

Universidad de Costa Rica

Escuela de Geografía

Licenciatura en Geografía

Zonificación de la amenaza de inundación mediante un levantamiento topográfico con un RPAS y un modelo hidráulico 2D en la microcuenca del río Ocloro, San José, Costa Rica.

Trabajo Final de Graduación, modalidad tesis, para optar por el grado de Licenciatura en Geografía

Estudiantes:

Gamboa Retana, Giancarlo

Avalos Monge, Alonso

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

[2020]

Tribunal Examinador

Director de Tesis



Dr. Christian Birkel

Lector Evaluador



Dr. Rafael Arce Mesén

Lector Evaluador



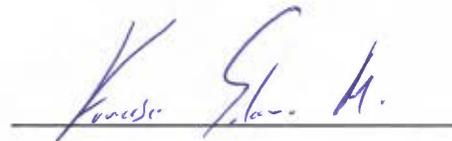
Lic. Sebastián Granados Bolaños

Lector Examinador



DEA. Pascal Girbt

Lector Examinador



M.Sc. Francisco Solano Mata

DEDICATORIA

A nuestras familias, amigos, profesores, a la Escuela de Geografía y a la Universidad de Costa Rica por todas las contribuciones en nuestra formación académica y social. Sembrando en nosotros valores que nos han permitido ser lo que somos y alimentando nuestros sueños por seguir creciendo.

Giancarlo y Alonso

AGRADECIMIENTOS

Desde el surgimiento de la idea de investigación hasta el momento de finalización de esta se contó con la participación de muchas personas que nos ayudaron y asesoraron en el desarrollo y conclusión de nuestro trabajo. Sin estas personas el camino hubiera sido más difícil, por estos motivos agradecemos profundamente la ayuda brindada amablemente:

- A la señora Rutbeth Ávila Alpízar por brindarnos su ayuda desinteresadamente y contextualizarnos todo lo sucedido a lo largo de los años en la microcuenca, además de brindarnos su preciado tiempo con entrevistas y conocimientos sobre los problemas presentados en la microcuenca.
- A la señora Sol Fernández por permitirnos la utilización de su propiedad para la colocación del sensor y el cuidado de este y por ponernos en contacto con miembros del Comité Comunal de Emergencias de Barrio Luján.
- Al Comité Comunal de Emergencias de Barrio Luján por permitirnos formar parte del grupo de vigilancia del río para conocer a primera mano el comportamiento de este. Además de brindarnos información acerca de todo lo realizado en el cauce a través de los años.

Valoramos profundamente la ayuda brindada por nuestro profesor asesor, Sebastián Granados Bolaños, quien sembró la idea de esta investigación, nos acompañó y asesoró en todos los procesos, por prestarnos insumos de suma importancia de una manera amable y desinteresada y por facilitarnos la realización de la tesis. A los profesores Christian Birkel y Rafael Arce, por la atención prestada en busca de mejorar nuestro trabajo.

INDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO, CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO | 1 |
| I. 1. Área de estudio | 2 |
| I. 1. 1. Características sociales de la microcuenca | 2 |
| I. 1. 2. Características físicas de la microcuenca | 2 |
| I. 1.3. Características climáticas de la microcuenca | 3 |
| I. 2. Problema de investigación | 5 |
| I. 3. Justificación | 5 |
| I. 4. Objetivo general..... | 7 |
| I. 5. Objetivos específicos | 7 |
| I. 6. Trabajos antecedentes, base para la investigación | 7 |
| I. 7. Marco conceptual | 13 |
| I. 7. 1. Interpretación del territorio..... | 13 |
| I. 7. 2. Herramientas para la comprensión del territorio | 14 |
| I. 7. 3. Ordenamiento territorial y gestión del riesgo de desastres | 15 |
| I. 7. 4. Modelos hidráulicos y su importancia en la zonificación de inundaciones | 16 |
| I. 8. Marco metodológico para el desarrollo de la investigación..... | 20 |
| I. 8. 1. Descripción de las características topográficas y geográficas. | 21 |
| I. 8. 1. 1. Obtención de fotografías aéreas y fotointerpretación | 21 |
| I. 8. 1. 2. Medición de las modificaciones antrópicas del cauce | 22 |
| I. 8. 2. Análisis hidrometeorológico | 22 |
| I. 8. 2. 1. Obtención y análisis de los datos de precipitación | 22 |
| I. 8. 2. 2. Registro y análisis de los datos de caudal | 23 |
| I. 8. 3. Zonificación de las inundaciones | 24 |
| I. 8. 3. 1. Modelado de la distribución espacial y profundidades de las inundaciones..... | 24 |
| I. 8. 3. 2. Modelado de la velocidad del flujo de agua de las inundaciones..... | 25 |
| CAPÍTULO II. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y FOTOGRAMÉTRICO | 26 |
| II. 1. Descripción geológica de la microcuenca del río Ocloro | 26 |
| II. 2. Descripción del cauce del río Ocloro..... | 27 |
| II. 3. Modificación histórica del cauce del río Ocloro..... | 28 |
| II. 4. Levantamiento fotogramétrico con el RPAS | 29 |
| II. 4. 1. Procesamiento del levantamiento fotogramétrico de alta resolución | 31 |

| | |
|---|-----------|
| II. 5. Medición del cauce del río Ocloro | 34 |
| CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS | 38 |
| III. 1. Descripción climática de la Microcuenca del río Ocloro | 38 |
| III. 2. Medición de los datos de caudal del río Ocloro..... | 38 |
| III. 2. 1. Conversión de metros de columna de agua a metros cúbicos por segundo | 40 |
| III. 3. Medición de los datos de precipitación del río Ocloro | 42 |
| III. 4. Análisis hidrometeorológico | 42 |
| III. 5. Caudal antrópico | 43 |
| III. 6. Eventos de modelación en el FLO-2D | 50 |
| CAPÍTULO IV. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA DE INUNDACIÓN | 52 |
| IV. 1. Evento de inundación 1, 21 de mayo del 2018..... | 52 |
| IV. 1. 1. Infraestructura afectada por la inundación | 54 |
| IV. 2. Evento de inundación 2, 24 mayo 2018 | 55 |
| IV. 2. 1. Infraestructura afectada por la inundación | 57 |
| IV. 3. Evento de inundación 3, 13 julio 2018 | 58 |
| IV. 3. 1. Infraestructura afectada por la inundación | 58 |
| IV. 4. Análisis de la velocidad de flujo del agua dependiendo de la cobertura del suelo en los márgenes | 60 |
| IV. 4. 1. Variación de la velocidad del flujo de agua en dos secciones del río Ocloro | 61 |
| CAPÍTULO V. CONSIDERACIONES FINALES | 67 |
| V. 1. Limitaciones y resultados..... | 67 |
| V. 1. 1. Recomendaciones finales propuestas | 70 |
| Bibliografía | 71 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO, CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO

| | |
|--|----|
| Ilustración 1:Delimitación de la microcuenca del río Ocloro..... | 4 |
| Ilustración 2:Esquema de componentes que toma en consideración el Flo-2D para el modelado de las inundaciones. (Salgado, G. & Bonola, I., 2012)..... | 18 |
| Ilustración 3:Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras. (Bladé, E., Cea, L y Corestein, G., 2014) | 18 |
| Ilustración 4:Datos de entrada necesarios para el modelado, procesos realizados y resultados arrojados por el modelo hidráulico Flo-2d. (Datos Banco Mundial, 2009)..... | 20 |

CAPÍTULO II. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y FOTOGRAMÉTRICO

| | |
|--|----|
| Ilustración 5:Todo el sector que es afectado por las inundaciones en la microcuenca del río Ocloro, barrio Luján, San José | 30 |
| Ilustración 6:Fotografías aéreas de la modificación del cauce del Ocloro a través de los años en el sector de la microcuenca que se inunda. Fuente: Instituto Geográfico Nacional..... | 32 |
| Ilustración 7:Ortomosaico, modelo de elevación digital y curvas de nivel generadas a partir de los vuelos con el RPAS e introducidos al modelo Flo-2d | 35 |
| Ilustración 8:Modelo digital de elevaciones utilizado en el modelado de las inundaciones por parte del Flo-2d | 36 |
| Ilustración 9:Sitio de estacionamiento de la estación total topográfica para la medición del entubamiento del cauce del Ocloro, bario Luján..... | 37 |

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

| | |
|---|----|
| Ilustración 10:Fluviometro utilizado para la obtención de los datos de caudal, tubo en el cual se introdujo para realizar las mediciones y sitio de ubicación del sensor en el rio Ocloro | 39 |
| Ilustración 11:Curva de descarga utilizada para la conversión de metros de columna de agua a metros cúbicos por segundo | 41 |
| Ilustración 12:Sitio de colocación del fluvímetro en el río Ocloro para la medición de los datos de caudal | 46 |
| Ilustración 13:Ubicación de la estación meteorológica del CIGEFI utilizada para el registro de los datos de precipitación | 47 |
| Ilustración 14:Gráfico de variación horaria típica en el caudal de río Ocloro, en días sin lluvias, como consecuencia de los aportes de aguas residuales de uso humano | 48 |

Ilustración 15: Gráficos de interacción entre la precipitación y el aumento del caudal del Ocloro durante el tiempo de registro de datos y los eventos de inundación modelados en el Flo-2d 49

CAPÍTULO IV. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA DE INUNDACIÓN

Ilustración 16: Modelado hidráulico del FLO-2D, evento de inundación del 21/05/2018 53

Ilustración 17: Modelado hidráulico del FLO-2D, evento de inundación del 24/05/2018 56

Ilustración 18: Modelado hidráulico del FLO-2D, evento de inundación del 13/07/2018 59

Ilustración 19: Modelado hidráulico del FLO-2D con diferente cobertura del suelo en los márgenes, Manning modificado 62

Ilustración 20: Franja de 10 metros de la modificación de la cobertura de los márgenes para el modelado con el Flo-2d 63

Ilustración 21: Gráficos de velocidades con diferente cobertura del suelo en los márgenes en dos sectores del cauce del río Ocloro 65

Ilustración 22: Sectores de modelamiento con el FLO-2D 66

Resumen

Los ríos urbanos de Costa Rica experimentan problemas asociados a la alta urbanización de las cuencas y a las pocas acciones por parte de las entidades gubernamentales que les compete el tema del agua y el riesgo asociado a las inundaciones. Problemas como la basura, la impermeabilización del suelo por el cambio de la cobertura y el depósito de aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento a los ríos ha venido a provocar la ocurrencia de inundaciones, y a intensificar la frecuencia y la magnitud de estas en las zonas urbanas.

Esta investigación se enmarca en la microcuenca del río Ocloro, microcuenca altamente urbanizada y que sufre de frecuentes inundaciones en el sector de barrio Luján que han afectado a los pobladores desde hace más de 50 años. Estas inundaciones son el resultado a los problemas mencionados anteriormente y que han venido incrementando su impacto a lo largo del tiempo, además de la modificación del cauce sin ningún tipo de estudio en el tramo que se desplaza por este barrio.

El estudio gira entorno a un modelado hidráulico con el Flo-2d, una primera parte fue la medición de las características topográficas y del cauce en su sector más modificado, y una segunda, en el análisis del comportamiento de las precipitaciones e inundaciones, para, por último, generar los modelados. Estos se apegaron de una manera muy acorde a lo experimentado en la realidad de la microcuenca, se determinaron tres puntos específicos en barrio Luján que son los responsables del desbordamiento del río y que son producto de modificaciones antrópicas al Ocloro. El río en este sector presenta dos entubamientos que son de un volumen insuficiente para la cantidad de agua que se transporta durante los eventos de precipitación y que producen que el agua se desborde del cauce y afecte a las personas que viven en la microcuenca.

El río Ocloro es afectado por aguas residuales, debido a que se presentan micro variaciones en el caudal sin la presencia de precipitaciones, denominado “caudal antrópico”. Estas micro variaciones responden a los horarios domésticos para la realización de actividades que necesitan de un mayor consumo de agua y que posteriormente son depositadas al río de una manera directa, produciendo estos

incrementos en el caudal. La cobertura en los márgenes del Ocloro influye directamente sobre la velocidad del flujo del agua durante las inundaciones, pero no en la ocurrencia ni en el desplazamiento de estas. La velocidad del flujo del agua es un elemento de importancia en las inundaciones debido a que afecta directamente las estructuras civiles y puede generar mayores impactos en las poblaciones.

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO, CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO

Las ciudades alrededor del mundo están creciendo a un ritmo acelerado y cada vez la cantidad de personas que emigran del campo a la ciudad es mayor. Este flujo de personas provoca que las ciudades se expanden tanto hacia las periferias como verticalmente, con edificios cada vez más altos y con mayor capacidad habitacional. Este crecimiento está causando una gran presión sobre los recursos naturales (Naciones Unidas, 2018).

La necesidad de nuevos terrenos dentro de las ciudades ha provocado que se invadan zonas no aptas para la construcción, principalmente, los márgenes de los cuerpos de agua que atraviesan estas urbes, generando un grave riesgo para la sociedad y el ambiente. Los márgenes de los ríos y, en algunos casos, incluso el cauce ha sido invadido por infraestructura provocando una modificación del flujo natural del agua que genera diferentes problemáticas sociales y ambientales dentro de las ciudades, principalmente, inundaciones (Naciones Unidas, 2018).

Esta investigación se enmarca en la problemática de inundaciones en las ciudades, valiéndose de herramientas geográficas para analizar este problema desde una visión de cuenca, unidad natural básica, y poder generar insumos que sirvan a las diferentes entidades gubernamentales para la toma de decisiones informadas en un contexto integral. Se contempla dicha investigación en la microcuenca del río Ocloro, una microcuenca donde se asienta una parte del Gran Área Metropolitana (GAM) y es afectada por la ocurrencia de inundaciones periódicamente durante la época lluviosa (Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), 2017).

Existen diferentes factores que son los encargados de generar las inundaciones. Es una microcuenca altamente urbanizada, que casi la totalidad del territorio posee infraestructura. La construcción de viviendas ha invadido los márgenes del río disminuyendo el ancho de este. El cauce ha sido alterado por conveniencia de algunas empresas que han entubado y modificado el recorrido sin ningún estudio (Ávila R.,

comunicación personal, 17 de octubre del 2017). La construcción de obras civiles, como puentes y alcantarillas, ha generado boquetes que detienen el flujo natural del agua y sirven como represas de basura, y hay un mal manejo de aguas residuales y pluviales que llegan al río.

Todas estas problemáticas contribuyen a la ocurrencia de inundaciones en la parte baja de la microcuenca, específicamente en barrio Luján, afectando a una gran cantidad de personas y viviendas. Es por este motivo que la presente investigación se centra en determinar cuánta es la cantidad de lluvia necesaria para que haya un desbordamiento del río, conocer la dinámica de inundaciones en la microcuenca y generar una zonificación de las áreas inundables, mediante la aplicación del modelo hidráulico Flo-2D, dependiendo de la magnitud de los eventos de precipitación, que sirva como insumos para futuros planes del Ordenamiento Territorial y Gestión del Riesgo.

