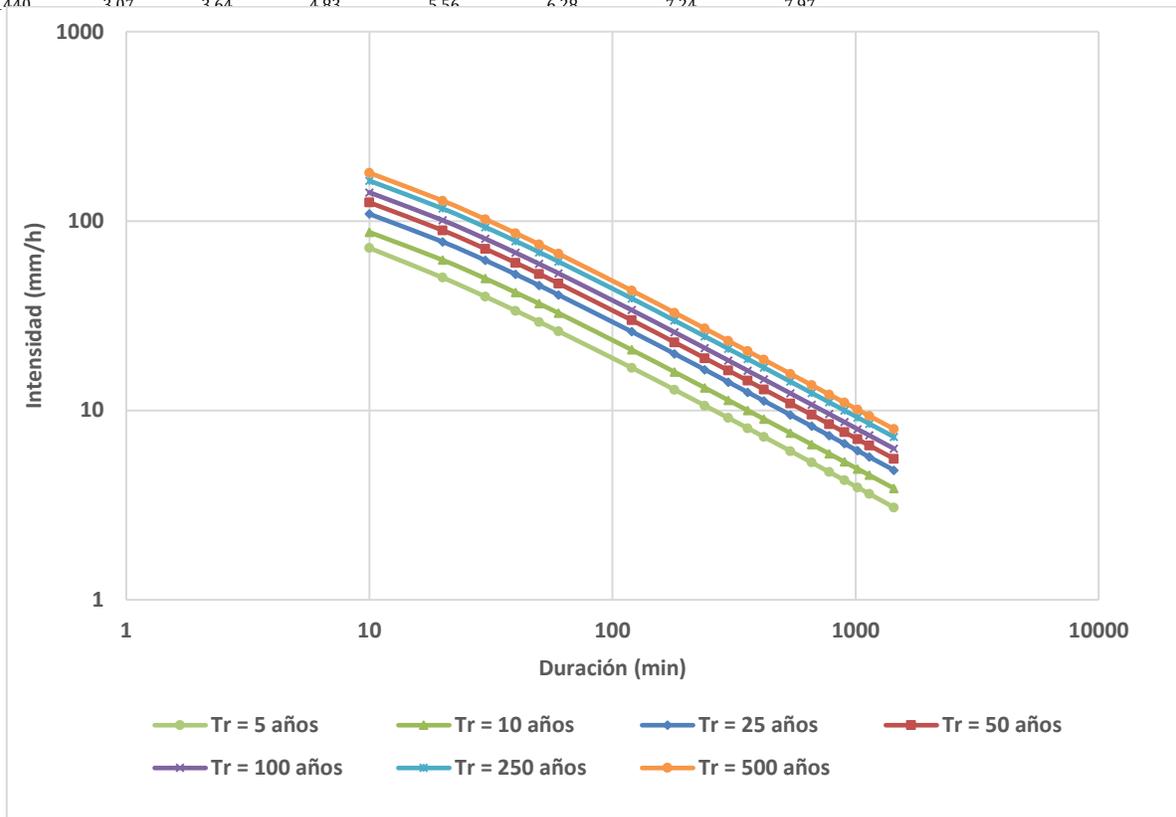


Figura 17. Curvas I-D-Tr para la zona de estudio

4.4 Parámetros para el diseño de avenidas

Primeramente, es posible clasificar una cuenca hidrológica de acuerdo a su tamaño (Tabla 6), acorde a la clasificación presentada por Aparicio (1992):

Tabla 6. Clasificación de las cuencas por su tamaño

De esta forma, todas las cuencas analizadas dentro de la zona de estudio son muy pequeñas ($A < 25 \text{ km}^2$) y, por tanto, fue posible asumir que la duración en exceso (D_e) coincide con el tiempo de concentración (T_c).

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de tiempo de concentración (T_c), tiempo de retraso (T_r) y tiempo pico (T_p) para cada una de las cuencas analizadas, empleando las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente:

Tabla 7. Parámetros de selección para la duración de la tormenta

Cuencas	T_c (h)	T_r (h)	T_p (h)
1	2.90	1.46	2.91
2	1.96	0.99	1.97
3	0.76	0.39	0.77
4	1.86	0.94	1.87
5	1.69	0.85	1.70
6	1.82	0.92	1.83
7	1.67	0.84	1.68
8	2.91	1.47	2.92

Posteriormente, para el cálculo de las avenidas de diseño, utilicé el método descrito por Chow (1964). De esta forma, se describen los pasos para la aplicación de dicho método.

4.4.1 Número de escurrimiento

El número de escurrimiento (N) es un valor asociado al uso, tipo y composición del suelo, así como a la pendiente y al estado de humedad del terreno (Fuentes & Franco, 1996). Su cálculo depende de los valores descritos en los anexos I y II.

Para su cálculo, utilicé los archivos vectoriales de la capa edafológica escala 1:50 000, así como la capa de uso de suelo y vegetación en la misma escala. Estas capas fueron cortadas

con base a la superficie de cada cuenca para posteriormente ser combinadas y contrastadas con base a la capa de pendientes correspondiente a las mismas. A continuación, hice uso de las herramientas de la calculadora de campos del programa para crear una nueva columna de valores que fuese calculada con base a los valores de número de escurrimiento propuestos para cada caso característico, así como a la porción de área que ocupan dentro de la superficie de cada cuenca, de forma que permitiera obtener un valor ponderado de número de escurrimiento para cada una de las cuencas analizadas.

Los valores de número de escurrimiento obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 8. Número de escurrimiento (N) para cada cuenca

Cuenca	1	2	3	4	5	6	7	8
N	68.58	68.99	73.76	69.54	69.99	70.20	72.46	74.05

4.4.2 Precipitación Efectiva

Adicionalmente y, por tratarse de cuencas muy pequeñas, la duración de la tormenta la igualé con el tiempo de concentración. Posteriormente, calculé el valor de la precipitación para cada cuenca a partir de las curvas I-D-Tr previamente calculadas.

A continuación, se presentan los valores de Precipitación total (P), así como los valores de Precipitación efectiva (Pe) para las 8 cuencas analizadas:

Cuenca	Tc (min)	Periodo de retorno (años)						
		5	10	25	50	100	250	500
1	174	38.12	45.10	59.01	67.87	76.73	88.44	97.29
2	118	33.38	39.49	51.76	59.53	67.30	77.57	85.33
3	46	23.62	27.95	36.78	42.30	47.82	55.12	60.64
4	112	32.77	38.78	50.84	58.47	66.10	76.19	83.82
5	101	31.67	37.48	49.16	56.54	63.92	73.67	81.05
6	109	32.52	38.49	50.46	58.03	65.60	75.62	83.19
7	100	31.56	37.34	48.98	56.33	63.68	73.40	80.75
8	175	38.18	45.18	59.11	67.98	76.85	88.58	97.45

Tabla 10. Precipitación directa (mm)

Cuenca	N	Periodo de retorno (años)						
		5	10	25	50	100	250	500
1	68.6	1.68	3.45	8.40	12.35	16.83	23.39	28.78
2	69.0	0.89	2.12	5.85	8.93	12.46	17.73	22.11
3	73.8	0.32	0.97	3.21	5.12	7.37	10.77	13.63
4	69.5	0.91	2.14	5.85	8.90	12.40	17.61	21.94
5	70.0	0.82	1.98	5.50	8.41	11.75	16.74	20.89
6	70.2	1.01	2.29	6.11	9.22	12.77	18.05	22.41
7	72.5	1.38	2.84	6.97	10.26	13.97	19.42	23.89
8	74.0	3.79	6.44	13.09	18.08	23.54	31.34	37.60

4.4.3 Frecuencia y Probabilidad de Excedencia

La probabilidad de excedencia (q) en el sitio de que un evento con una determinada frecuencia (Tr) se presente en cualquier año, así como el riesgo de que dicho evento ocurra al menos una vez para los 25 años la vida útil del proyecto, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11. Frecuencia, probabilidad de excedencia y riesgo de ocurrencia (%)

Periodo de retorno (Tr)	Probabilidad (q)	Riesgo (r)
5	20.00	99.62
10	10.00	92.82
25	4.00	63.96
50	2.00	39.65
100	1.00	22.22
250	0.40	9.53
500	0.20	4.88

Debido a lo anterior, se justificó un periodo de retorno de 250 años.