I. 1. Área de estudio

I. 1. 1. Características sociales de la microcuenca

La microcuenca del río Ocloro pertenece a la subcuenca del río Tiribí y esta a la gran cuenca del río Grande de Tárcos, dentro de la vertiente del Pacífico. Sobre esta se asienta parte del Gran Área Metropolitana, la mayor zona urbana del país, donde, en el 2011 se concentraba un 52,7% de la población, abarcando esta área solamente un 3,8% del territorio nacional. (INEC, 2011). Debido a la alta concentración de población en un espacio reducido, los niveles de impermeabilización del suelo en las diferentes cuencas y microcuencas donde se asienta la GAM son muy altos. Este es el caso de dicha microcuenca, pues para el año de 1978 poseía un 90% del territorio con presencia de concreto (López, 1978).

I. 1. 2. Características físicas de la microcuenca

La microcuenca forma parte de los territorios administrativos de los cantones Curridabat, Montes de Oca y San José, ubicándose mayoritariamente en los dos últimos. La longitud del río Ocloro es de 5 kilómetros, nace en el distrito Curridabat, atraviesa el distrito San Pedro de Montes de Oca y confluye en el río María Aguilar en el distrito Catedral de San José. La microcuenca se extiende en dirección noreste-suroeste por el territorio

mencionado, cubriendo un área de 4,55 kilómetros cuadrados con un perímetro de 10.286 kilómetros y un índice de compacidad de 1.36030214. Cuenta con una altitud máxima de 1237 metros sobre el nivel del mar y una altitud mínima de 1132 metros sobre el nivel del mar, con una pendiente media de 3,82% (Datos generados a partir de un Raster del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Esta característica se puede apreciar a lo largo del territorio debido a que solo presenta pendientes muy suaves que son las encargadas de la escorrentía superficial. Dentro de la geomorfología y topografía se puede mencionar la dificultad para determinar los límites o divisoria de aguas, principalmente, porque presenta una variación altitudinal mínima y se hace complejo comprender un territorio casi por completo urbanizado en su totalidad.

El cauce del río ha sido modificado en diferentes zonas, su primera intervención fue después de 1977 con el estudio Drenaca, donde en la segunda etapa de este proyecto se desviaron las aguas del Ocloro al río María Aguilar. (Rodríguez, M.1990).

I. 1.3. Características climáticas de la microcuenca

El área de estudio se encuentra en el régimen climático de la vertiente del Pacífico. Según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), el régimen de la vertiente Pacífica se caracteriza por dos épocas definidas, la seca que se extiende de diciembre a marzo y la lluviosa de mayo a octubre, disminuyendo las precipitaciones en julio y agosto por el fenómeno del veranillo o canícula, siendo setiembre y octubre los meses más lluviosos. La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) influye directamente en el régimen de lluvias de ambas vertientes.

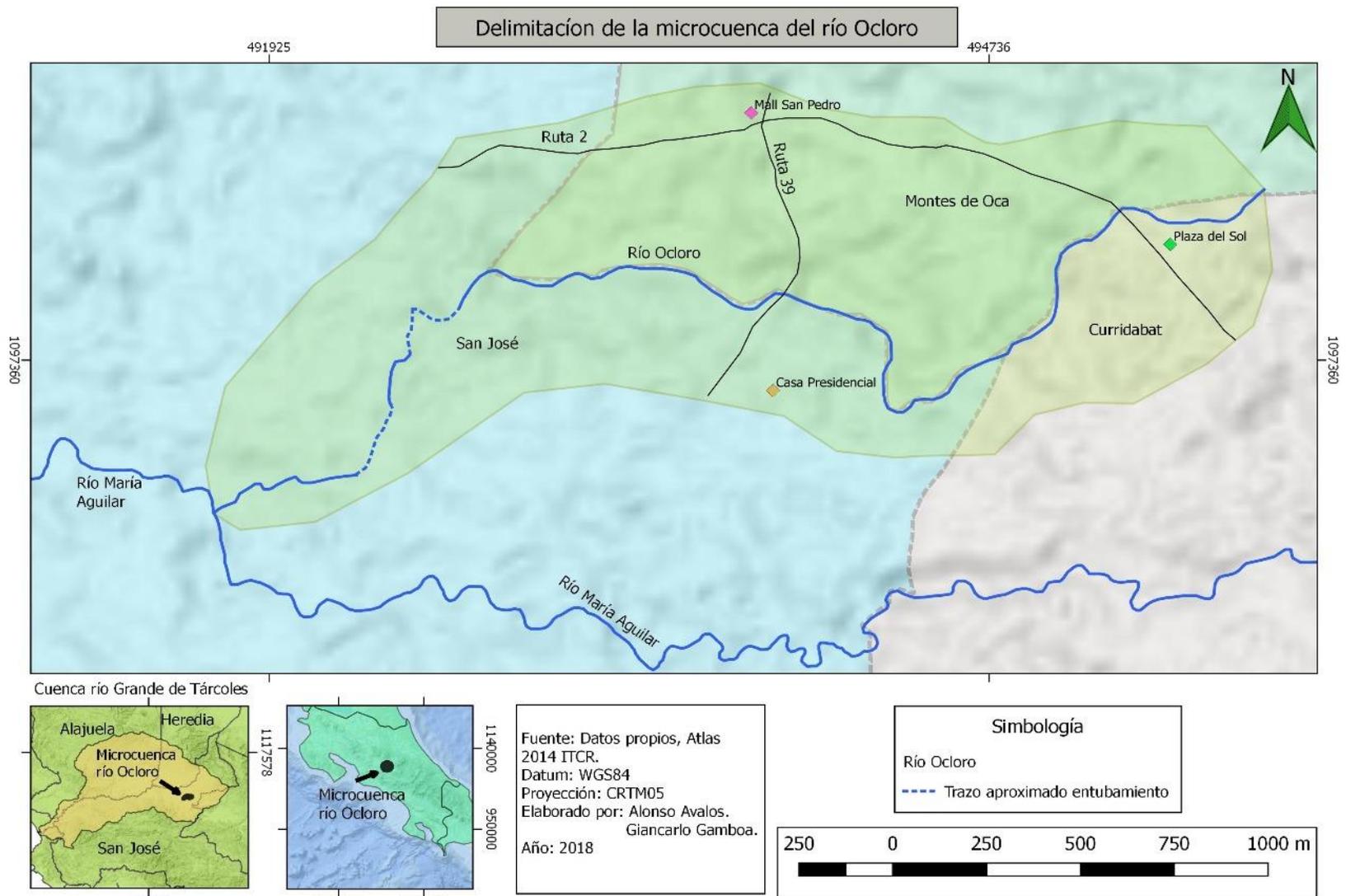


Ilustración 1: Delimitación de la microcuenca del río Ocloro

I. 2. Problema de investigación

La microcuenca del río Ocloro es afectada, cada época lluviosa, por inundaciones en la parte baja que ponen en riesgo la vida de las personas que viven en este sector. Sobre esta microcuenca se asienta una parte del Gran Área Metropolitana por lo que la presencia de viviendas e infraestructura abarca casi por completo el territorio provocando una alta impermeabilización del suelo. Esta impermeabilización genera una respuesta casi inmediata del río a los eventos de precipitación, aumentando considerablemente el caudal y provocando muchas veces inundaciones en el sector del cauce que ha sido modificado y alterado por la construcción de infraestructura. La problemática de inundaciones en dicha microcuenca es el tema central de esta investigación y se focaliza en responder a las preguntas ¿Cuál es el comportamiento de las inundaciones y las posibles áreas afectadas en la microcuenca del río Ocloro con relación a los diferentes eventos de precipitación? y ¿cuánta es la cantidad de agua necesaria para el desbordamiento del río Ocloro? ¿Cómo influye la morfología de canales y las condiciones topográficas del cauce en el comportamiento de las inundaciones?

I. 3. Justificación

La GAM es atravesada por diferentes cuencas, las cuales no cuentan con un manejo adecuado que regule y oriente un correcto ordenamiento territorial, generando diferentes problemáticas y conflictos sociales, económicos y ambientales. Esto sucede en la microcuenca del río Ocloro, la cual es afectada cada año por severas inundaciones (Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), 2017) debido, principalmente, a la alta urbanización sin un adecuado ordenamiento territorial (López, 1978), a que es un cauce modificado por la acción humana que se ha visto reducido en muchas secciones por la creación de infraestructura y porque no hay un adecuado manejo de las aguas servidas y pluviales que llegan al río (Rodríguez, 1990).

El aumento de la población y de la infraestructura que se está desarrollando en la microcuenca es vertiginoso, debido principalmente a la gran cercanía a la zona central de San José y por el proyecto impulsado por dicha municipalidad, “Plan de Regeneración y Repoblamiento de San José”. Dicho plan consiste en generar condiciones básicas propicias para aumentar el funcionamiento habitacional, comercial y de servicios de la zona, incentivando económicamente a dueños de propiedades e inversores inmobiliarios para la construcción de torres habitacionales y de servicios, con “un modelo vertical y compacto de ciudad para el casco central josefino, que haga un uso racional de los recursos limitados, como el espacio y la infraestructura” (Municipalidad de San José, 2005, pág. 3). De esta manera en la microcuenca se ubican 2 complejos de torres habitacionales, se están construyendo 3 más y hay miras, en la zona más afectada por las inundaciones, de la construcción de un complejo de 3 torres, aumentando la cantidad de agua que llega al río mediante los desagües. Cada torre contará con más de 40 pisos de condominios.

Aunque es una microcuenca en la que hay una gran cantidad de población que es afectada no hay una respuesta por parte de las autoridades competentes para solucionar el problema. Se han realizado arreglos en las tuberías, pero no se han generado soluciones contundentes que acaben con el problema de inundaciones o que provoquen una disminución tanto en la ocurrencia como en la intensidad (Ávila R., comunicación personal, 17 de octubre del 2017).

Uno de los principales conflictos que afecta el manejo de los ríos que atraviesan la GAM y que en algunos provoca la ocurrencia de inundaciones es la administración, protección y limpieza de estos de forma municipal. Aún no se ha desarrollado en el país un manejo de los ríos de forma integral, con una visión de cuenca y no desde límites político-administrativos. Esta visión fragmentada de un río por parte de las entidades gubernamentales no permite llegar a soluciones precisas para detener el problema de inundaciones. Esto sucede en el río Ocloro, las tres municipalidades realizan estudios y aplican soluciones, pero en cada parte de la microcuenca en su cantón, lo cual provoca que se arregle una sección, pero se afectan otras (Ávila R., comunicación personal, 17 de octubre del 2017).

Es por estos motivos que es de suma importancia desarrollar estudios científicos desde una visión integral y donde se tome como unidad de estudio la microcuenca completa, no pequeños sectores. Con esta investigación se busca generar insumos que permitan entender la dinámica de inundaciones en la microcuenca mediante la aplicación del modelo Flo-2D, analizando los principales eventos de precipitación y creando una descripción espacial de la microcuenca y el cauce del río para poder responder las preguntas centrales de esta investigación.

I. 4. Objetivo general

Caracterizar las áreas más propensas a inundaciones en la microcuenca del río Ocloro dependiendo de la frecuencia, magnitud, intensidad y duración de las precipitaciones mediante la aplicación del modelo hidráulico bidimensional Flo-2D.

I. 5. Objetivos específicos

1. Determinar con alta resolución espacial las características topográficas de la microcuenca del río Ocloro necesarias para la aplicación del modelo hidráulico bidimensional Flo-2D.
2. Analizar los datos hidrometeorológicos históricos de la microcuenca del río Ocloro para determinar la frecuencia, magnitud, intensidad y duración de los eventos de precipitación generadores de inundaciones como insumo para el modelado hidráulico.
3. Elaborar una zonificación de las inundaciones en la microcuenca del río Ocloro mediante la aplicación del modelo hidráulico bidimensional Flo-2D

I. 6. Trabajos antecedentes, base para la investigación

El área metropolitana de San José está constituida hidrográficamente por los ríos Virilla, Tiribi y Torres. En estos tres ríos desaguan las aguas fluviales y los drenajes habitacionales, comerciales e industriales de la zona. Dentro de los cantones Montes de Oca y San José se encuentran diferentes acequias, quebradas y afluentes que fueron creadas por parte de los dueños de los beneficios de café, los cuales construyeron canales para desviar el agua de los ríos hacia estos con diferentes fines, tanto de energía como de limpieza. Estos canales quedaron entre

la gran mancha urbana sirviendo como desagües y drenajes de las aguas servidas de las viviendas. (Rodríguez, 1990)

Uno de los ríos que drena el núcleo urbano del este de San José es el Ocloro, en el cual se depositan algunas de las aguas del cantón Montes de Oca, San José y en menor medida Curridabat. Este río nace en la comunidad de Calle Siles; debido a que es dentro de una propiedad privada y es solo en pequeños tramos que se logra observar, no se puede ubicar exactamente la naciente. En su recorrido, hasta llegar al río María Aguilar, recoge el agua del alcantarillado y drenajes de los barrios del este de la capital, lo cual provoca un aumento considerable en el caudal. Este alcantarillado no se encuentra en un estado óptimo y provoca grandes problemas en el flujo natural del agua.

Muchos de los sistemas de alcantarillado que se encuentran en funcionamiento fueron realizados entre los años 1911 y 1975, impulsados por programas de desarrollo municipal. “Las principales ciudades del Área Metropolitana fueron las primeras en el país en tener red de alcantarillado sanitario y PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales), pero la falta de operación y mantenimiento las llevó a su completo deterioro y por ende a estar fuera de operación, por lo que actualmente las aguas residuales recolectadas en sus redes son descargadas directamente a los ríos sin tratamiento alguno, son el caso de las ciudades de San José, Cartago, Alajuela y Heredia” (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado (AyA), 2009, pág. 5). Actualmente, con la construcción de la PTAR Los Tajos en el 2015 se redujo la contaminación ambiental producto de los vertidos de las aguas residuales a las cuencas de los ríos Rivera, Torres, María Aguilar y Tiribí, en el Área Metropolitana de San José. Según el Gobierno de la República de Costa Rica “esta planta cuenta con la capacidad para tratar el agua de 1.070.000 habitantes” (Gobierno de la Republica Costa Rica, 2016, párr. 8).

El abandono de la red de alcantarillado sanitario y de la PTAR por parte de las entidades competentes a lo largo de los años, y la falta de planteamiento de nuevas obras hidráulicas o de mejoramiento, han provocado un desequilibrio del flujo

natural del río Ocloro, acarreado problemas de inundaciones y contaminación que ocasionan serios daños en la infraestructura y el medio ambiente. (AyA, 2009)

La ausencia de un alcantarillado en buenas condiciones, una mala planificación territorial y el aumento demográfico en la zona que abarca la microcuenca ha provocado serios problemas a lo largo del tiempo, algunos de los cuales son:

- Inundaciones en ciertos sectores provocando pérdidas económicas para los habitantes.
- Grandes acumulaciones de basura en los márgenes del río o en infraestructuras provocando focos de contaminación y propiciando inundaciones
- Disminución del cauce por la construcción de infraestructura que invade el río.
- Malos olores por el desagüe de aguas servidas y drenajes sin tratamiento.
- Contaminación del suelo, del agua y del ambiente.
- Deterioro ambiental. (Rodríguez, 1990)

El Estudio Drenaca (1977) fue una de las primeras investigaciones que se realizó para el control y mitigación de las inundaciones que se producían en algunos de los barrios capitalinos, incluyendo barrio Luján, la parte de la microcuenca del río Ocloro que se inunda. El estudio fue impulsado por la Municipalidad de San José y el Instituto de Fomento y Asesoría Municipal, debido a que después de construir infraestructura e intervenir algunos cauces para disminuir las inundaciones no hubo un buen resultado. El informe realizado por esta empresa se dividió en dos fases: primero, el diagnóstico de la situación, planes preliminares y proyectos de emergencia y, la segunda, plan de desarrollo urbano, impacto ecológico, ley de desarrollo urbano y estudio de factibilidad.

En la primera fase se construyó infraestructura de emergencia en zonas puntuales de los cauces para solucionar los problemas que se desarrollaban y que no necesitaban de estudios profundos. Además, se inició con la obtención de toda la información disponible, el levantamiento topográfico de los cauces, localización de

los sitios de mayor contaminación y de botaderos de basura, caracterización del clima, hidrografía y vegetación, entre otros.

En este primer apartado se creó el Plan Maestro para el Control de Inundaciones, donde se establecieron diferentes soluciones para la microcuenca del Ocloro, estas son:

- Retirar escombros y vegetación de 4.5 km
- Desvío de gran parte de las aguas hacía el río María Aguilar
- Ampliar 23 estructuras que no cuentan con la capacidad hidráulica necesaria.
- Rectificar y entubar el río. (DRENACA, 1979)

La segunda fase del estudio se enfocó en el desarrollo urbano. En esta parte se creó el anteproyecto de la “Ley de Desarrollo Urbano” y el estudio de factibilidad del “Plan Maestro de Inundaciones”.

El informe realizado por INM y MINAE (2017) caracterizó el régimen pluvial de la cuenca del Río Ocloro durante 1967 y 2014. El principal objetivo de la investigación “Generalidades y registros climatológicos de las tormentas severas que han afectado la microcuenca del río Ocloro, en el área Metropolitana de San José. 1967 – 2014” fue generar material cartográfico que mostrara la distribución de las tormentas máximas registradas por las diferentes estaciones meteorológicas que se ubican en la GAM, con el fin de conocer la distribución de las precipitaciones y facilitar el análisis. Con la creación de la cartografía de la precipitación establecieron la dirección de dónde provenía cada tormenta, los máximos de precipitación para la cuenca y una comparativa entre las tormentas máximas que se registraron en cada estación, además de la influencia de estas sobre la cantidad de precipitación que se registró en el Ocloro. Se mencionan cuáles han sido las fechas de las principales inundaciones en la microcuenca, siendo la primera el 11 de agosto de 1967, lo cual evidencia que esta problemática se viene desarrollando desde muchos años atrás sin haber una respuesta por parte de las entidades gubernamentales (INM y MINAE, 2017). Después de esta fecha se mencionan las inundaciones presentadas el 12 de

agosto de 1971, 06 de setiembre de 1971, 11 de octubre de 1981, 18 de setiembre de 1987 y aumentando considerablemente la ocurrencia en años recientes a partir del 2014, aunque no menciona a qué se debe este aumento.

En el boletín informativo de la Municipalidad de San José (vol. 21, 2017), en el cual se explica todo lo relacionado con el sistema fluvial y drenaje de aguas pluviales del cantón, se contextualiza la mayor parte del marco legal relacionado con la administración y gestión del recurso hídrico nacional y la protección por parte de la municipalidad. En este informe se tratan temas como el problema de la contaminación de los ríos con basura y aguas servidas, y cómo viviendas de escasos recursos invaden los márgenes reduciendo el cauce y provocando problemas de inundaciones, entre otros. Describe algunas de las principales infraestructuras que ha creado la municipalidad para solucionar los problemas de inundaciones en algunos de los barrios capitalinos, como es el caso de la parte baja de la microcuenca del río Ocloro. En este río se entubaron 187 metros de cauce y se desvió una parte de sus aguas hacia el María Aguilar. La intervención completa fue de un kilómetro de longitud y se realizó para disminuir la ocurrencia y severidad de las inundaciones en los barrios Luján y Francisco Peralta.

Aunque la microcuenca del río Ocloro sufre de diferentes problemas sociales y cada época lluviosa se inunda, no ha sido objeto de un gran número de investigaciones. Dentro de las investigaciones que se pueden encontrar sobre la cuenca está la Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, “Contaminación de los Ríos en el Área Metropolitana: El río Ocloro”, realizada por Manuel López Muñoz (1978). En esta investigación se mencionan elementos importantes para conocer el contexto de la cuenca años atrás. Aunque es una investigación realizada hace 40 años, identifica problemas que en este momento aún se desarrollan, pero de una manera más intensa y que acarrea serias consecuencias, principalmente, inundaciones (López, 1978). En esta investigación los problemas que se identificaron, recalando que es hace 40 años, son:

- El servicio de limpieza de los márgenes y cauce del río es casi nulo o inexistente.

- Las personas que viven en los márgenes de los ríos bota la basura directamente al río.
- Existen tuberías e infraestructura que cruzan el río formando presas de basura y contaminación, malos olores.
- “En época de estiaje la capacidad de arrastre del río es mínima, lo que propicia el estancamiento de aguas residuales y de basura, y crea focos de contaminación.” (López, 1978, pág. 2)
- La pendiente media de la cuenca es muy baja agravando el problema antes mencionado.

Es de suma importancia identificar que años atrás esta microcuenca ya contaba con problemas que aún se presentan y no ha habido respuesta por parte de las autoridades durante este tiempo para disminuir la intensidad con la que ocurren y mejorar la gestión.

Otro aspecto de gran importancia mencionado en la investigación es que ya para la década de 1970 se presentaba un 90% del total del territorio de la microcuenca urbanizada y un 25% de la longitud del río poseía casas en los márgenes, principalmente de bajos recursos económicos, agravando los problemas de contaminación, basura y deterioro del flujo natural del río.

Otra investigación se realizó en el año 1990, la cual es una Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil: “Efectos del desvío del río Ocloro hacia el río María Aguilar”, realizado por Maritza Rodríguez Pacheco (1990). En esta investigación se determinaron algunas de las causas que provocan inundaciones a lo largo del río Ocloro y María Aguilar. Se estudiaron diferentes elementos relacionados con el río y con la cuenca, como los puntos críticos de inundación, la capacidad de desfogue, la escorrentía mediante el programa HEC-1 y el tiempo de concentración.

Hasta el día de hoy no ha habido ninguna investigación extensa desde el punto de vista geográfico, la cual puede agregar información valiosa al entendimiento de este sistema fluvial y las acciones necesarias para manejarlo de una forma más sostenible y desde una visión de cuenca.

I. 7. Marco conceptual

Esta investigación se centra en el estudio de la ocurrencia de inundaciones en la microcuenca del río Ocloro en la que se mezclan diferentes problemas y conflictos espaciales y ambientales. Para una mayor comprensión de la problemática que se experimenta se tiene que encuadrar la investigación dentro del Ordenamiento Territorial y la Gestión del Riesgo para comprender qué es lo que genera la ocurrencia de avenidas.

I. 7. 1. Interpretación del territorio

La disciplina fundamental para el buen funcionamiento de un espacio es el **Ordenamiento Territorial**. Tiene como objetivo propiciar un desarrollo adecuado y acorde a las características físicas, políticas, ambientales, sociales y económicas del espacio o territorio a ordenar, minimizando los impactos negativos generados por el aumento de infraestructura, actividades económicas y población. Para Castañeda “este es fundamental para el desarrollo, así como para proyectar la evolución económica, social, política y cultural de cada Entidad Territorial, de acuerdo con la ocupación del territorio, la interacción humana y la naturaleza misma, todo en aras de una sociedad justa, productiva y sostenible; así como también es el encargado de ser el instrumento de gestión, planificación y regulación de la organización político-administrativa y del territorio” (Castañeda, 2014, pág. 44).

Dentro de los territorios se dan diferentes manifestaciones morfológicas, una de estas son las cuencas. Una **cuenca hidrográfica** es un sistema natural y complejo, formada por un río principal donde escurren las aguas por medio de gravedad desde las divisorias de agua.

“Una cuenca hidrográfica es una zona geográfica drenada por una corriente de agua. Este concepto se aplica a varias escalas, que van desde una superficie agrícola atravesada por un arroyo (microcuenca) hasta las grandes cuencas fluviales (o cuencas lacustres). Una cuenca fluvial suele comprender un complejo sistema de cuencas y microcuencas hidrográficas atravesadas por un río principal y sus afluentes, en su curso desde su origen (su “fuente”) hasta su desembocadura. Dado que los suelos y la vegetación están estrechamente vinculados al ciclo del agua, las

cuencas hidrográficas constituyen la unidad de planificación más útil para llevar a cabo una gestión integrada del agua y de la tierra". (FAO, 2004, párr. 3.)

El abordaje de la cuenca como unidad de estudio es fundamental para la planificación del territorio, ya que esta unidad responde a límites naturales facilitando la gestión y el manejo, permitiendo intervenciones con fundamento que actúen acorde a las dinámicas y características específicas de la cuenca. Según Chamochumbi "las cuencas constituyen escenarios biofísicos-sociales interesantes -y en apariencia ventajosos- para realizar ensayos de modelación territorial y ordenamiento gradual de sus componentes en una perspectiva ambiental de desarrollo. Sin embargo, sus dimensiones y características estructurales y de funcionamiento, mayormente las convierten en escenarios sumamente complejos y heterogéneos, con diferentes grados de dificultad espacial-temporal para su gestión" (2012, pág. 11)

Como lo menciona Chamochumbi las cuencas son unidades que facilitan la aplicación de modelos territoriales y el ordenamiento de los diferentes elementos y componentes que presenta el espacio, pero, también es un escenario complicado de manejar y gestionar por los diferentes contextos y procesos que se pueden desarrollar dentro de una misma cuenca hidrográfica. Este es el caso de las **cuencas urbanas**, cuencas altamente pobladas y que presentan un desarrollo de infraestructura considerable con alta impermeabilidad en la superficie y nula presencia de zonas verdes (Gómez, 2007), que abonado a esto "son el resultado de lo moderno, de los constantes y crecientes procesos de urbanización que cambian los procesos ecológicos impactando negativamente en el medio, tras el desarrollo humano" (Retana & Hernández, 2016, pág. 26). La microcuenca del río Ocloro es una cuenca urbana que ha sido alteradas por los procesos de urbanización y presenta diferentes problemáticas sociales, políticas, económicas y ambientales.

I. 7. 2. Herramientas para la comprensión del territorio

Una de las técnicas para comprender e identificar los elementos que se ubican en cuencas urbanas, con alta concentración de infraestructura, es la **fotogrametría**,

según Bonneval "esta técnica tiene como objetivo estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías" (citado en Quirós, 2014, pág. 46). Una fotografía con **alta resolución espacial** nos permite productos de mejor calidad (digitalización-modelos de elevación), máxime donde el área de interés abarca un terreno complejo de comprender desde la superficie, según Chuvieco la resolución espacial se refiere "al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en unidades de longitud (mm sobre la foto, o m sobre el terreno)" (1990, p 91).

I. 7. 3. Ordenamiento territorial y gestión del riesgo de desastres

La urbanización y el desarrollo humano han impermeabilizado la superficie, evitando que el agua llovida se infiltre en el suelo, favoreciendo que el líquido se desplace con mayor rapidez hacia el alcantarillado y cauce del río. Este fenómeno se le conoce como **escorrentía superficial**, que se define como parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo (UNESCO, 2012), este proceso puede generar inundaciones.

Las **inundaciones** o **avenidas** "ocurre cuando las aguas de los ríos, riachos y galerías pluviales salen del lecho del escurrimiento debido a la falta de capacidad de transporte de uno de estos sistemas y pasa a ocupar el espacio que la población utiliza para vivienda, transporte (calles, autopistas y paseos públicos) recreación, comercio, industria, entre otros" (Tussi, 2007, pág. 40). Una inundación pone en riesgo a la población e infraestructura que se ubica cerca del recorrido del río, además de generar daños materias, ambientales y sociales.

Uno de los objetivos principales del ordenamiento territorial es disminuir al máximo la vulnerabilidad de una población a una determinada amenaza. Según la Food and Agriculture Organization (FAO), la **vulnerabilidad** son las características y las circunstancias que hacen que una determinada comunidad sea susceptible a los

efectos dañinos de una determinada amenaza. (FAO, 2009). Una **amenaza** es “un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales” (FAO, 2009, pág. 7). Esta misma define las **amenazas naturales** de diferentes maneras dependiendo del origen, las cuales pueden ser **geológicas, hidrometeorológicas y biológicas**, aunque estas pueden ser inducidas por procesos antrópicos. De la combinación de la vulnerabilidad de una población y las amenazas que podrían afectar a dicha población nace otro concepto, el **riesgo**, este es: “la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Tales como muertes, lesiones, propiedad, medios de vida, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental, como resultado de interacciones entre las amenazas naturales o antropogénicas y las condiciones de vulnerabilidad.” (FAO, 2009, pág. 7)

Las intervenciones para la solución del problema de inundaciones en una cuenca pueden ser de dos tipos: **estructurales** y **no estructurales**. Entendiendo las primeras como modificaciones directas en los sistemas hídricos de la cuenca, llámese el río o el sistema de alcantarillado, “las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial a través de obras en la cuenca (medidas extensivas) o en el río (medidas intensivas) para evitar el desborde hacia el lecho mayor del escurrimiento proveniente de las crecidas” (Tussi, 2007, pág. 52) y las no estructurales “son aquellas en que los perjuicios son reducidos por la mejor convivencia de la población con las crecidas, a través de medidas preventivas como la alerta de inundación, la zonificación de las áreas de riesgo, el seguro contra inundaciones, y las medidas de protección individual” (“flood proofing”) (Tussi, 2007, pág. 52)

I. 7. 4. Modelos hidráulicos y su importancia en la zonificación de inundaciones

Para revertir adecuadamente alguna situación problemática o modificar directamente las características propias de un río se debe entender la dinámica de éste. La utilización de **modelos hidráulicos** es de gran importancia para la

explicación y simulación del comportamiento del río ante alguna posible situación, como un evento extremo de lluvia. “Un modelo hidráulico es la construcción digital (virtual) de una red de distribución de agua, que permite reproducir y prever el comportamiento de la misma, para poder realizar pruebas y definir soluciones. La utilidad práctica de un software hidráulico reside en que permite hacer pruebas de “qué es lo que pasaría si...”; esto sin grandes inversiones de tiempo y dinero” (Programa de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario en Pequeñas y Medianas Ciudades (PROAPAC), 2010, pág. 2), permitiendo la utilización del **coeficiente de variación de Manning** para conocer la influencia de la cobertura del suelo en la velocidad de las inundaciones, este coeficiente toma en consideración parámetros de gran importancia en la aplicación de modelados hidráulicos como: área, perímetro mojado, radio hidráulico o la pendiente, además del valor de rugosidad, valor que determina la cantidad de resistencia dinámica que tiene un determinado material al flujo del agua (Fernández, León & Martínez, 2018).

El modelo utilizado para las simulaciones de los eventos de inundación es el **Flo-2D**. Este es “un modelo hidrológico-hidráulico bidimensional (2D) capaz de simular la propagación de crecidas o flujo de escombros en cuencas hidrográficas y su interacción con las diferentes estructuras y obstrucciones que caracterizan las zonas antropizadas, tales como puentes, alcantarillas y Diques” (IDRAN, 2019, pág. 1) además de tener la “capacidad de simular en un único paquete todos los procesos físicos que gobiernan el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación” (IDRAN, 2019, pág. 1). En la Ilustración 2, se observa el funcionamiento del modelo y los componentes que toma en consideración durante el modelado hidráulico de los eventos de inundación.