4.5 Avenidas de diseño

De acuerdo con los procedimientos descritos en el apartado 4.5 de este documento, así como a los métodos descritos por Chow (varias fechas), los valores de precipitación total, precipitación efectiva y caudales máximos (Q_p) obtenidos para cada una de las 8 cuencas de estudio se muestran a continuación:

Tabla 12. Precipitación Total (mm)

Cuenca	Tc (min)	Periodo de retorno (años)						
		5	10	25	50	100	250	500
1	174	38.12	45.10	59.01	67.87	76.73	88.44	97.29
2	118	33.38	39.49	51.76	59.53	67.30	77.57	85.33
3	46	23.62	27.95	36.78	42.30	47.82	55.12	60.64
4	112	32.77	38.78	50.84	58.47	66.10	76.19	83.82
5	101	31.67	37.48	49.16	56.54	63.92	73.67	81.05
6	109	32.52	38.49	50.46	58.03	65.60	75.62	83.19
7	100	31.56	37.34	48.98	56.33	63.68	73.40	80.75
8	175	38.18	45.18	59.11	67.98	76.85	88.58	97.45

Tabla 13. Precipitación Efectiva (mm)

Cuenca	N	Periodo de retorno (años)						
		5	10	25	50	100	250	500
1	69	1.68	3.45	8.40	12.36	16.83	23.39	28.78
2	69	0.89	2.12	5.85	8.92	12.46	17.73	22.11
3	74	0.32	0.97	3.21	5.12	7.37	10.77	13.63
4	70	0.91	2.14	5.85	8.90	12.40	17.61	21.94
5	70	0.82	1.98	5.50	8.41	11.75	16.74	20.89
6	70	1.01	2.29	6.11	9.22	12.77	18.05	22.41
7	72	1.38	2.84	6.97	10.26	13.97	19.42	23.89
8	74	3.79	6.44	13.09	18.08	23.54	31.34	37.60

Tabla 14. Caudales máximos (m³/s)

Cuenca	Periodo de retorno (años)						
	5	10	25	50	100	250	500
1	0.713	1.464	3.564	5.244	7.141	9.927	12.213
2	0.238	0.568	1.565	2.389	3.336	4.748	5.919
3	0.062	0.189	0.622	0.993	1.428	2.088	2.642
4	0.287	0.675	1.846	2.809	3.914	5.561	6.925
5	0.290	0.697	1.938	2.964	4.143	5.901	7.361
6	0.321	0.728	1.938	2.925	4.053	5.728	7.113
7	0.799	1.645	4.044	5.950	8.102	11.263	13.856
8	3.926	6.662	13.547	18.718	24.370	32.443	38.926

Para la construcción del hidrograma unitario adimensional del SCS, utilicé un algoritmo de relación de proporcionalidad entre tres valores conocidos y una incógnita. Para la obtención

del tiempo, mis datos conocidos fueron el tiempo pico, el dato de la columna que relaciona el tiempo con el tiempo pico (T/Tp) en el mismo renglón, y cualquier otro dato de la columna T/Tp, permitiendo relacionar estos valores para obtener el valor del tiempo correspondiente al renglón del dato de la columna T/Tp seleccionado (Tabla 15). Para la obtención de los gastos de diseño con base al periodo de retorno de 250 años previamente seleccionado, utilicé el mismo procedimiento, con la única diferencia de ahora utilizar los datos de la columna que relaciona el gasto con el gasto máximo (Q/Qp), y el dato del caudal máximo previamente calculado (Tabla 16).

Tabla 15. Relación de tiempo para la construcción de hidrogramas unitarios sintéticos SCS (horas)

T/Tp	Cuenca							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.58	0.39	0.15	0.37	0.34	0.37	0.34	0.58
0.4	1.16	0.79	0.31	0.75	0.68	0.73	0.67	1.17
0.6	1.75	1.18	0.46	1.12	1.02	1.10	1.01	1.75
0.8	2.33	1.58	0.61	1.50	1.36	1.46	1.34	2.34
1.0	2.91	1.97	0.77	1.87	1.70	1.83	1.68	2.92
1.2	3.49	2.37	0.92	2.25	2.04	2.20	2.02	3.51
1.4	4.07	2.76	1.07	2.62	2.38	2.56	2.35	4.09
1.6	4.66	3.16	1.23	3.00	2.72	2.93	2.69	4.68
1.8	5.24	3.55	1.38	3.37	3.06	3.30	3.03	5.26
2.0	5.82	3.94	1.54	3.74	3.40	3.66	3.36	5.85
2.2	6.40	4.34	1.69	4.12	3.74	4.03	3.70	6.43
2.4	6.98	4.73	1.84	4.49	4.08	4.39	4.03	7.02
2.6	7.57	5.13	2.00	4.87	4.42	4.76	4.37	7.60
2.8	8.15	5.52	2.15	5.24	4.76	5.13	4.71	8.19
3.0	8.73	5.92	2.30	5.62	5.10	5.49	5.04	8.77
3.2	9.31	6.31	2.46	5.99	5.43	5.86	5.38	9.36
3.4	9.89	6.71	2.61	6.36	5.77	6.23	5.71	9.94
3.6	10.48	7.10	2.76	6.74	6.11	6.59	6.05	10.53
3.8	11.06	7.49	2.92	7.11	6.45	6.96	6.39	11.11
4.0	11.64	7.89	3.07	7.49	6.79	7.32	6.72	11.70

4.2	12.22	8.28	3.22	7.86	7.13	7.69	7.06	12.28	
4.4	12.80	9.68	3.38	8.24	7.47	8.06	7.39	12.87	
4.6	13.39	9.07	3.53	8.61	7.81	8.42	7.73	13.45	
4.8	13.97	9.47	3.69	8.99	8.15	8.79	8.07	14.03	
5.0	14.55	9.86	3.84	9.36	8.49	9.16	8.40	14.62	

Tabla 16. Relación de gastos para la construcción de hidrogramas unitarios sintéticos SCS (m³/s)