La importancia de los **modelos bidimensionales** radica en la capacidad de interpretar al río como una “una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación” (Bladé, E., Cea, L y Corestein, G., 2014. pág. 74) permitiendo una representación más realista con secciones donde la velocidad y dirección del flujo de agua varía. La Ilustración 3 muestra una malla en 2D de la llanura de inundación y del río.

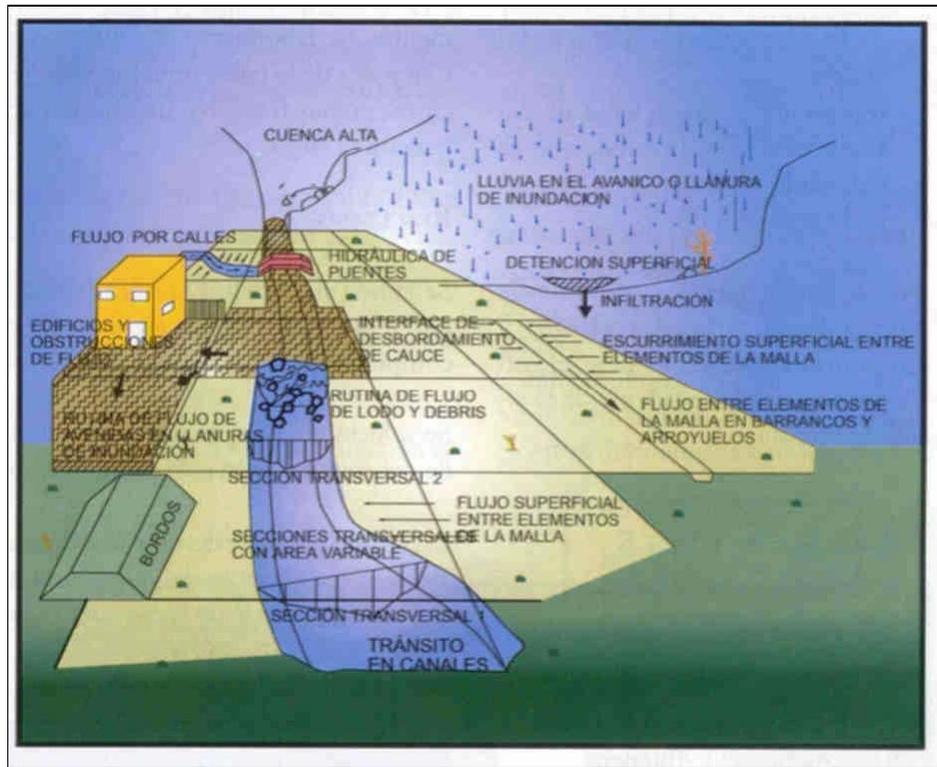


Ilustración 2: Esquema de componentes que toma en consideración el Flo-2D para el modelado de las inundaciones. (Salgado, G. & Bonola, I., 2012)

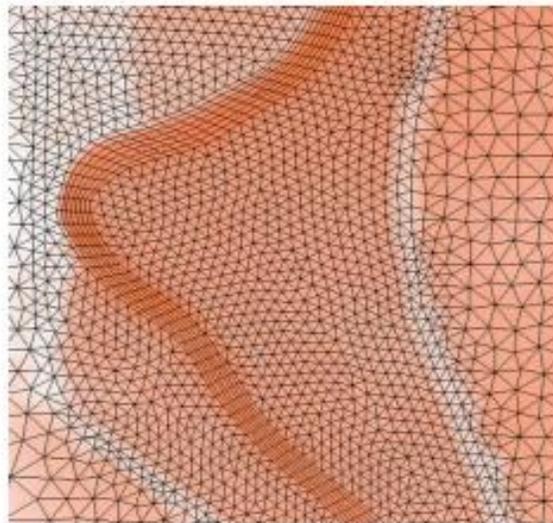


Ilustración 3: Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras. (Bladé, E., Cea, L y Corestein, G., 2014)

Los modelos hidráulicos resuelven diferentes métodos numéricos para la modelación, conservación y traslado de la velocidad del flujo entre los diferentes obstáculos, coberturas e infraestructura, uno de los métodos son las **ecuaciones de Saint Venant 2D y Saint Venant 1D**. En el caso del Flo-2d este utiliza las “diferencias finitas que integra la ecuación de momento en forma completa utilizando un esquema geométrico con celdas de dimensión constante y finalizado en el cálculo celda por celda y en 8 direcciones de las variables hidráulicas (profundidad, velocidad y caudal)” (IDRAN, 2019, pág. 1). Para el modelado de secciones dentro de canales utiliza las ecuaciones de Saint Venant 1D.

Las ecuaciones de Saint Venant utilizadas por el Flo-2d son las siguientes:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} = i$$

$$S_f = S_o - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t}$$

Donde “ x ” y “ t ” son las variables independientes, espacio y tiempo, respectivamente. Las variables dependientes “ H ” y “ u ” son profundidad del fluido y velocidad de la profundidad promedio en una dirección “ x ”, y la “ g ” representa la aceleración gravitacional. S_f es el componente de pendiente de fricción basado en la ecuación de Manning y S_o es la pendiente de base del río. (Nalesso, 2019)



Ilustración 4: Datos de entrada necesarios para el modelado, procesos realizados y resultados arrojados por el modelo hidráulico Flo-2d. (Datos Banco Mundial, 2009)

La Ilustración 4 muestra los datos necesarios para la aplicación del modelado hidráulico, el procesamiento de estos datos por parte del modelo y los resultados que arroja.

La aplicación de modelos hidráulicos permite crear zonificaciones de posibles áreas de inundación, una **zonificación** “consiste en la separación y segregación del territorio respecto de su entorno, donde se reconocen por una parte elementos que lo diferencian, y por otra, se actúa con el fin de aislarlos para un propósito particular” (Provoste, s. f., pág. 8).

I. 8. Marco metodológico para el desarrollo de la investigación

La investigación que se llevará a cabo pretende realizar una zonificación de los posibles sitios de inundación en la microcuenca con el modelado hidráulico realizado por el software Flo-2D. Para esta modelación el software necesita como datos de entrada un registro de eventos de inundación, con la intensidad, frecuencia y duración de cada uno, y conocer las características topográficas del cauce y márgenes del río, la infraestructura presente y las pendientes de la microcuenca.

La investigación gira en torno al modelo, con el primer objetivo se generará información espacial de la parte que se inunda y del cauce del río, y con el segundo se generarán datos de entrada para que este pueda conocer las condiciones hidrológicas de la microcuenca. Los datos obtenidos con los dos objetivos permitirán

al modelo conocer el contexto y la realidad de la microcuenca dándole más validez a las proyecciones de las zonas inundables generadas.

Conociendo la intensidad de los eventos de inundación ocurridos en la microcuenca se modelarán inundaciones modificando la cobertura del suelo en los márgenes para conocer la influencia en la distribución y velocidad del flujo del agua. La zonificación se realizará en barrio Luján, específicamente en los alrededores de calle 23 y avenida 18 que es la parte afectada por las inundaciones. Para la realización de la investigación se han establecido acciones concretas a seguir para poder dar respuesta a cada uno de los objetivos.

I. 8. 1. Descripción de las características topográficas y geográficas.

I. 8. 1. 1. Obtención de fotografías aéreas y fotointerpretación

Para llegar a la conclusión de este objetivo se utilizará un Remotely Piloted Aircraft System (RPAS), en español Sistema Aéreo Tripulado de Forma Remota, y una Estación Total Topográfica. La información generada por estas dos herramientas servirá como base para el modelo Flo-2D. Sobre las imágenes capturadas el modelo proyectará posibles zonas inundables, la información obtenida por la Estación Total Topográfica permitirá conocer el ancho del cauce del río, el desnivel de este y el ángulo de las pendientes y de los márgenes, datos de suma importancia para el modelo.

La primera acción que tomará lugar para la descripción de las características topográficas y geográficas de la microcuenca es la generación de imágenes tomadas por el RPAS, Dji Phantom 4 pro. El cual cuenta con una cámara de 20 megapíxeles con sensor CMOS y capturador de fotografías en 4K, con resolución de 3.2 centímetros por píxel en el eje “x” y “y”, posee una capacidad de vuelo de 30 minutos y cinco sensores anti-obstáculos.

Las imágenes tomadas tendrán una alta resolución espacial, en centímetros, de la zona de barrio Luján que es afectada por las inundaciones. Se realizarán dos vuelos con el RPAS donde se cubrirá la porción de microcuenca afectada por las inundaciones, por la autonomía de vuelo de 30 minutos es posible en dos vuelos

abarcar por completo el barrio. El RPAS capturará imágenes en alta definición y un modelado 3D de las superficies. Posterior a la obtención de las imágenes se realizará el mosaico con el software Agisoft, utilizando el mes de prueba gratuito. El mosaico creado será digitalizado en el software libre Qgis para conocer la cantidad de viviendas y las dimensiones de las diferentes infraestructuras que son afectada por las inundaciones, lo cual se representará en un mapa.

I. 8. 1. 2. Medición de las modificaciones antrópicas del cauce

La Estación Total Topográfica, se solicitará a la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica. En tres visitas de campo se medirán los ángulos, distancias y niveles de las pendientes y del cauce del río Ocloro en la parte que se inunda en la microcuenca, específicamente, en barrio Luján calle 18, avenida 23. Se obtendrán medidas con alta resolución espacial las cuales serán introducidas en el modelo para la obtención de proyecciones apegadas a la realidad de un cauce modificado.

I. 8. 2. Análisis hidrometeorológico

I. 8. 2. 1. Obtención y análisis de los datos de precipitación

Para el análisis hidrometeorológico, se obtendrán los datos de precipitación del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica (CIGEFI). Los datos de precipitación se encuentran en la base de datos de dicho centro, en formato csv, e inician desde el año 2005 hasta la fecha, registrados cada hora. La información requerida será brindada de forma gratuita debido a que son datos libres para el uso en investigaciones. La estación meteorológica del CIGEFI se ubica próxima a los límites de la parte alta de la microcuenca, específicamente en las coordenadas $9^{\circ}56'11.18''$ N y $84^{\circ}02'41.54''$ O, y registra: la precipitación y el promedio de temperatura y de humedad.

Los datos de precipitación se analizarán en el software Excel de Microsoft Office y se determinará la intensidad, la frecuencia, la duración y la magnitud de cada uno de los eventos que generarán inundaciones para determinar la influencia de estas sobre las segundas. En el software SigmaPlot, se realizarán los gráficos de

precipitación de cada una de las inundaciones, junto con el registro completo de precipitación para el tiempo de obtención de datos de caudal.

1. 8. 2. 2. Registro y análisis de los datos de caudal

Para la obtención de las variaciones del caudal del río se colocará un fluviómetro de marca HOBO, propiedad de la Escuela de Geografía, el cual se introducirá en un tubo de plástico con orificios que permitirán el ingreso del agua. Se realizó un recorrido a lo largo de la microcuenca para determinar dónde colocar el sensor, y se estableció que el sitio idóneo que garantizará la integridad y seguridad de este es la propiedad de un miembro del Comité Comunal de Emergencias de Barrio Luján, ubicada en el barrio Francisco Peralta calle 29, que permite una mayor facilidad para ingresar al río y descargar los datos. Este medirá cada minuto para evidenciar las variaciones en el nivel del río y poder asociarlas no solo con las precipitaciones sino también con los diferentes usos del agua por parte de la población de la microcuenca (aguas negras y servidas). El fluviómetro medirá el caudal del río durante la época lluviosa de la vertiente del Pacífico, de junio a octubre (IMN, 2018). La recolección de los datos del fluviómetro será cada 15 días, debido a que es la capacidad de almacenamiento que tiene el sensor para datos obtenidos cada un minuto. La cantidad de días que registra el sensor fue obtenida de una prueba realizada en la época seca en el mismo río.

Los datos obtenidos serán procesados mediante el software Excel. El fluviómetro registra las variaciones en la presión hidrostática cuando el nivel del agua aumenta, mostrando los valores en libra de fuerza por pulgada cuadrada (psi, siglas en inglés). Estos valores se convertirán, primero, a metros de columna de agua y, luego, a metros cúbicos por segundo. La conversión de metros de agua a metros cúbicos por segundo se realizará mediante la ecuación de Bernoulli, que determina la velocidad de un flujo sobre un determinado punto, afectado por la fuerza de gravedad. Este teorema está determinado por la ecuación:

$$v = \sqrt{2 g \cdot h}$$

Siendo “ g ” la gravedad y “ h ” la altura, en este caso profundidad. El valor resultante de esta ecuación es la velocidad en un determinado punto. Los datos de profundidad introducidos en la ecuación serán las variaciones obtenidas del fluviómetro durante los eventos de inundación. Se seleccionará el mayor aumento de cada uno de los eventos y se introducirá en la ecuación. Las velocidades resultantes se multiplicarán por el área del cauce, medida con la estación total y se obtendrá el caudal en metros cúbicos por segundo para cada profundidad. Con los datos obtenidos de caudal se construirá una curva de descarga que generará una función determinada por el nivel del agua y mostrando como resultado el caudal en metros cúbicos por segundo.

Los datos de caudal serán procesados por hora para poder estandarizarlos con los datos de precipitación. Estos se introducirán en SigmaPlot junto con los de precipitación para realizar una línea de tiempo de la influencia de las precipitaciones en el aumento del nivel del Ocloro. Además de los gráficos para cada una de las inundaciones que serán modeladas en el FLO-2D. Los datos de caudal convertidos a metros cúbicos por segundo serán los datos de entrada en el modelo.

I. 8. 3. Zonificación de las inundaciones

I. 8. 3. 1. Modelado de la distribución espacial y profundidades de las inundaciones

Para la determinación de las zonas inundables de la microcuenca se aplicará el software de modelado hidráulico Flo-2D. Este nos permite realizar simulaciones para conocer la respuesta del río ante un evento de lluvia extrema, según valores de entrada que se obtienen de sensores, como el fluviómetro, estaciones meteorológicas (datos precipitación), de datos históricos de precipitación y de mediciones topográficas del cauce y de las pendientes de la microcuenca. Obteniendo productos como mapas de la amenaza de inundaciones y su zonificación. Según sus utilidades es ideal para la simulación de inundaciones en espacios complejos, como el urbano, ya que toma en cuenta las modificaciones estructurales que presentan las ciudades, además de las modificaciones o reducciones del cauce del río por la infraestructura, lo cual lo hace el modelo ideal para la simulación de inundaciones en la microcuenca del Ocloro, altamente intervenida por infraestructura residencial. En este apartado se simularán diferentes

acontecimientos de inundación para poder determinar la respuesta del río a cada uno, además de dos eventos de inundación con los márgenes modificados para conocer la variación en la velocidad del flujo. Es importante destacar que la Escuela de Geografía, actualmente, posee una licencia para la utilización del software.

Con recorridos a lo largo del cauce se determinarán lugares y sectores donde, por diferentes motivos, el cauce ha sido modificado, entubado, ha sido estrechado o interrumpido por infraestructura y provoca la acumulación de residuos, tanto basura como elementos naturales que provoquen represas artificiales y el desbordamiento de este. Se representará mediante un mapa con la simbología correspondiente.

Cuando se cuenten con todos los datos necesarios para la aplicación del modelo se simularán diferentes inundaciones con el registro de las variaciones en el nivel del caudal durante los eventos de precipitación presentados en la microcuenca, de esta manera se proyectarán zonas inundables y se determinarán cuanta infraestructura sería afectada en los eventos de inundación. Las proyecciones simuladas por el modelo son en formato raster y serán trabajadas y digitalizadas en el software Arcgis para la creación de las zonificaciones de las inundaciones.

1. 8. 3. 2. Modelado de la velocidad del flujo de agua de las inundaciones

Para el modelado de la velocidad con diferente cobertura del suelo en los márgenes se utilizará el coeficiente de variación de Manning, este servirá para determinar la rugosidad de la superficie y la influencia de esta en la velocidad de la inundación. La modificación de la rugosidad se realizará mediante la digitalización de un shape en Arcgis, en este se establecerá una franja de 10 metros a ambos lados del Ocloro, debido a que la Ley Forestal de Costa Rica en el artículo 33, establece esta franja como área de protección de los ríos en zonas urbanas. (Ley N° 7575, 1996).

En la actualidad a lo largo de estos se desarrolla una mezcla de infraestructura y vegetación, siendo mayoritariamente, infraestructura. El shape se digitalizará obviando la infraestructura para homogenizar la cobertura del suelo, esta se establecerá como zona con arbustos y follaje y se le asignará un coeficiente de rugosidad de 0.1, y de 0.2 para los márgenes con infraestructura, el cual se introducirá en el FLO-2D.

CAPÍTULO II. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y FOTOGRAMÉTRICO

II. 1. Descripción geológica de la microcuenca del río Ocloro

La microcuenca del río Ocloro forma parte de la subcuenca del río Tiribí, y a la que su vez es parte de la cuenca del río Grande de Tárcoles, drenando hacia la vertiente del Pacífico. Se desplaza en dirección noreste-suroeste, dentro de la depresión geotectomorfológica central de Costa Rica (Valle Central), conteniendo parte de los territorios administrativos de las municipalidades de Curridabat, Montes de Oca y San José, mayoritariamente, los territorios de los dos últimos cantones.

La microcuenca al ubicarse al este del Valle Central de Costa Rica está asociada a la actividad volcánica del complejo geológico del volcán Irazú. Asentándose sobre la Formación Avalancha Ardiente y sobre lahares procedentes de dicho volcán. Según Denyer y Kussmaul, el Valle Central de Costa Rica está constituido por rocas sedimentarias y volcánicas del Terciario. Sobre las cuales yacen las lavas de las Formaciones Intracañon, los flujos piroclásticos de la Formación Avalancha Ardiente, lavas de la Formación Post-Avalancha y los estratovolcanes complejos de la cordillera Central. (2000). En el sitio de estudio existe un posible frente de colada que ha desviado el curso del río hacia el sur, la migración progresiva del curso fluvial ha generado una terraza aluvial de un espesor desconocido, precisamente en esta terraza aluvial colindante con el frente de colada es donde ocurren las inundaciones

La microcuenca se asienta sobre un solo flujo piroclástico de aproximadamente 500 kilómetros cuadrados y 25 kilómetros cúbicos de volumen (Kussmaul, 1988), ubicados sobre la Formación Intracañon, el cual determina una geomorfología plana con algunos cerros de pequeña altitud, estos cerros pueden ser interpretados como coladas o formas asociadas. Específicamente en la microcuenca en estudio y sus alrededores, Echandi (1981), menciona que se encuentran colinas de materiales detríticos de origen volcánico.

La geología es un gran determinante de las características topográficas de un determinado espacio y estas características inciden en la ocurrencia y severidad de

las inundaciones. La geología asociada a la microcuenca del Ocloro manifiesta una geomorfología plana con poca variación altitudinal desde el inicio de la microcuenca, a los 1237 m.s.n.m hasta la zona de desfogue del Ocloro, en los 1132 m.s.n.m.

II. 2. Descripción del cauce del río Ocloro

Este río nace en la comunidad de Calle Siles, en Curridabat, donde inicia su recorrido hasta desaguar en el río María Aguilar en el distrito Catedral del cantón de San José, quedando atrapado y cubierto por la mancha residencial de los barrios del sur de Montes de Oca y este de San José. Según López, para el año de 1978 el 90% del territorio poseía infraestructura que impermeabilizaba el suelo y el 25% de los márgenes del Ocloro poseía algún tipo de construcción (1978), provocando que no hubiese áreas para la infiltración del agua de lluvia y la totalidad de la misma drenara hacia el río.

La falta de zonas de infiltración y las modificaciones que ha sufrido el cauce por la construcción de infraestructura civil y residencias ha provocado que se empiece a desbordar el Ocloro en un sector específica de la microcuenca, barrio Luján, sitio donde el cauce presenta las mayores modificaciones. Estas se pueden observar en la Ilustración 5, lugar donde se llevaron a cabo las mediciones del canal y parte del modelado de las inundaciones mediante el FLO-2D. Aunque esta Ilustración muestra una pequeña porción de la microcuenca, el mismo patrón de urbanización se presenta en el resto de la misma, como consecuencia del irrespeto a la ley N° 7575 que regula el uso del suelo en los márgenes de los ríos. (Estudios y Proyectos S. A., 1978).

El cauce del río Ocloro presenta aluviones de composición andesítica angulares entre los 20 centímetros y 1 metro, con una forma rectilínea en casi la totalidad de su recorrido. El río en la mayoría de su desplazamiento tiene secciones encañonadas con profundidades entre 1 metro y 3 metros.

II. 3. Modificación histórica del cauce del río Ocloro

El cauce del Ocloro ha sido modificado severamente para la construcción de infraestructura civil, alterando en gran parte el flujo natural del río y provocando que se desborde en algunas zonas de la microcuenca. Estas modificaciones han respondido a procesos de urbanización de la zona este de San José y a la necesidad de la industria de Lácteos Dos Pinos para la utilización de las propiedades por donde este se desplazaba de manera natural. Estas modificaciones en el Ocloro se han desarrollado a través de los años, específicamente, en la parte del cauce que recorre barrio Luján.

La imagen “a” de la Ilustración 6, muestra el trazado del Ocloro en el año 1945, donde no había sufrido ninguna modificación antropogénica significativa y no se presentaban inundaciones en la zona mencionada. Para el año de 1963 (imagen “b”), se muestran las primeras modificaciones en el cauce para la construcción de infraestructura industrial y residencial. La modificación obedece al retiro del río hacia el sur para tener mayor disposición de terreno para la construcción; fue llevada a cabo por la industria de lácteos Dos Pinos, la cual desplazó el río de la zona central de la propiedad y empezó con la construcción de infraestructura industrial y residencial para los empleados, atrapando al Ocloro dentro de concreto.

En los estudios consultados sobre la microcuenca no se menciona el responsable de las modificaciones del cauce en esta zona, pero las personas que han vivido en el barrio y han sido afectadas por las recurrentes inundaciones, conocen al detalle sobre la historia y las modificaciones del río Ocloro.

En la entrevista con la directora del Comité Comunal de Emergencias de Barrio Luján, la señora Rutbeth Ávila Alpízar, nos resume el proceso de modificación del Ocloro, dicha empresa “compra terrenos ubicados en las dos márgenes del río: por calle 25 y avenida 18. Entre 1960 y 1963 construyó varias casas para los empleados de la planta de leche y la caldera. Empieza a expandir el terreno ubicado al norte del río, remueve el cauce del río unos 5 metros hacia el sur, provocando que la

rivera sur, donde estaban las casas recién construidas, se gastara en los siguientes años de inundaciones” (Ávila, comunicación personal, 13 de setiembre del 2018).

En el año 1970 (imagen “c”), se puede apreciar la mayor modificación al cauce, este pasa de tener un recorrido natural hacia uno modificado y atrapado dentro de construcciones civiles. El cauce es retirado en su totalidad del terreno de dicha empresa y entubado en una bóveda de cemento, en línea recta en el margen este de la propiedad, en paralelo a la calle 23, y con movimientos artificiales en el flujo del agua. Para el año de 1976 (imagen “d”), el cauce del río Ocloro presenta todas las modificaciones que ha sufrido hasta la actualidad, entubado en una bóveda de cemento en la parte superior e inferior contiguo a la calle 23 y en el sector que recorre la otra propiedad de la Dos Pinos, contiguo al lado este de la calle 25.

II. 4. Levantamiento fotogramétrico con el RPAS

La utilización de RPAS en ambientes urbanos permite la obtención de información compleja a bajo costo, esta tecnología permite analizar dinámicas territoriales complejas relacionadas a la gestión del riesgo, en este caso era esencial la obtención de datos de alta resolución topográficos, ya que la dinámica hidráulica de los canales se basa en gran parte de la información de elevaciones y obstáculos que alteren el recorrido del agua. En algunos sectores del río Ocloro no se tuvo acceso para realizar mediciones directas o para conocer el recorrido del río, utilizar drones permitió obtener información con alta resolución espacial de gran relevancia para conocer los alcances de las inundaciones, como lo dicen los autores, las inundaciones urbanas requieren de topografía de muy alta resolución; Ozdemir, Sampson, de Almeida & Bates, “small scale features which have significant impact on the flood propagation and especially surface water flooding in urban environments” (2013, pág. 16).

El levantamiento fotogramétrico se realizó los días 9 de setiembre del año 2018 y el 22 de febrero del 2019, aproximadamente a las 8:00 am ambos vuelos. Previamente se planificó el recorrido por medio del software Pix4d, donde se definió la zona de barrido del RPAS para la captura de pares estereoscópicos que se

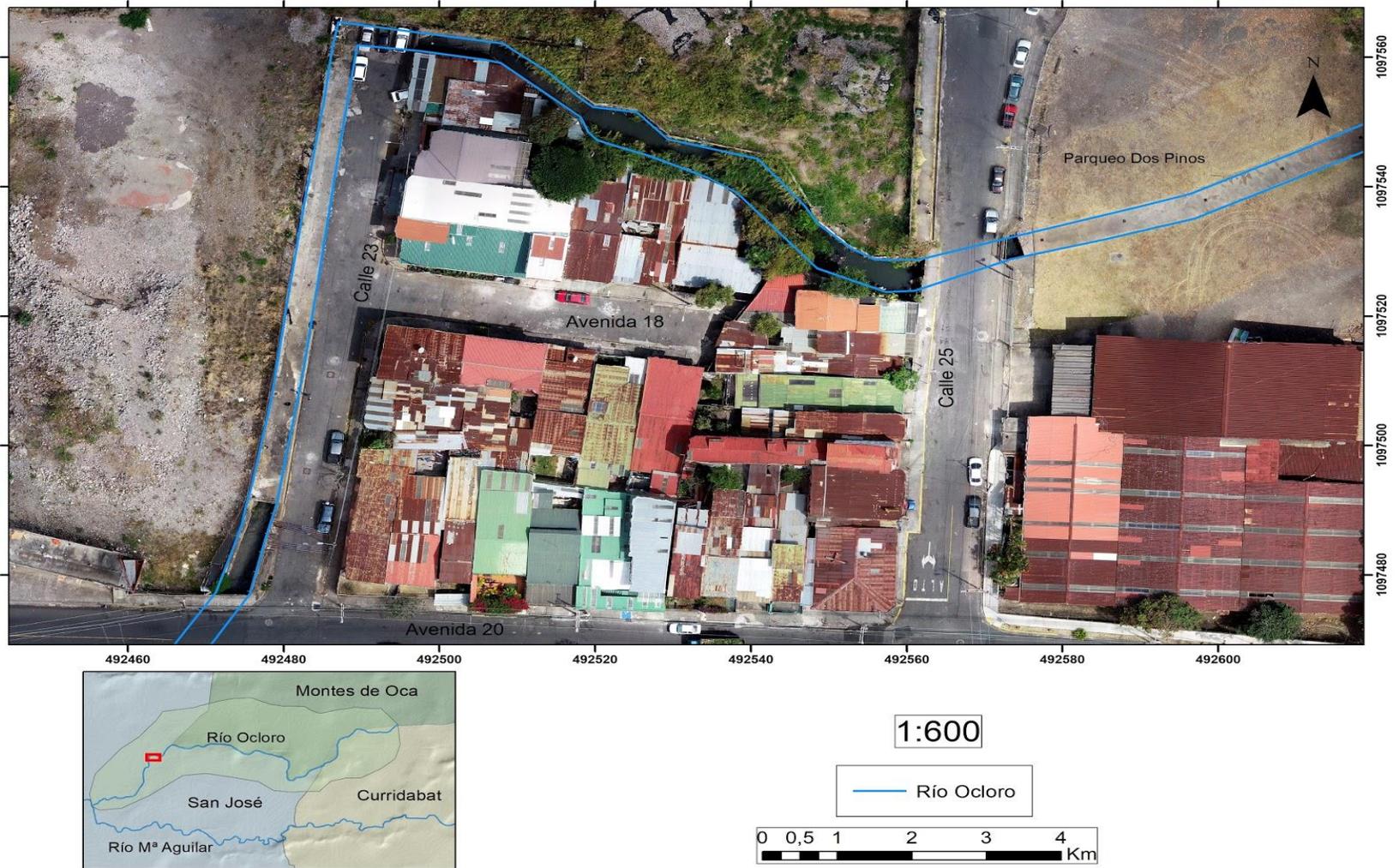


Ilustración 5: Todo el sector que es afectado por las inundaciones en la microcuenca del río Ocloro, barrio Luján, San José

georreferenciaron, automáticamente se georreferenciaron usando el GPS y demás instrumentos. El levantamiento fotogramétrico de alta resolución permitió obtener productos digitales esenciales que son la base de entrada del modelo hidráulico bidimensional, tanto para el modelado como para la interpretación de las inundaciones simuladas.

De los vuelos realizados se creó un ortomosaico con 172 imágenes georeferenciadas, un modelo digital de elevación y curvas de nivel, ver Ilustración 6. Los parámetros utilizados en la captura de la información espacial del RPAS, Dji Phantom 4 pro, se pueden observar en el cuadro 1.

| | |
|---|----------|
| Cantidad de imágenes | 172 |
| Resolución ortomosaico (cm/pixel) | 2,68 |
| Resolución DEM (cm/pixel) | 5,36 |
| Densidad nube puntos (puntos/m ²) | 476,83 |
| Area (m ²) | 214239,4 |
| Altura max (msnm) | 1106 |
| Altura mínima (msnm)) | 1067 |
| Altitud vuelo (m) | 120 |

Cuadro 1:Parámetros de la captura de las imágenes y del ortomosaico generado a partir de estas

II. 4. 1. Procesamiento del levantamiento fotogramétrico de alta resolución

A partir de las imágenes digitales se construyeron los productos fotogramétricos necesarios para la aplicación del modelo FLO-2D y el análisis de las inundaciones, mediante el software Agisoft Photoscan 10.1.0.