Q/Qp	Cuenca							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.100	0.979	0.471	0.208	0.551	0.585	0.568	1.111	3.155
0.310	3.035	1.460	0.645	1.708	1.812	1.760	3.443	9.779
0.660	6.462	3.108	1.372	3.637	3.858	3.747	7.331	20.820
0.930	9.105	4.380	1.934	5.125	5.437	5.280	10.330	29.337
1.000	9.790	4.710	2.079	5.511	5.846	5.678	11.108	31.546
0.930	9.105	4.380	1.934	5.125	5.437	5.280	10.330	29.337
0.780	7.636	3.674	1.622	4.299	4.560	4.429	8.664	24.606
0.560	5.483	2.637	1.164	3.086	3.274	3.180	6.221	17.666
0.390	3.818	1.837	0.811	2.149	2.280	2.214	4.332	12.303
0.280	2.741	1.319	0.582	1.543	1.637	1.590	3.110	8.833
0.207	2.027	0.975	0.430	1.141	1.210	1.175	2.299	6.530
0.147	1.439	0.692	0.306	0.810	0.859	0.835	1.633	4.637
0.107	1.048	0.504	0.222	0.590	0.626	0.608	1.189	3.375
0.077	0.754	0.363	0.160	0.424	0.450	0.437	0.855	2.429
0.055	0.538	0.259	0.114	0.303	0.322	0.312	0.611	1.735
0.040	0.392	0.188	0.083	0.220	0.234	0.227	0.444	1.262
0.029	0.284	0.137	0.060	0.160	0.170	0.165	0.322	0.915
0.021	0.206	0.099	0.044	0.116	0.123	0.119	0.233	0.662
0.015	0.147	0.071	0.031	0.083	0.088	0.085	0.167	0.473
0.011	0.108	0.052	0.023	0.061	0.064	0.062	0.122	0.347
0.010	0.098	0.047	0.021	0.055	0.058	0.057	0.111	0.315
0.007	0.069	0.033	0.015	0.039	0.041	0.040	0.078	0.221

De esta forma, es posible construir gráficamente los hidrogramas asociados a un periodo de retorno de 250 años para cada una de las 8 cuencas de estudio (Figura 18).

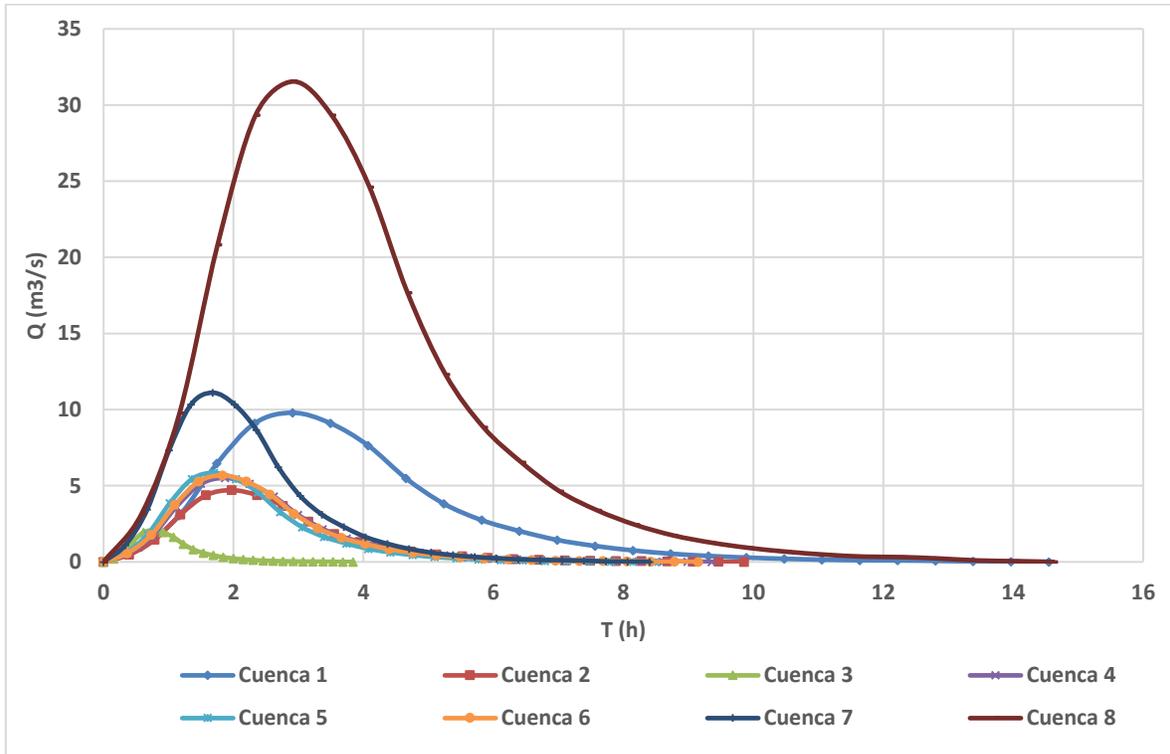


Figura 18. Hidrogramas para las 8 cuencas de estudio

4.6 Modelación bidimensional

A continuación, se describirá paso a paso el procedimiento realizado para la modelación hidráulica con base a las avenidas calculadas para las 8 cuencas que ingresaran sus escurrimientos al área del polígono del proyecto:

1. Importé el MDT a HEC-RAS para así poder visualizar el modelo en las herramientas de edición geométrica del programa (Figura 19).

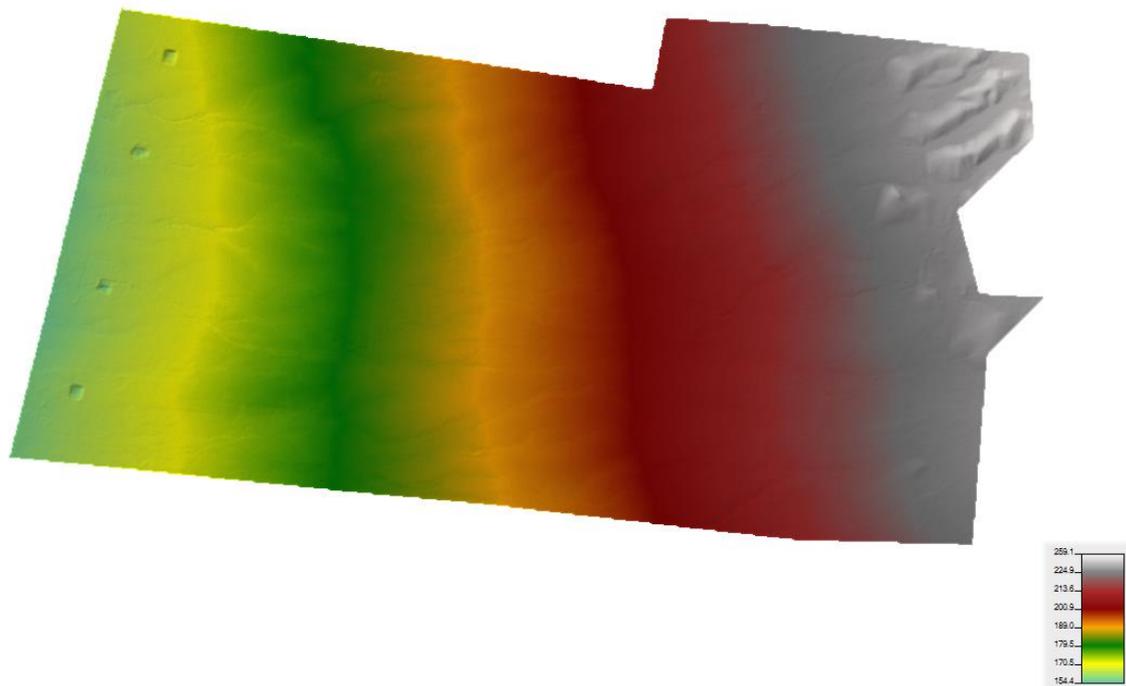


Figura 19. Modelo digital de terreno del polígono

2. Después de que generé el modelo geométrico del terreno, procedí a delimitar la zona de interés mediante una malla de flujo bidimensional con el mayor número de celdas posibles dentro de su superficie, con fin de obtener resultados más certeros. Así mismo, el programa requirió de los valores de coeficiente de rugosidad de Manning al momento de generar la malla, para lo cual consideré los valores propuestos para cauces naturales por la guía de ayuda del manual del programa HEC-RAS; teniendo en cuenta la existencia de zonas con vegetación arbustiva de densidad media a alta (principalmente zonas cercanas a escurrimientos o cuerpos de agua), consideré un valor de 0.060 (Figura 20).

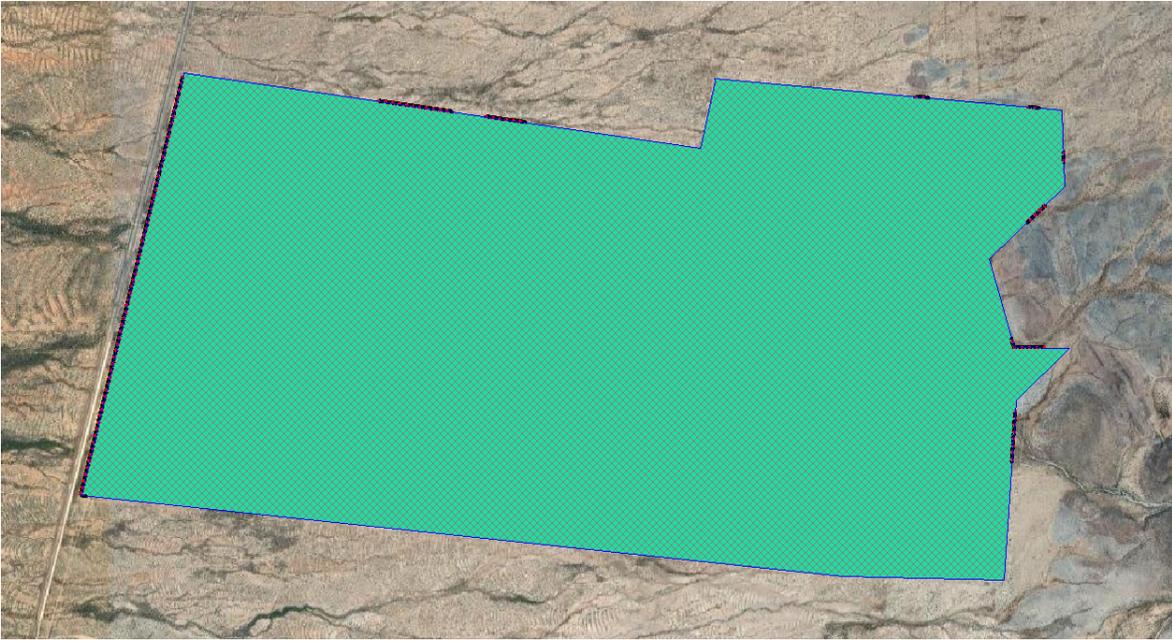


Figura 20. Malla de flujo bidimensional (5m)

3. Una vez generada la malla sobre los límites del predio, realicé el trazado de las entradas y salidas de los flujos correspondientes a las 8 cuencas analizadas. Los trazos los realicé cercanos al límite del borde de la malla y conforme a la marca visible de los escurrimientos en la ortofoto (Figura 21).



Figura 21. Condiciones de borde del modelo

4. Posteriormente, introduje la información obtenida de los hidrogramas calculados para las 8 cuencas y asigné dichos datos a la condición de borde correspondiente para cada una. Así mismo, seleccioné una condición de pendiente media para la única condición de borde de salida, con un valor de 0.015. Este último, lo obtuve a partir del MDT y mediante procesos realizados con herramientas SIG.
5. A continuación, creé el plan para la corrida del programa, procurando mantener los valores de tolerancia e intervalos de cómputo mínimos con el fin de obtener una mayor exactitud en los resultados arrojados por el programa.
6. De esta forma, el programa generó la visualización dinámica de los flujos sobre el polígono de estudio, considerando el tiempo de duración total de nuestra simulación como el tiempo de duración de la tormenta de la cuenca con tiempo de concentración más alto.

A continuación, se muestran los resultados de la modelación realizada obtenidos para una profundidad y velocidad máxima de inundación, considerando un periodo de retorno de 250 años (Figuras 22 y 23).

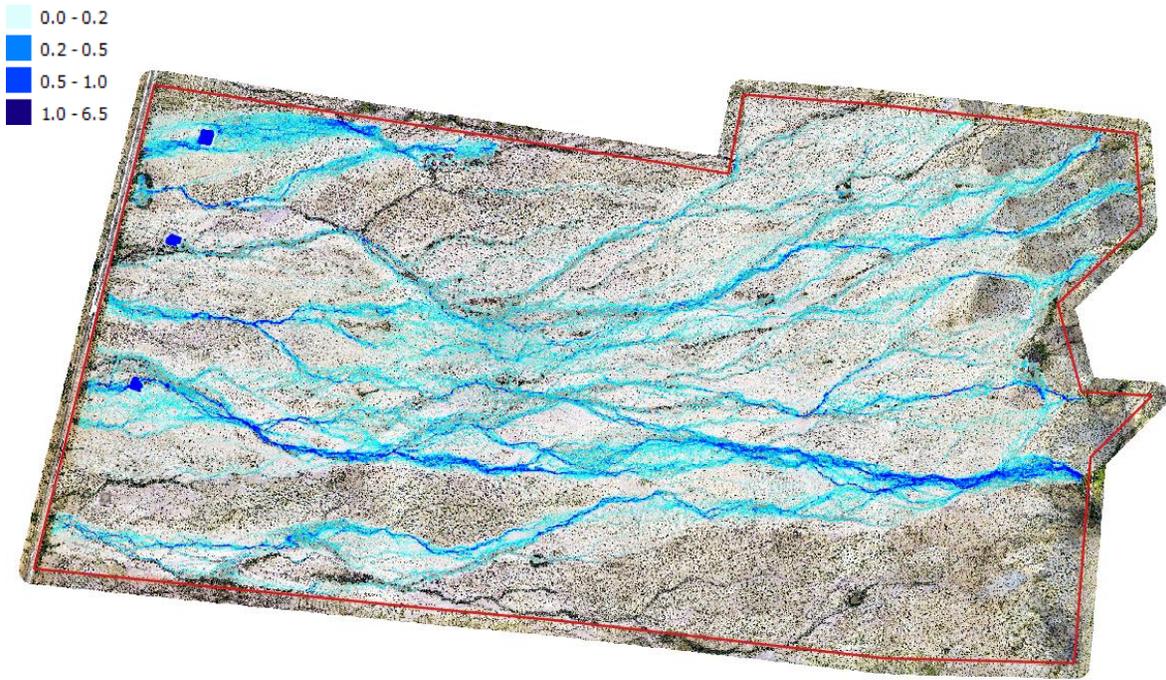


Figura 22. Profundidades máximas para $T_r = 250$ años (m)