Las imágenes digitales tomadas por el RPAS fueron inicialmente alineadas e incorporados los puntos de control tomados en campo, posterior a la alineación de las fotografías digitales se generaron puntos de amarre entre los pares

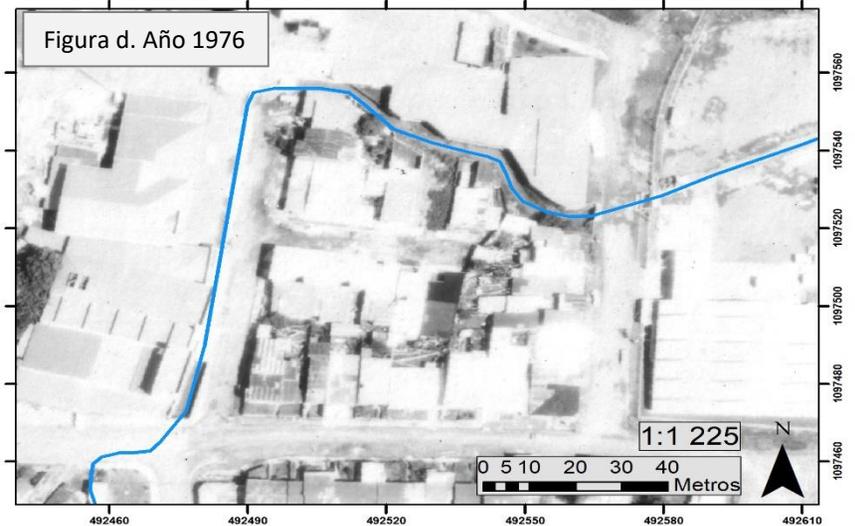
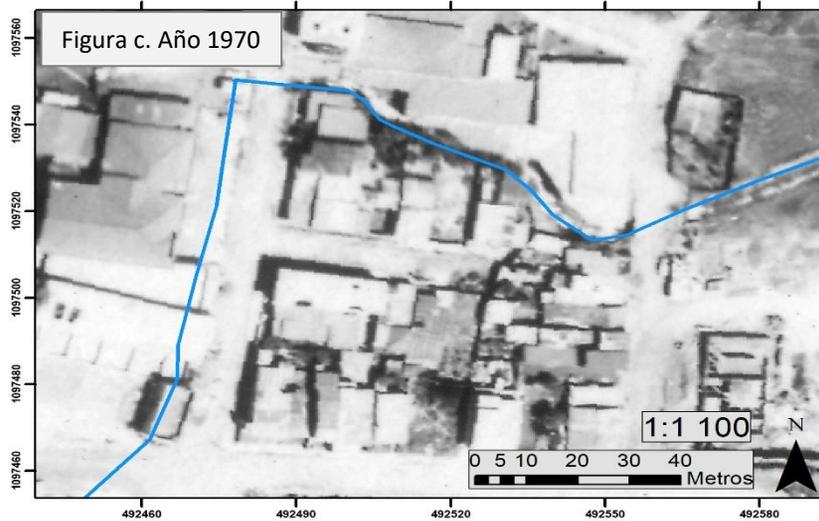
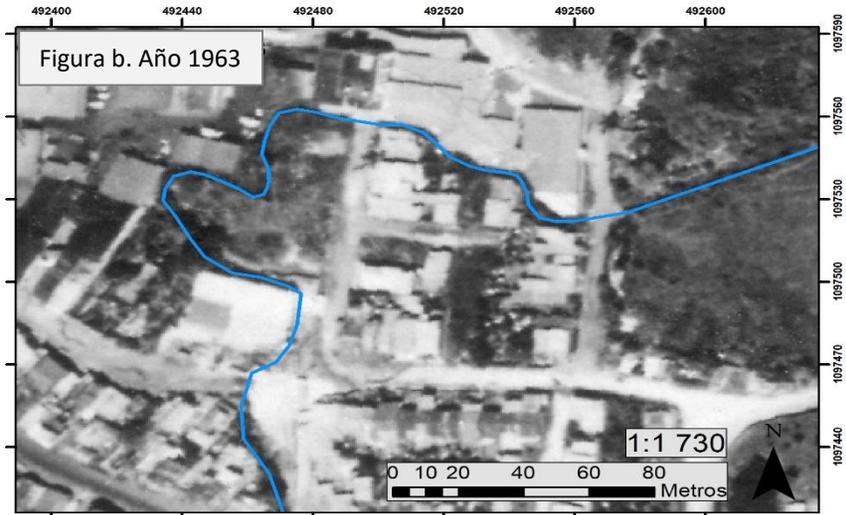
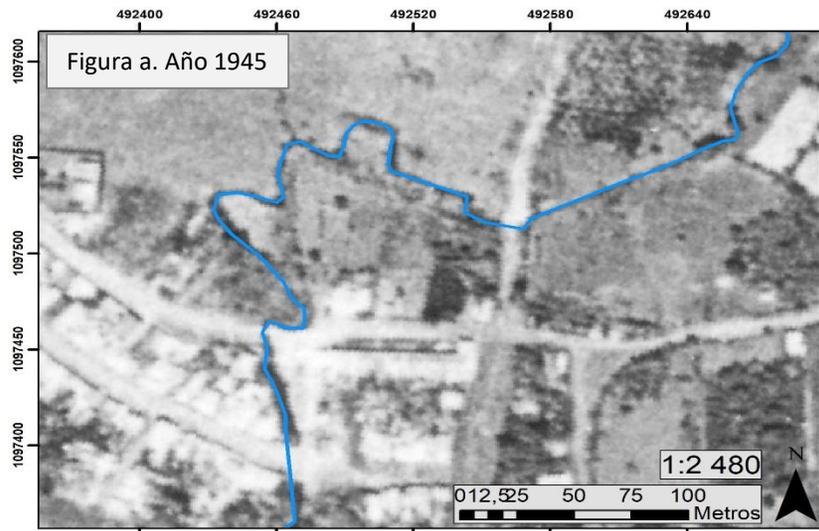


Ilustración 6: Fotografías aéreas de la modificación del cauce del Ocloro a través de los años en el sector de la microcuenca que se inunda. Fuente: Instituto Geográfico Nacional

estereoscópicos para generar la nube de puntos de baja densidad. Posteriormente se genera la nube de puntos densificada con la máxima resolución posible.

La clasificación de la nube de puntos fue enfocada a separar elementos de superficie como vegetación, vehículos, infraestructura del terreno, el modelo de elevación de terreno es un insumo primordial para la modelación de flujos hidráulicos en el FLO-2D esto porque los escenarios de lluvia simulados dependen directamente de los caminos preferenciales de flujo controlados por la topografía y otras variables, tal como lo explica López, 2012 “este es un modelo de conservación de volumen, que transporta el volumen de inundación a través de celdas en el caso de flujo superficial o por medio de segmentos de corriente por la ruta que sigue el canal”.

La construcción de un modelo digital de elevación con alta resolución espacial es primordial para la modelación y simulación de eventos lluvia que generaron inundaciones, como lo citan los autores Alrajhi, Mudasir-Khan, Afroz Khan y Alobeid, “hydrological applications of digital elevation models have recently become an important factor in determining the runoff response to rainfall is topography. Spatially hydrological modeling takes this factor into account through the use of DEM” (2016, pág. 3). El DEM utilizado como base para el modelado hidráulico se puede observar en la Ilustración 8.

Los tres productos generados que se observan en la Ilustración 7 son fundamentales para la modelación y análisis de las inundaciones. El ortomosaico nos permitió contabilizar la cantidad de infraestructura y residencias afectadas por las inundaciones modeladas y la extensión del flujo. Las curvas de nivel nos permitieron identificar la variedad altitudinal del terreno y como este afecta la velocidad, dirección y concentración del flujo del agua al desplazarse por las diferentes pendientes.

II. 5. Medición del cauce del río Ocloro

La medición del cauce se realizó mediante una estación total topográfica con un único estacionamiento, estos puntos de control fueron incorporados en la construcción del modelo de elevación en el procesamiento fotogramétrico, ver la Ilustración 9, que permitió la medida a lo largo, ancho y la profundidad del canal. Solamente se midió el canal paralelo a la calle 23 debido a que el tramo del cauce ubicado al este de la calle 25 es una propiedad privada y el sector entre las dos calles por las condiciones físicas imposibilitaba la medición.

El canal de entubamiento tiene de ancho 3 metros y 2,65 metros de profundidad en la sección norte, donde inicia, aquí realiza un giro en 90 grados y continua en un canal con concreto en la parte inferior y superior de 90 metros de largo. La zona de finalización del canal tiene de ancho 3,10 metros y de profundidad 2,05 metros. Estos datos fueron introducidos al FLO-2D ya que este modela sobre canales artificiales.

El levantamiento fotogramétrico y topográfico fueron insumos esenciales para la calibración y la simulación hidráulica del río Ocloro, uno de los insumos esenciales para los modelos hidrológicos bidimensionales es un archivo que represente la topografía para la transmisión de flujos en la superficie. El levantamiento de información topográfica y de estructuras dio nuevos insumos para la interpretación del entorno urbano, la alta resolución de los datos permitió ver detalles importantes de las cuencas urbanas.

La información topográfica también mostró nuevas perspectivas respecto al origen de las inundaciones del río Ocloro; posiblemente una combinación de aspectos geomorfológicos locales y un mal manejo del entorno fluvial. Esta discusión se retoma en las conclusiones.

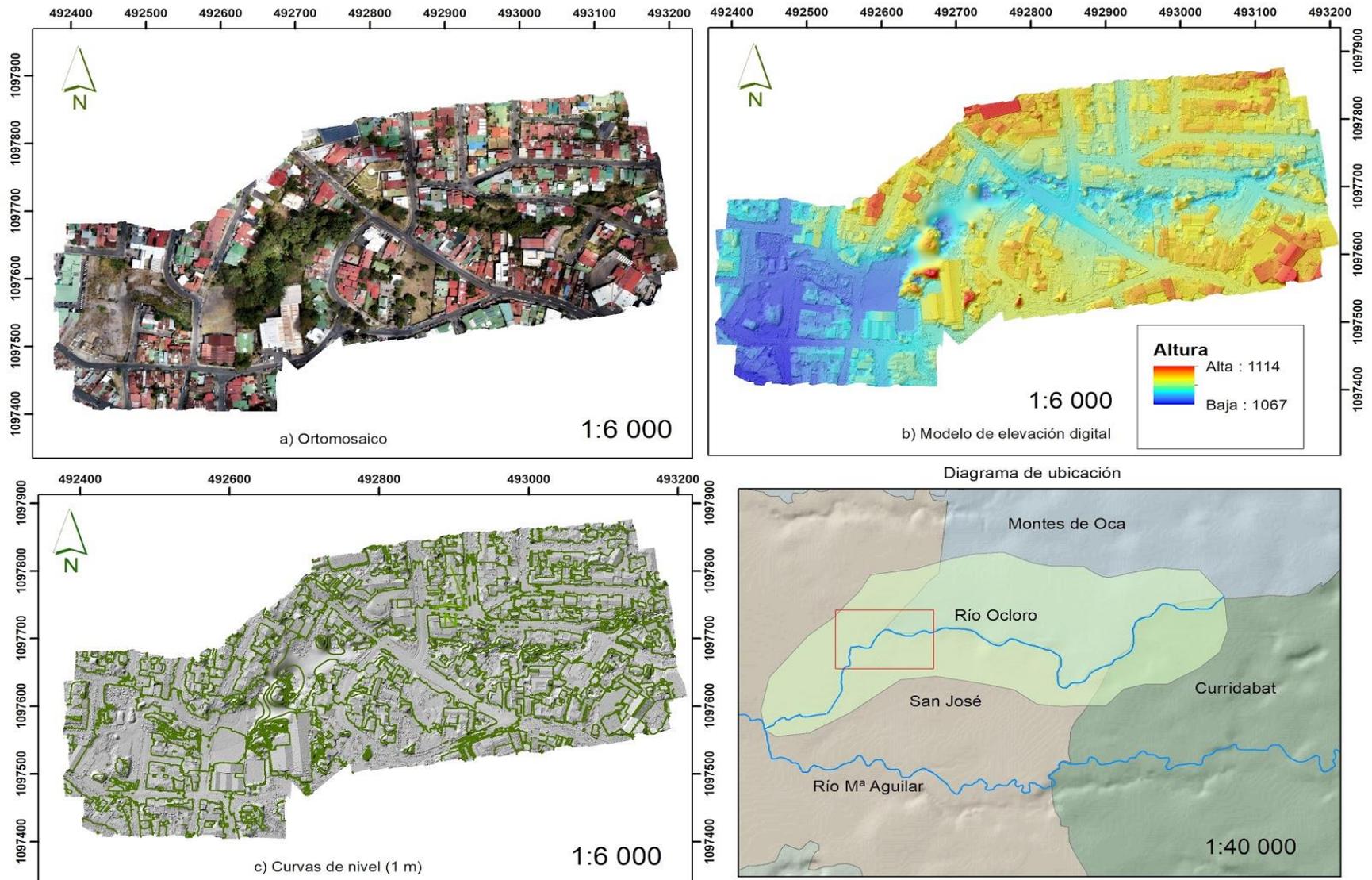


Ilustración 7: Ortomosaico, modelo de elevación digital y curvas de nivel generadas a partir de los vuelos con el RPAS e introducidos al modelo Flo-2d

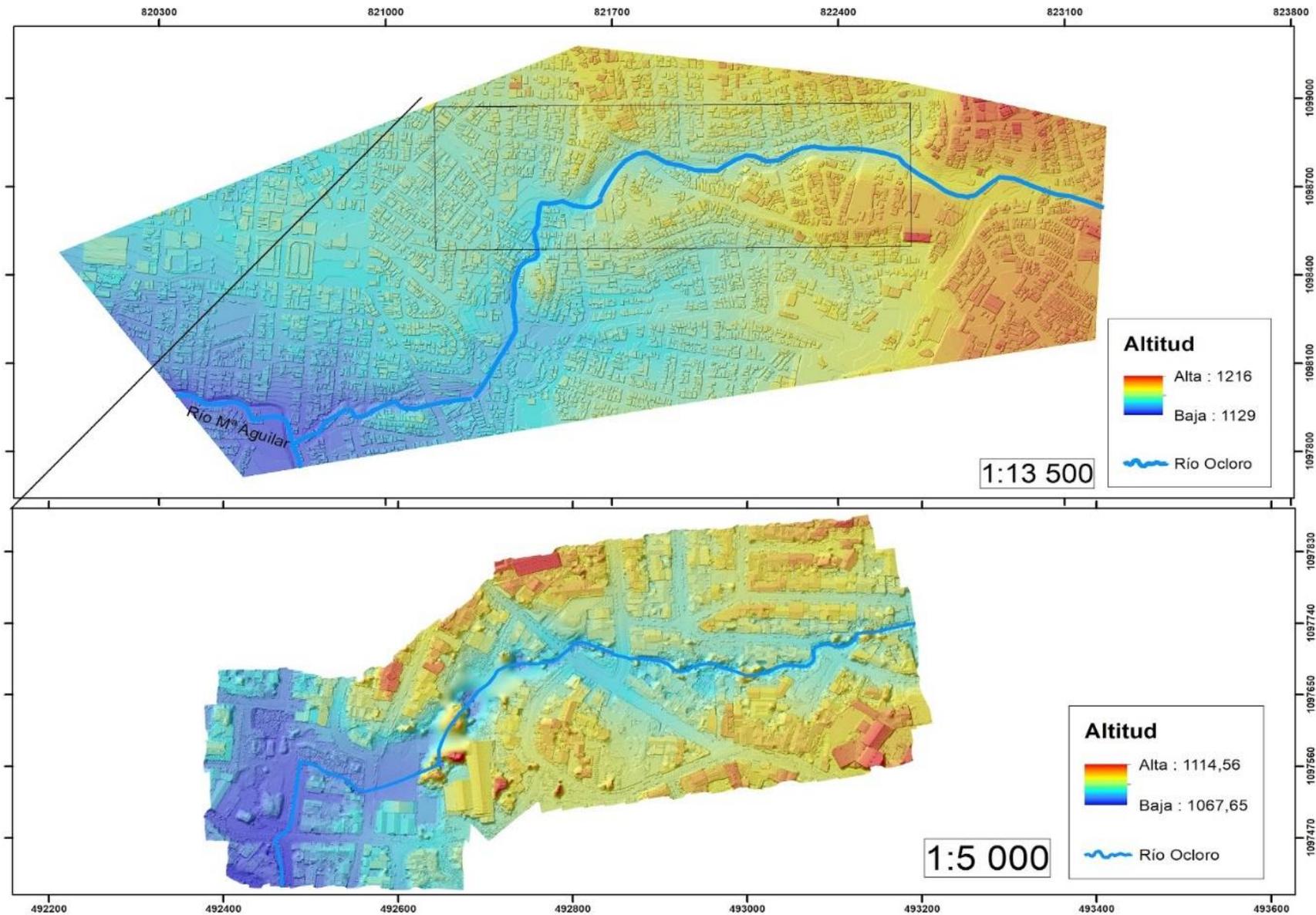


Ilustración 8: Modelo digital de elevaciones utilizado en el modelado de las inundaciones por parte del Flo-2d



Ilustración 9: Sitio de estacionamiento de la estación total topográfica para la medición del entubamiento del cauce del Ocloro, barío Luján

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

III. 1. Descripción climática de la Microcuenca del río Ocloro

La microcuenca del río Ocloro se ubica climáticamente en el régimen del Pacífico, presentando una época seca y época lluviosa bien definidas. La época lluviosa se extiende desde mayo hasta octubre, siendo los meses de setiembre y octubre los más lluviosos debido a la influencia de los vientos Monzónicos y las brisas marinas. Los meses más secos dentro de la estación de lluvias, son julio y agosto, por la mayor fuerza de los vientos alisios en esta época. Este régimen es afectado por la Zona de Convergencia Intertropical. (IMN, 2019)

La microcuenca presenta dos máximos de lluvias al año, el primero es durante los meses de mayo y junio, con una precipitación diaria promedio entre los 45 a 50 milímetros y un segundo máximo entre los meses de setiembre y octubre registrándose en promedio de 50 a 55 milímetros en un día. Los regímenes de lluvia en la microcuenca se presentan mayoritariamente en horas de la tarde, desde las 12:00 pm hasta las 4:00 pm, prolongándose en ocasiones hasta las 6:00 pm (Solano & Villalobos, 2017).

Se presenta en la microcuenca una humedad relativa promedio mensual de 85%, con un brillo solar de 4.5 a 5.5 horas promedio anual. La temperatura promedio es de 18 grados centígrados y la mínima oscila entre los 12.5 y 15.5 grados centígrados. (IMN, 2019) (Solano & Villalobos, 2017).

III. 2. Medición de los datos de caudal del río Ocloro

El registro de datos de caudal se realizó desde mayo del 2018 hasta agosto de ese mismo año. Se había pensado registrar durante toda la época lluviosa, pero debido a problemas con la batería del sensor se discontinuó la medición. Los datos de caudal se registraron con el fluviómetro Hobo, el cual se colocó en el margen izquierdo del río Ocloro, en un sitio con las características idóneas para la obtención

de datos de caudal, con pocos obstáculos en su flujo, poca turbulencia y accesibilidad, el cual se puede ver en la Ilustración 10.

Las mediciones fluviométricas fueron tomadas con una resolución de 5 minutos para observar la respuesta del río a los diferentes eventos de precipitación y conocer cuánto tiempo después del inicio de la lluvia se presenta un aumento en el caudal. Estos se promediaron para obtener un valor por cada hora para poder compararlos con los datos de precipitación que fueron utilizados a partir de la estación del CIGEFI UCR.

Las variaciones de caudal y precipitación fueron analizadas estadísticamente para conocer el comportamiento del río en términos de su respuesta precipitación-caudal, duración, intensidad, extensión de las profundidades y velocidades de inundación. Las mediciones fluviométricas son un marco de datos clave para la calibración del modelo hidráulico, es fundamental determinar los tiempos de respuesta del río para una gestión del riesgo acorde al territorio. La Ilustración 15 muestra el comportamiento de las mediciones hidrometeorológicas, es evidente la inmediata respuesta del río a eventos de precipitación.



Ilustración 10: Fluviómetro utilizado para la obtención de los datos de caudal, tubo en el cual se introdujo para realizar las mediciones y sitio de ubicación del sensor en el río Ocloro

El sensor fluviométrico detecta las variaciones de la columna de agua a través del tiempo a partir de mediciones de presión, cuando aumenta la presión sobre el sensor detectará un aumento de la columna de agua. Los valores los registra en libra por pulgada cuadrada (psi, siglas en inglés). Estos valores de presión fueron transformados a caudal en metros cúbicos por segundo para la calibración y ejecución del modelo hidráulico.

III. 2. 1. Conversión de metros de columna de agua a metros cúbicos por segundo

Para la conversión de los datos de metros de columna de agua a metros cúbicos por segundo se utilizó la ecuación de Bernoulli (Krishnaswamy, 2019). Las mediciones que se pueden observar en el cuadro 2. Con los datos de caudal obtenidos se construyó la curva de descarga, ver Ilustración 11, que relaciona los datos de caudal (m^3/s) con profundidades (m) y genera una regresión que toma el valor del caudal como una variable que depende del valor de la profundidad. El valor de la regresión fue de

$$y = 13,288x^{1,5}$$

siendo “y” el caudal y “x” las profundidades. Esta regresión se utilizó para cada uno de los valores de profundidad y se convirtieron los datos de metros de columna de agua a metros cúbicos por segundo.

| Fecha | Profundidad (m) | Ancho Cauce (m ²) | Velocidad Bernoulli (m/s) | Caudal estimado (m ³ /s) |
|------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 10/10/2018 11:45 | 0,12 | 3 | 1,53 | 0,55 |
| 20/6/2018 13:00 | 0,545 | 3 | 3,27 | 5,35 |
| 21/6/2018 17:00 | 0,85 | 3 | 4,08 | 10,41 |
| 13/7/2018 22:00 | 1,31 | 3 | 5,07 | 19,92 |
| 14/7/2018 06:00 | 0,64 | 3 | 3,54 | 6,80 |
| 29/7/2018 15:00 | 0,73 | 3 | 3,78 | 8,29 |
| 4/7/2018 06:00 | 0,43 | 3 | 2,90 | 3,75 |
| 9/8/2018 05:00 | 0,54 | 3 | 3,25 | 5,27 |
| 1/8/2018 04:00 | 0,46 | 3 | 3,00 | 4,15 |
| 2/8/2018 02:00 | 0,76 | 3 | 3,86 | 8,80 |
| 3/8/2018 05:00 | 0,27 | 3 | 2,30 | 1,86 |
| 4/8/2018 04:00 | 0,35 | 3 | 2,62 | 2,75 |
| 24/5/2018 05:00 | 0,61 | 3 | 3,46 | 6,33 |
| 24/5/2018 04:00 | 0,41 | 3 | 2,84 | 3,49 |
| 24/5/2018 03:00 | 0,39 | 3 | 2,77 | 3,24 |
| 16/5/2018 05:00 | 0,64 | 3 | 3,54 | 6,80 |
| 16/5/2018 04:00 | 0,29 | 3 | 2,39 | 2,08 |

Cuadro 2: Datos de profundidad utilizados para el cálculo de caudal y curva de descarga

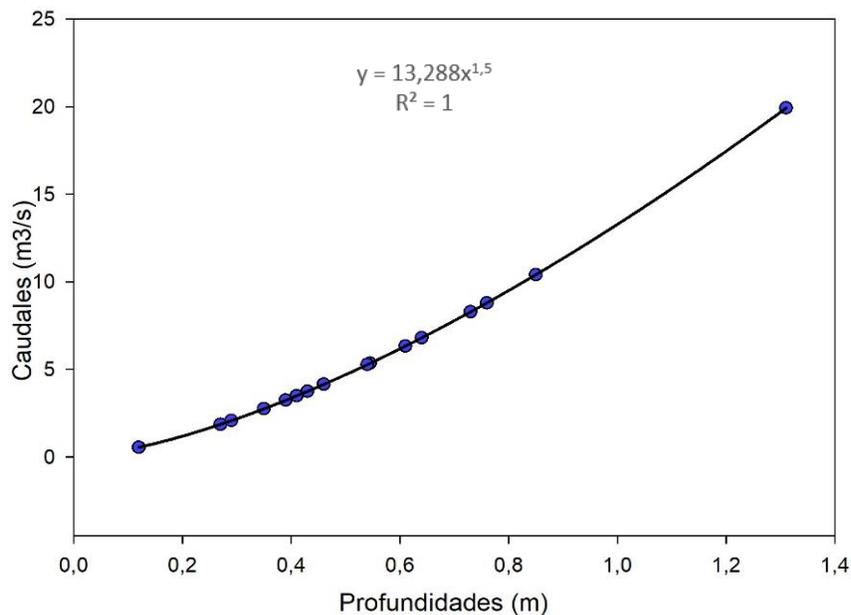


Ilustración 11: Curva de descarga utilizada para la conversión de metros de columna de agua a metros cúbicos por segundo

III. 3. Medición de los datos de precipitación del río Ocloro

Se intentó colocar una estación meteorológica en la cuenca de estudio, pero por razones de mantenimiento y seguridad del equipo, fue descartado el sitio de medición en la cuenca. Se utilizó la estación de CIGEFI-UCR para la recolección de datos de precipitación ver Ilustración 13. Aunque se encuentra fuera del área de la microcuenca, por las características geográficas y climáticas de la región se pueden generalizar los registros.

III. 4. Análisis hidrometeorológico

Durante el registro de las variaciones en el nivel del Ocloro, del 19 de mayo al 24 de agosto del 2018, se registraron 2329 datos de caudal, presentándose 154 variaciones superiores al caudal típico del río, 1,15 metros cúbicos por segundo, valor de mayor ocurrencia registrando en condiciones sin precipitación. En promedio el aumento del caudal fue de 3,36 metros cúbicos por segundo superiores al caudal típico mencionado anteriormente, con una desviación estándar de 0,369 metros cúbicos por segundo.

De las 154 variaciones en el nivel del Ocloro, solamente un conjunto de 6 generó inundaciones. El valor mínimo observado que provocó una inundación sucedió el 24 de mayo del 2018, con un incremento en el nivel del agua de 4,83 metros cúbicos por segundo. Este valor mínimo no se puede generalizar ni establecer que un aumento superior a este nivel de agua generará inundaciones debido a que se registraron valores superiores sin que el río se saliera del cauce, por lo que es difícil establecer un nivel fijo al que se desborda, siendo influenciado por la magnitud, intensidad y duración de las precipitaciones, además de elementos antrópicos como la basura presente en el cauce. El valor máximo registrado fue el 13 de julio del 2018 donde se presentó un aumento del caudal de 18,31 metros cúbicos por segundo. En este evento el río inundó las avenidas 14 y 18 y la calle 23.

El promedio de crecida del Ocloro durante las 6 inundaciones fue de 4,98 metros cúbicos por segundo con una desviación estándar de 2,18 metros cúbicos por segundo. En promedio las precipitaciones que provocaron estas avenidas duraron

entre 7 y 8 horas, con excepción del evento con mayor aumento del caudal que duró 14. La respuesta del río a las precipitaciones se presentó aproximadamente una hora después, esto se puede determinar con los valores máximos de precipitación y de caudal, ver en la Ilustración 15, donde el pico máximo de precipitación provoca el aumento máximo en el caudal posterior a una hora desde que se registra en la estación.

Las inundaciones en promedio duraron de una a dos horas, observándose después del incremento máximo de caudal una disminución paulatina del agua hasta llegar a las condiciones normales del Ocloro, durante las dos horas siguientes, con excepción del evento del 24 de mayo, de menor intensidad que se prolongó durante aproximadamente cuatro horas.

La intensidad máxima de precipitación se registró durante la inundación del 13 de junio, con un valor de 31.6 mm/h, y la intensidad mínima de precipitación que generó una inundación, la del 24 de mayo, la inundación con menor aumento del nivel, ocurrió con aguacero de 22.6 mm/h. El promedio de precipitación horaria durante los 6 eventos de inundación fue de 5.67 mm/h con una desviación estándar de 8.75 mm/h. Además, es importante rescatar que, para la inundación del 13 de julio, la de mayor aumento en el nivel del Ocloro, en dos horas cayeron 45.2 mm.

En la Ilustración 15, se observa la relación entre las precipitaciones y el nivel del agua del Ocloro durante el tiempo de registro de datos, mostrando que la mayoría de eventos de precipitación presentados en la microcuenca modifican el nivel del río, debido, principalmente, a como lo señalan los autores Slater & Villarini, “the development of buildings, roads and other infrastructure increases the fraction of impervious land, thereby reducing infiltration and heightening runoff, so floods are larger and peak more rapidly” (2017, pág. 2), problema que experimenta la microcuenca.

En esta misma Ilustración se muestran los niveles de lluvia y caudal en metros cúbicos por segundo para los eventos seleccionados para el modelado hidráulico.

III. 5. Caudal antrópico

En condiciones normales, sin presencia de precipitaciones, el Ocloro presenta un caudal típico de 1,15 metros cúbicos por segundo, diariamente el caudal del río

Ocloro varía horariamente a través del día. La información fluviométrica mostró una variación del caudal del río por incorporación de aguas residuales en la cuenca. El día que se utilizó para ejemplificar las variaciones acontecidas en el caudal fue el 28 de mayo del 2018, se seleccionó este debido a que no se presentó precipitaciones durante ninguna hora del día. Durante la mañana entre las 6:00 am y 10:00 am hay un incremento del caudal del río. Este disminuye entre las 11:00 am y 5:00 pm. Esta variación horaria se debe a un fenómeno que describimos como caudal antrópico. Este caudal es causado por el pobre tratamiento de las aguas residuales en la cuenca, existe prácticamente una conexión directa entre los tanques de tratamiento (tanque séptico) y el río Ocloro.

El comportamiento social de los habitantes de la cuenca repercute en el caudal del río Ocloro, durante horas laborales, horarios educativos como escuelas y colegios los registros fluviométricos muestran una disminución de 0,15 metros cúbicos por segundo en el caudal típico.

Las variaciones diarias del caudal en el río Ocloro sin eventos de precipitación son una evidencia de la conectividad de las aguas residuales de la cuenca con el sistema de drenaje.

Las aguas están llegando al río de forma no tratada y velozmente al punto de modificar el caudal del río, dando a un régimen “antrópico”. Un punto de discusión importante en la hidrología urbana de Costa Rica, la conectividad de las aguas no tratadas en el sistema fluvial. Esta investigación muestra un importante resultado; la conectividad entre las aguas contaminadas y el río Ocloro. Aún en ausencia de eventos de precipitación el río Ocloro tiene variaciones en su caudal.