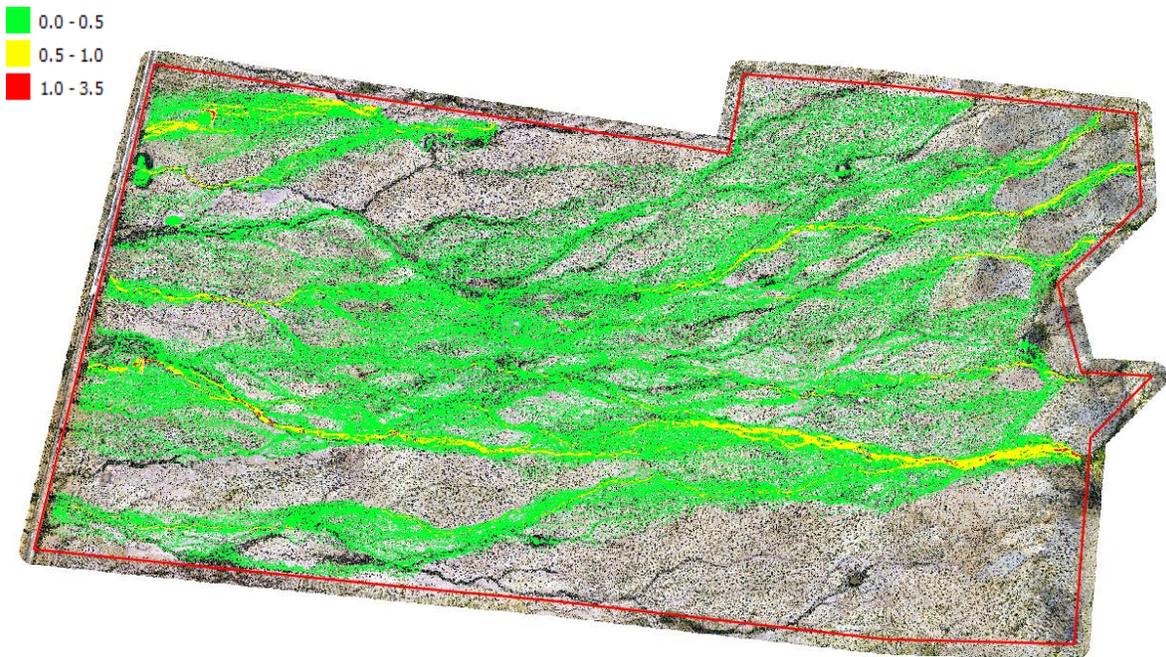


Figura 23. Velocidades máximas para $T_r = 250$ años (m/s)

Es importante mencionar que, el programa considera las características propias de la superficie a modelar y ajusta el comportamiento hidráulico a la topografía del sitio. Sin embargo, el programa no permite considerar los efectos de la precipitación propia sobre el área del polígono, la infiltración del suelo, así como el fenómeno de evapotranspiración.

4.7 Evaluación del peligro de inundación

Con base en el archivo de profundidades máximas mostrado en la figura 22, fue posible manipular dicha capa mediante las herramientas SIG del programa QGIS, dividiendo la capa de profundidades máximas en 3 rangos de profundidades; la primera, calados mayores que 0 pero menores a los 20 centímetros; la segunda, calados iguales a 20 centímetros pero menores a 50 centímetros (Figura 24); la tercera, calados iguales o superiores a 50 centímetros (Figura 25).

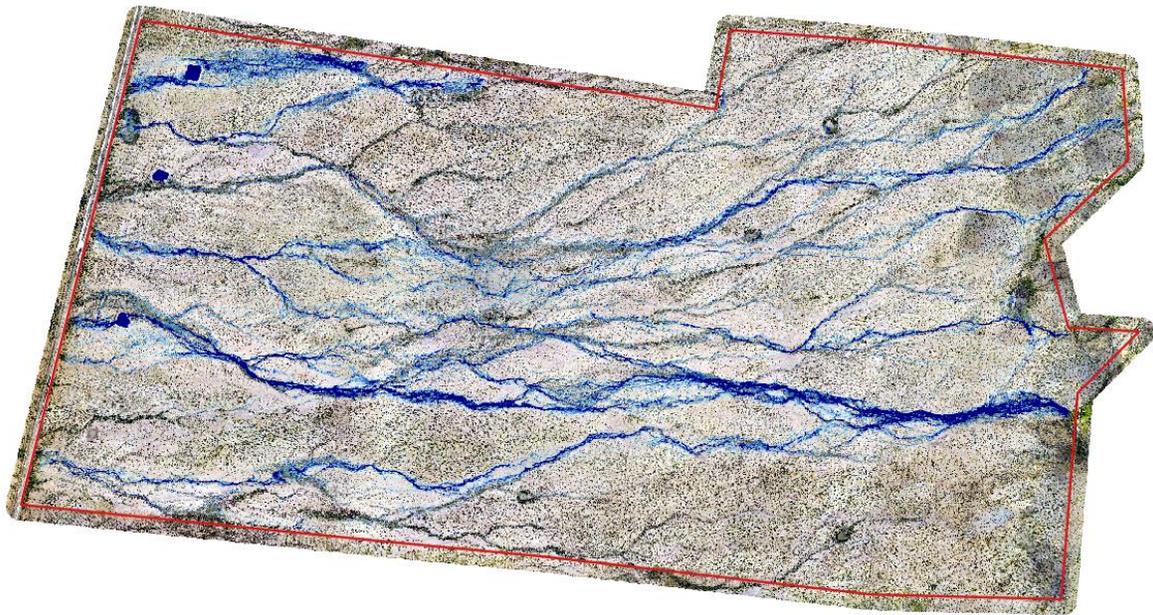


Figura 24. Zonas con profundidades iguales o superiores a los 20 cm

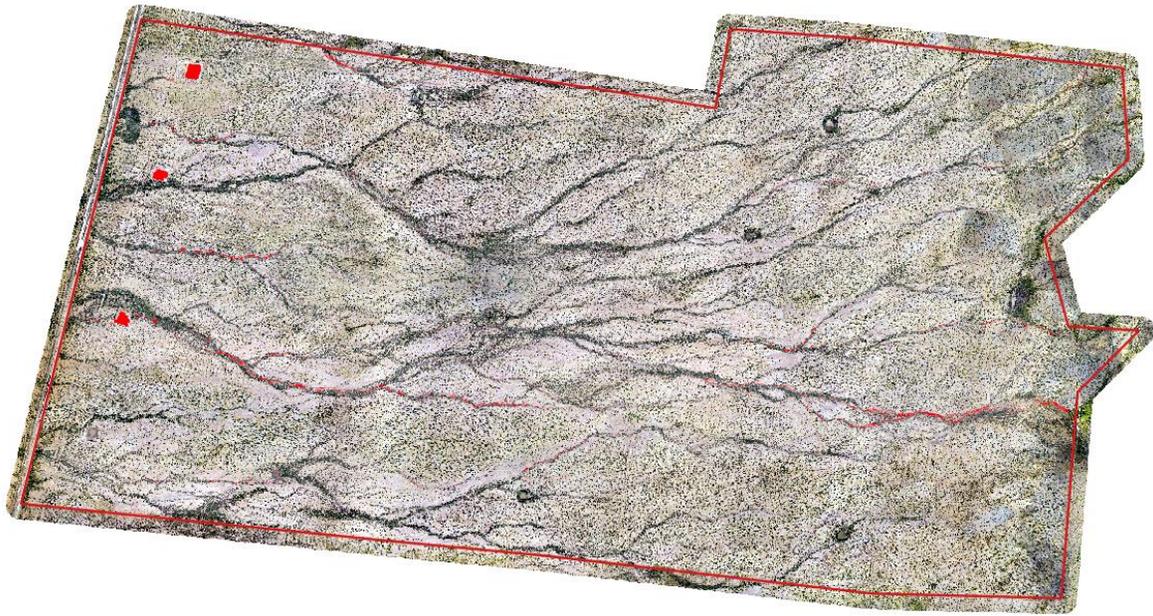


Figura 25. Zonas con profundidades iguales o superiores a los 50 cm

Con base en estos tres nuevos rangos de valores según lo expuesto en el apartado 3.9, creé una categorización asignando a cada uno un nuevo valor (1,2 y 3, respectivamente) para posteriormente obtener el área que ocupa cada rango mediante las funciones de la calculadora ráster.

Tipo de superficie	Parámetros de superficie para el análisis de inundación	Área (ha)
Área del proyecto (A _p)		2.346
Área total mojada (A _m)		678.71
Área mojada con profundidad igual o mayor a 0.2 m (A _{m(20cm)})		58.91
Área mojada con profundidad igual o mayor a 0.5 m (A _{m(50cm)})		5.10

Por último, calculé el índice de peligro por inundación utilizando la ecuación 11 del apartado 3.9 de este documento, obteniendo un valor de 8.66 por ciento.

5 Descripción y análisis de resultados

En primer lugar, localicé una estación climatológica a 23 km de distancia del polígono y con 25 años de registros, lo cual cumplía con el requisito de cercanía y cantidad de datos (Rivera, et al., 2014). Así mismo, los valores de precipitación máxima en 24 horas que obtuve los contrasté con los valores obtenidos por el SIATL y estos arrojaron diferencias mínimas.

En segundo lugar, utilicé el método semiempírico de Chow por representar la mejor opción de cálculo de caudales para cuencas con características similares a las de este estudio. Esto, fue de acuerdo con la normativa N·PRY·CAR·1·06·004/00 *Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes* de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2018), la cual indica que:

Método de Chow. Este método, que fue deducido con base en los conceptos de hidrogramas unitarios e hidrogramas unitarios sintéticos, es probablemente el más confiable de los métodos semiempíricos, por lo que debe aplicarse siempre que sea posible, particularmente para cuencas de hasta veinticinco (25) kilómetros cuadrados, aunque también se puede aplicar en cuencas con áreas hasta de doscientos cincuenta (250) kilómetros cuadrados, considerando que a mayores dimensiones los resultados serán menos confiables. Para cuencas más grandes, cuyas corrientes no estén aforadas, es necesario comparar los resultados que se obtengan con los que se determinen mediante métodos estadísticos para otra cuenca aforada dentro de la misma región hidrológica, como se indica en el inciso E.3.12 del manual M.PRY.CAR.1.06.004 Análisis Hidrológicos.

De esta forma, se obtuvieron los siguientes resultados para una precipitación máxima extraordinaria con periodo de retorno de 250 años:

Tr (años)	1	2	3	4	5	6	7	8
250	9.79	4.71	2.079	1.511	1.146	0.946	0.818	0.746

Tabla 18. Caudales máximos m^3/s para un Tr = 250 años

Así mismo, determiné que el polígono se encuentra desplantado sobre suelos de origen aluvial de tipo arena limosa, relativamente mal graduada y con una alta permeabilidad. Igualmente, determiné que se trata de suelos asociados a una vegetación desértica relativamente densa, especialmente en zonas cercanas a cauces y zonas elevadas de sierra. Estos resultados cuadran con las labores de reconocimiento en campo que realicé posteriormente junto con un compañero biólogo experto en flora silvestre y un ingeniero especialista en geotecnia.

Respecto de los valores de profundidad de inundación, observé tres zonas de encharcamiento con profundidades de hasta 6.39 metros, localizadas en tres de las cuatro zonas excavadas para banco de materiales previamente identificadas en campo. Así mismo, las profundidades cercanas al eje de los cauces principales alcanzaron un máximo de 0.69 metros. Por otra parte, el 28.93 % de la superficie total del proyecto es afectada por la lámina de agua generada por la lluvia, de la cual, sólo el 9.43 % corresponde a áreas con profundidades iguales o superiores a los 0.2 metros ($A_{m[20cm]}$), correspondiente a aquellas zonas que representan un peligro en caso de inundación. Del mismo modo, estas zonas representan el 2.73 % del total de la superficie del proyecto. Por otra parte, las zonas con un alto peligro de inundación, es decir, aquellas zonas con profundidades iguales o superiores a los 0.5 metros ($A_{m[50cm]}$), corresponden el 0.75 % del área mojada total y sólo el 0.22 % de la superficie del proyecto (Figura 27). Con esto, considero un peligro por inundación que va de moderado a bajo de acuerdo a la escala propuesta:

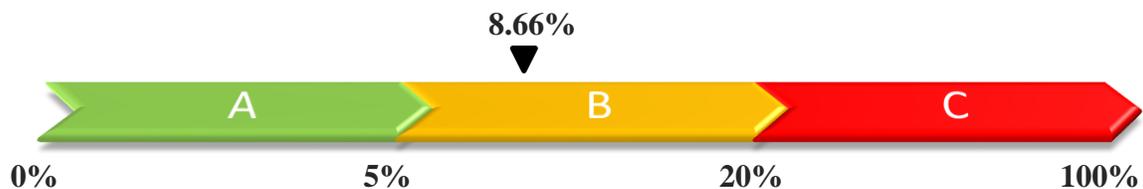


Figura 26. Índice de peligro calculado

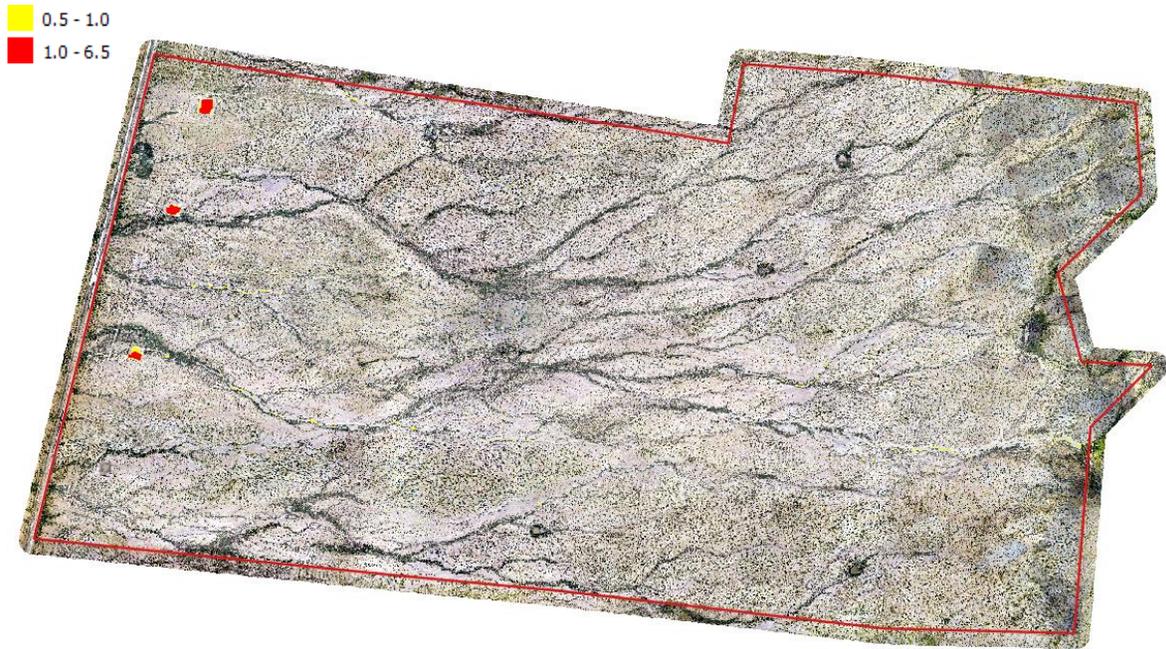


Figura 27. Zonas con alto peligro de inundación

Con respecto a las velocidades máximas alcanzadas por el flujo de agua, estas llegaron a un máximo de 3.25 m/s en los puntos de descarga a los bancos de materiales, en donde se presenta notoriamente un cambio de velocidad en el flujo debido a los cambios abruptos sobre la pendiente del terreno, sin embargo, estas zonas de peligro por velocidades superiores a 1 m/s sólo se presentan en un 0.23 % del total de la superficie mojada y tan sólo 0.7 % de la superficie total del proyecto (Figura 28). Considerando que la cimentación convencional se resuelve con perfiles de acero y que éstos, a su vez, soportarán los módulos solares, recomendé un análisis de socavación para evaluar el potencial de este fenómeno sobre las zonas donde irán instalados los paneles.

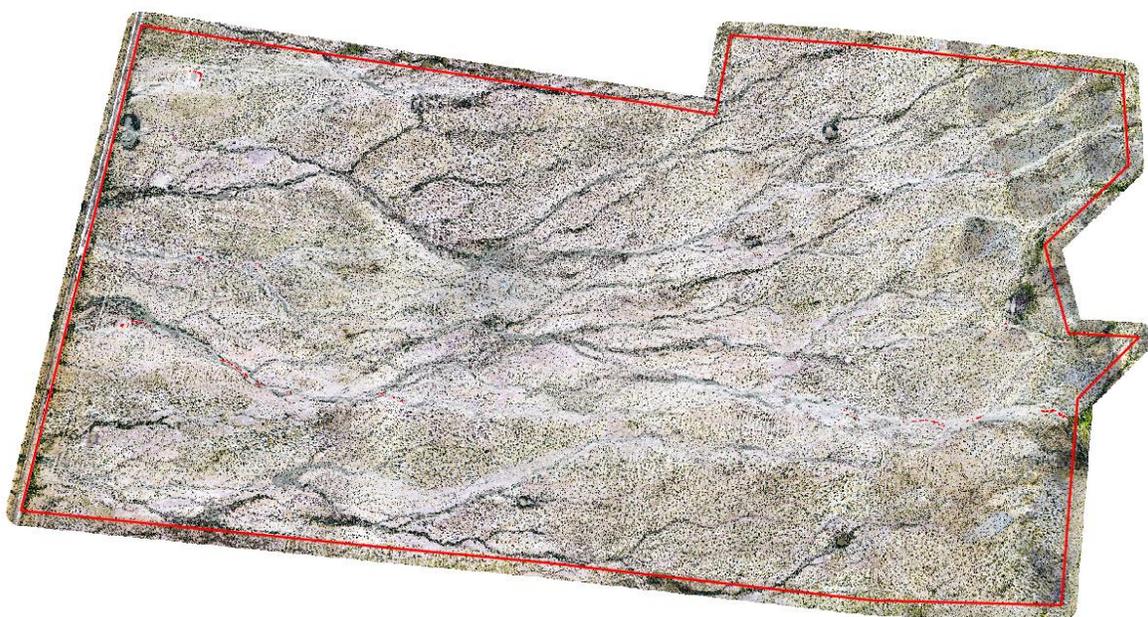


Figura 28. Zonas de peligro por velocidades altas

Para la selección de la avenida de diseño, tuve que considerar los beneficios que se esperan obtener con la construcción de la obra, los problemas constructivos, los costos que representan las obras de protección y los beneficios por la disminución en pérdidas materiales y humanas. En este sentido, Maza y Franco (1997) recomiendan emplear un período de retorno de entre 100 y 500 años para la protección de zonas industriales y urbanas. De esta forma y, con base en estudios hidrológicos realizados en el estado de California, se justificó la utilización de un periodo de retorno de 250 años, el cual, además, termina siendo solicitud del inversionista.

Por otra parte, determiné que la probabilidad de que se presente una tormenta con características similares a la de una precipitación con periodo de retorno de 250 años y considerando un tiempo de vida útil para el proyecto de 25 años, sería de 9.5 por ciento.

Por último, el relieve se verá afectado por las operaciones de desmonte y despalme, lo cual ocasionará una redistribución de los volúmenes de tierra dentro del área del parque. Así mismo, el proceso constructivo contempla el seccionamiento del terreno en plataformas con una pendiente mínima de 2 % en la dirección y sentido de los escurrimientos principales, esto con la finalidad de permitir el libre drenaje superficial. Con esto, una parte importante del

volumen de agua que escurra dentro del polígono será fácil y velozmente desahogado hasta un punto de descarga fuera del mismo, reduciendo drásticamente el peligro de inundación dentro del parque. Finalmente, considero que la infraestructura hidráulica para la central puede ser resuelta mediante zanjas o canales de dimensionamiento adecuado y sin revestimiento que sirvan para el desvío de los principales volúmenes de escurrimiento calculados. Así mismo, serán necesarias obras hidráulicas convencionales para el desahogo de los volúmenes de escurrimiento dentro del parque, tal como cunetas para caminos internos, externos y obras de protección que el diseñador considere para el área en donde sea colocada la subestación.

6 Conclusiones

Este trabajo consiguió la validación del Departamento de Ingeniería, así como satisfacer las necesidades de los directivos y del equipo de *Business Developers*, lo que permitió esclarecer sus dudas con respecto a la interpretación de la modelación hidráulica, así como

vislumbrando de forma general pero precisa el tema de la inundación y su relación con las obras hidráulicas necesarias para salvaguardar la infraestructura del parque solar.

Tras la aprobación interna de este trabajo, fue presentado y comentado con el equipo técnico del inversionista y, tras cuatro semanas de revisión y evaluación mediante consultoras del ramo, fue exitosamente aprobado y validado por el equipo técnico de los inversionistas, así como por el equipo financiero, quienes determinaron la viabilidad del proyecto para entrar a concursar en la próxima subasta eléctrica de energías renovables del país, la cual se celebró en octubre del 2017.

Por otra parte, este trabajo consiguió ser base para la elaboración de futuros estudios hidrológicos, incluyendo un apartado con relación al peligro por inundación y su relación con las obras de infraestructura hidráulica necesarias para el proyecto en desarrollo. De esta forma, este trabajo pasó de ser un proyecto piloto a ser la base para futuros estudios hidrológicos en el Departamento de Ingeniería de Sowitec Servicios México.

Personalmente, este trabajo sirvió para el desarrollo de habilidades de aprendizaje autónomo, para el fortalecimiento de mi destreza en el tema de análisis hidrológicos e hidráulicos, así como en la aplicación de distintas herramientas de trabajo, utilización de software avanzado y organización de tareas que aumentan el alcance y eficiencia de mis labores. Así mismo, el fortalecimiento de conocimientos, el aprendizaje de nuevas tareas, la visión para dar solución a un problema con base en mi criterio profesional y, lo más trascendente para mí, el aumento de mi confianza como profesional apto para plantear nuevos horizontes que den respuesta a los problemas ingenieriles que enfrenta una de las empresas de desarrollo de energías renovables más importante del país, han sido el fruto de mi trayectoria profesional dentro de esta empresa, gracias a la paciente guía y confianza depositada en lo que a mis conocimientos y habilidades refiere, junto con una buena actitud y un sano ambiente de trabajo.

Referencias

Aparicio, F. J., 1992. *Fundamentos de la hidrología de superficie*. Ciudad de México: LIMUSA S.A. de C.V..

Breña Puyol, A. F., 2003. *Hidrología Urbana*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Breña Puyol, A. F. & Jacobo Villa, M. A., 2006. *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Brunner, G. W., 2016. 2D MODELING USER'S MANUAL. In: *HEC-RAS, RIVER ANALYSIS SYSTEM*. 1 ed. Davis, Ca: US Army Corps of Engineers.

Campos Aranda, D. F., 1990. *Procedimientos para obtener curvas i-d-tr a partir de registros pluviométricos*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UASLP.

Campos Aranda, D. F., 2010. *Introducción a la Hidrología Urbana*. San Luis Potosí, México: Printego.

CENAPRED, 2014. *Inundaciones*. Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Chow, V. T., Maidment R., D. & Mays W., L., 1964. *Hidrología Aplicada*. En: s.l.:McGRAW-HILL, pp. 477-483.

CONAGUA, 2015. *Atlas del agua en México 2015*. Ciudad de México: SEMARNAT.

CONAGUA, 2018. *Redes piezométricas*. [En línea] Available at: <http://sigagis.conagua.gob.mx/Redes%20piezométricas/>

CONANMA, CONTROL Y ANÁLISIS DE SUELO , 2007. *CONANMA*. [En línea] Available at: http://www.conanma.com/descargas/cap_12_geotecnia.pdf

Faustino, J. & García, S., 2004. *Manual de manejo de cuencas*. 2 ed. San Salvador, El Salvador: World Vision Canada.

Forbes, 2018. *Forbes*. [En línea] Available at: <https://www.forbes.com.mx/mexico-terreno-fertil-para-las-energias-renovables/>

Fuentes Mariles, O. A. & Franco, V., 1996. *ESTUDIO HIDROLÓGICO PARA OBRAS DE PROTECCIÓN*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

GAMA, 2018. *Flood Up*. [En línea] Available at: <http://www.floodup.ub.edu/inundaciones/> [Último acceso: 18 Marzo 2018].

INEGI, 2000. *Síntesis de información geográfica del estado de Sonora*. [En línea] Available at: http://passthrough.fw-notify.net/download/184604/http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223328/702825223328_3.pdf

INEGI, 2013. *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0*. [En línea] Available at: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionemex/> [Último acceso: 2018].

INEGI, 2018. *Conjunto de datos vectoriales Edafología (Escala 1:250,000)*. [En línea] Available at: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx

INEGI, 2018. *Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción*, s.l.: s.n.

Instituto de Ingeniería, s.f. Incertidumbres en la estimación de hidrogramas de entrada al vaso. En: *Análisis de Riesgo en Presas*. Ciudad de México: CONAGUA, p. 67.

Matínez León, R., 2000. *Estudio hidrológico de la cuenca arroyo Guaymas con énfasis en el desarrollo urbano*. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.

Maza, J. A. & Franco, V., 1997. Obras de protección para control de inundaciones. En: I. d. Ingeniería, ed. *Manual de Ingeniería de Ríos*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería.

Mélice, J. L. & Reason, C. J. C., 2007. Return period of extreme rainfall at George, South Africa. *South African Journal of Science*, Volume 103, pp. 499-501.

Merlos Villegas, F., 2017. *HydroBits*. [En línea] Available at: <http://www.hydrobits.com/programas/sihimax.html> [Último acceso: Febrero 2018].

Mockus, V., 1972. Design hydrographs. In: SCS, ed. *National Engineering Handbook*. Washington, D.C.(Washington, D.C.): Department of Agriculture.

Ornelas Macías, A., 2009. *Caracterización geológica, estructural y de mineralización en el área Karina, municipio de Caborca, Sonora, México*. Hermosillo, Son: Universidad de Sonora.

OSGeo, 2018. *Descubre QGIS*. [En línea] Available at: <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html> [Último acceso: 2018].

Rivera, R. C., Vita Garza, Á. L., Castro Ortiz, V. A. & López Mejía, J. R., 2014. Metodología empleada. En: *CONSTRUCCIÓN DE CURVAS I-D-TR DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE MÉXICO CON LA BASE DE DATOS SMN-CONAGUA*. Heroica Puebla de Zaragoza(Puebla): Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

SCT, 2018. N-PRY-CAR-1-06-004/18. En: *Estudios hidráulico-hidrológicos para puentes*. Ciudad de México: Subsecretaría de Infraestructura, p. 3.

SENER, 2018. *SENER*. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/sener/prensa/en-los-proximos-tres-anos-se-construiran-65-nuevas-centrales-40-solares-y-25-eolicas-pjc>

SGM, 2018. *Sistema de Consulta de Información Geocientífica*. [En línea] Available at: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

SIAPA, 2014. Hidrología Superficial Urbana. En: *CRITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES EN LA Z.M.G.*. Guadalajara: SIAPA.

SIATL, 2018. *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*, Ciudad de México: s.n.

SMN, 2018. *Información Climatológica*. [En línea]
Available at:
<https://smn.cna.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>

UNESCO, 2012. *Glosario Hidrológico Internacional*. Ginebra, Suiza: Organización
Meteoreológica Mundial.

Anexos

Anexo I Clasificación de suelos para determinar el número de escurrimiento N

TIPO	CARACTERÍSTICAS
A	Arenas con poco limo y arcilla de tamaño medio (escurrimiento mínimo).
B	Arenas finas y limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de ambos.
C	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla.
D	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo).

Anexo II Valor del número de escurrimiento N

Uso de la Tierra o Cobertura	Condición de la Superficie	Pendiente (%)	Tipo de Suelo								
			A	B	C	D					
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, baja transpiración	----	45	66	77	83					
	Normal, transpiración media	----	36	60	73	79					
	Espeso o alta transpiración	----	25	55	70	77					
	Caminos	De tierra	----	72	82	87	89				
		Superficie dura	----	74	84	90	92				
	Bosques naturales	Muy ralo o baja transpiración	----	56	75	86	91				
		Ralo, baja transpiración	----	46	68	78	84				
		Normal, transpiración media	----	36	60	70	76				
	Descanso (sin cultivo)	Espeso, alta transpiración	----	26	52	62	69				
		Muy espeso, alta transpiración	----	15	44	54	61				
Cultivos en surco		Surcos rectos	----	77	86	91	94				
		Surcos rectos	>1	72	81	88	91				
		Surcos rectos	<1	67	78	85	89				
Cultivos en surco		Surcos en curvas de nivel (contorneo)	>1	69	79	84	88				
		Surcos en curvas de nivel (contorneo)	<1	65	75	82	86				
Leguminosas (sembradas al voleo o con maquinaria) o praderas con rotación	Terrazas	>1	66	74	80	82					
	Terrazas	<1	62	71	78	81					
	Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	66	77	85	89				
		Surcos rectos	<1	58	72	81	85				
	Cultivos en surco	Surcos en curvas de nivel	>1	64	75	83	85				
		Surcos en curvas de nivel	<1	55	69	78	83				
	Pastizal	Terrazas	>1	63	73	80	83				
		Terrazas	<1	51	67	76	80				
		----	>1	68	79	86	89				
		----	<1	39	61	74	80				
Potrero permanente	Contorneo	>1	47	67	81	88					
	Contorneo	<1	6	65	70	79					
	----		30	58	71	78					
	Surcos rectos	>1	65	76	84	88					
	Surcos rectos	<1	63	75	83	87					
Cereales	Contorneo	>1	63	74	82	85					
	Contorneo	<1	61	73	81	84					
Superficie impermeable	Terrazas	>1	61	72	79	82					
	Terrazas	<1	59	70	78	81					
	----		100	100	100	100					

Anexo III Datos para la construcción de hidrogramas de la SCS

T/Tp	Q/Qp	
0	0	
0.2	0.100	
0.4	0.310	
0.6	0.660	
0.8	0.930	
1.0	1.000	
1.2	0.930	
1.4	0.780	
1.6	0.560	
1.8	0.390	
2.0	0.280	
2.2	0.207	
2.4	0.147	
2.6	0.107	
2.8	0.077	
3.0	0.055	
3.2	0.040	
3.4	0.029	
3.6	0.021	
3.8	0.015	
4.0	0.011	
4.2	0.010	
4.4	0.007	
4.6	0.003	
4.8	0.002	
5.0	0	