Resumiendo, el comportamiento habitual del río sin eventos de precipitación; En promedio el Ocloro presenta un caudal de 1,27 metros cúbicos por segundo, con una desviación estándar de 0,0123 metros cúbicos por segundo, los valores se concentran muy cerca del promedio. El mayor aumento del caudal sin eventos de precipitación, causado por caudal antrópico es de 1,42 metros cúbicos por segundo a las 21:00 del 28 de mayo del 2018, fue un incremento de 0,15 metros cúbicos por segundo. Durante el pico de la mañana el mayor aumento se presenta a las 10:00 con un valor de 1,36 representando un aumento de 0,09 metros cúbicos por

segundo. El menor caudal en el Ocloro se desarrolla a las 4:00 donde no es afectado por ningún drenaje, posiblemente por una menor actividad de la población que implica un menor consumo de agua.

Los datos recolectados de alta resolución respecto a la variación de caudal en el río muestran una alta conectividad de las actividades sociales con el sistema fluvial, diariamente varía el caudal del río por consumo de agua potable, para actividades diarias de la población, esto siendo una evidencia de la grave situación de la cuenca en términos de transmisión de caudales por impermeabilidad y transporte de contaminantes y sedimentos por falta de gestión de aguas residuales.

El caudal antrópico es un hallazgo científico importante para entender el comportamiento hidrológico de las cuencas urbanas, la cantidad de agua que fluye en las cuencas urbanas de la GAM es desconocida, posiblemente exista una intrínseca relación entre el comportamiento social de los habitantes de la cuenca y las micro variaciones de caudal en los ríos de la GAM, esto partiendo de sistemas



Ilustración 12: Sitio de colocación del fluviómetro en el río Ocloro para la medición de los datos de caudal

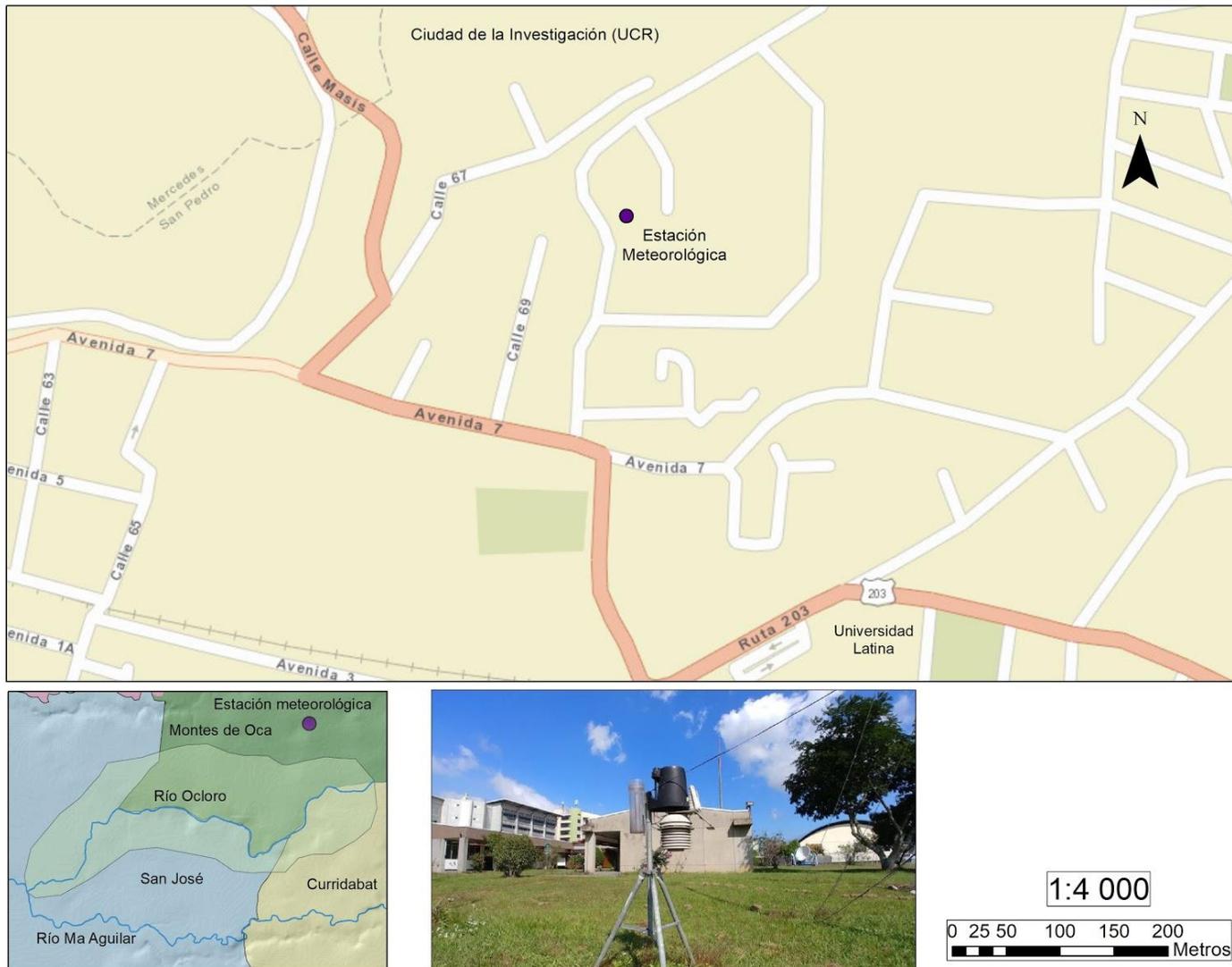


Ilustración 13: Ubicación de la estación meteorológica del CIGEFI utilizada para el registro de los datos de precipitación

de tratamiento similares e incluso condiciones biofísicas parecidas.

La hidrología urbana en Costa Rica carece de suficientes publicaciones para tener un entendimiento integral que permita reducir la incorporación de contaminantes a los océanos. Las variaciones de caudal antrópicas nos llevan a reflexionar sobre la posible incorporación de contaminantes en estado disuelto o suspendido que ocurren diariamente en el sistema fluvial urbano. La Ilustración 14 muestra como las variaciones ocurren de forma horaria cíclica, posiblemente por el comportamiento social de los habitantes de la cuenca que aumentan o disminuyen el consumo de agua.

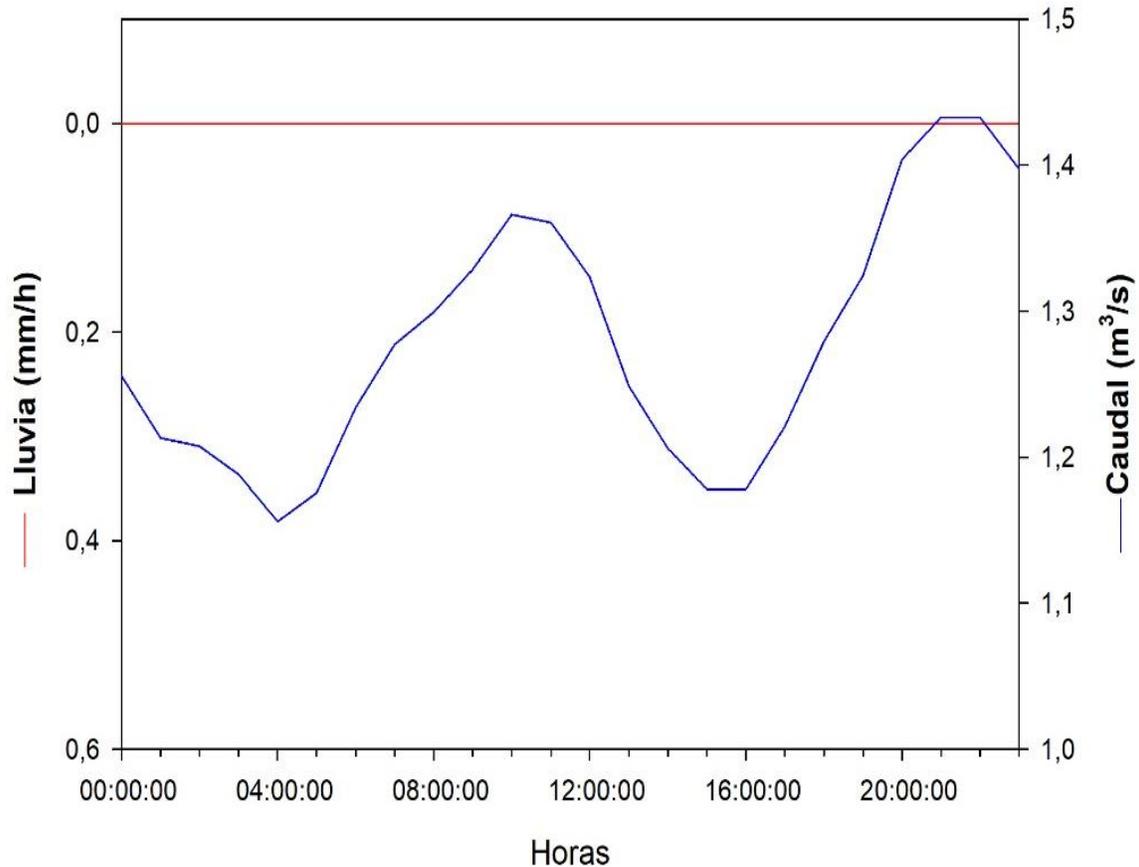


Ilustración 14: Gráfico de variación horaria típica en el caudal de río Ocloro, en días sin lluvias, como consecuencia de los aportes de aguas residuales de uso humano

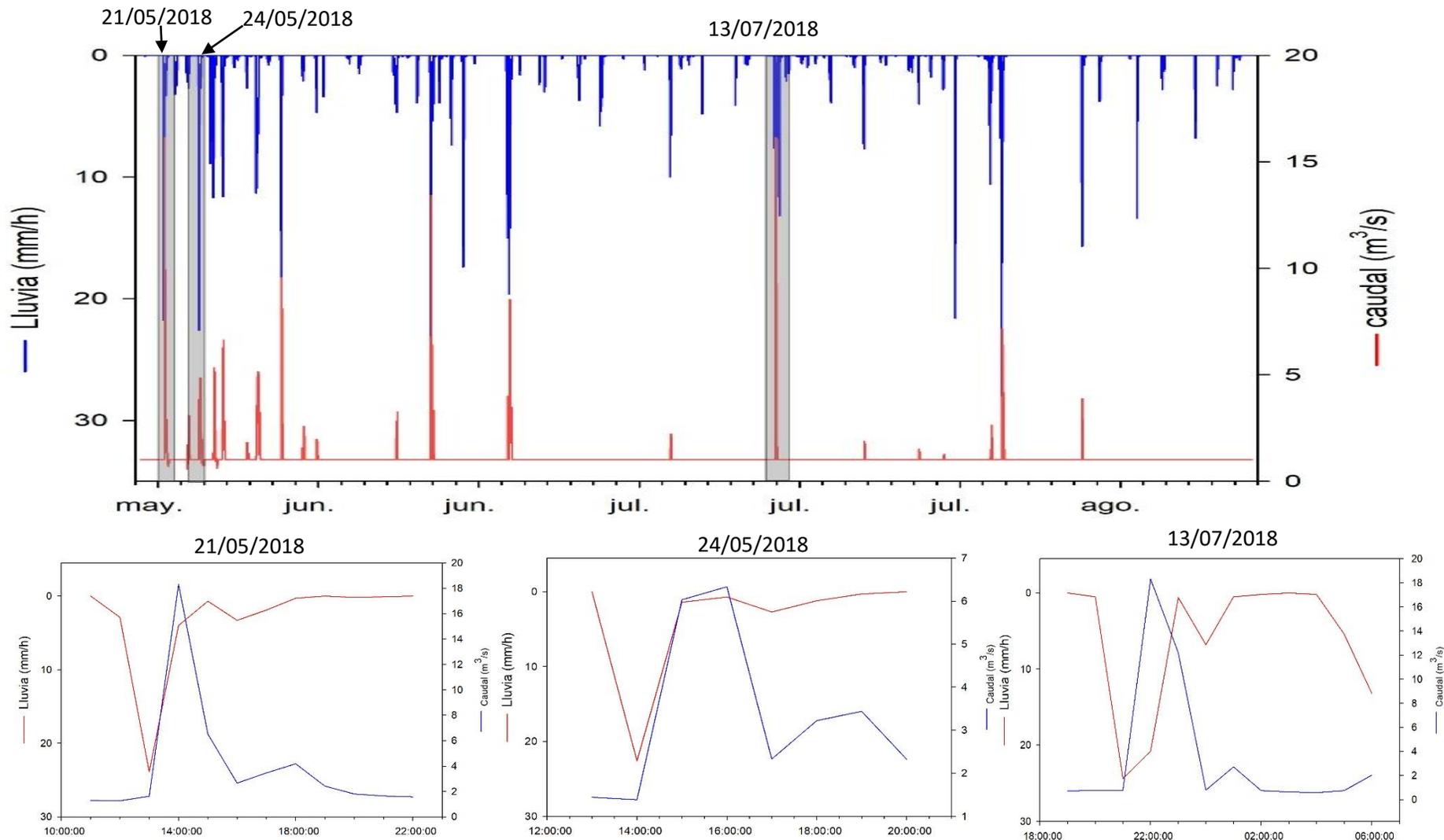


Ilustración 15: Gráficos de interacción entre la precipitación y el aumento del caudal del Ocloro durante el tiempo de registro de datos y los eventos de inundación modelados en el Flo-2d

III. 6. Eventos de modelación en el FLO-2D

Para el modelado hidráulico se seleccionaron tres eventos de inundación de los seis sucedidos: la inundación de menor aumento del nivel, la de mayor aumento y una con una intensidad moderada. Las características de las precipitaciones que causaron estas inundaciones se pueden ver en el cuadro 1. Cada una presenta valores diferentes que favorecen la obtención de rasters de inundación con una mayor variabilidad, permitiendo conocer el comportamiento de las diferentes características de las inundaciones como: la velocidad, dirección y desplazamiento del flujo dependiendo del relieve y la cobertura del suelo.

| | Evento 1(21/5/2018) | Evento 2(24/5/2018) | Evento 3(13/7/2018) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Hora valor máximo | 13:00 | 14:00 | 21:00 |
| Total (mm) | 37,3 | 28,9 | 73,1 |
| Duración(h) | 7 | 8 | 14 |
| Magnitud(mm/h) | 37.3/7 | 22,6/8 | 73,1/14 |
| Intensidad(mm/h) | 23,9 | 22,6 | 24,4 |
| Tiempo respuesta(h) | 3 | 2 | 2 |
| Tiempo(h) | 1 | 2 | 1 |

Cuadro 3: Características de las precipitaciones para las inundaciones modeladas en el Flo-2D

La problemática de inundación específicamente en barrio Luján es compleja por la diversidad de factores que injieren en dicha situación. La respuesta del río Ocloro a los diferentes eventos de precipitación es rápida, la alta impermeabilización de la microcuenca es una causa importante de dicha respuesta del Ocloro, el desfogue directo de aguas residuales sin tratamiento aumenta el caudal del río. Los efectos

antrópicos en la dinámica y comportamiento del Ocloro son evidentes, la propuesta del concepto “caudal antrópico”, surge porque el río tiene cambios en el nivel del agua sin que exista precipitación, lo cual se relaciona directamente con las aguas residuales que entran al río y provienen de las diferentes actividades de la población que vive dentro de la microcuenca y llegan sin tratamiento alguno. Para la modelación de los eventos seleccionados son importantes además de la recolección de los datos fotogramétricos y topográficos, también los datos hidrometeorológicos, ya que son los insumos necesarios para la simulación hidráulica del río.

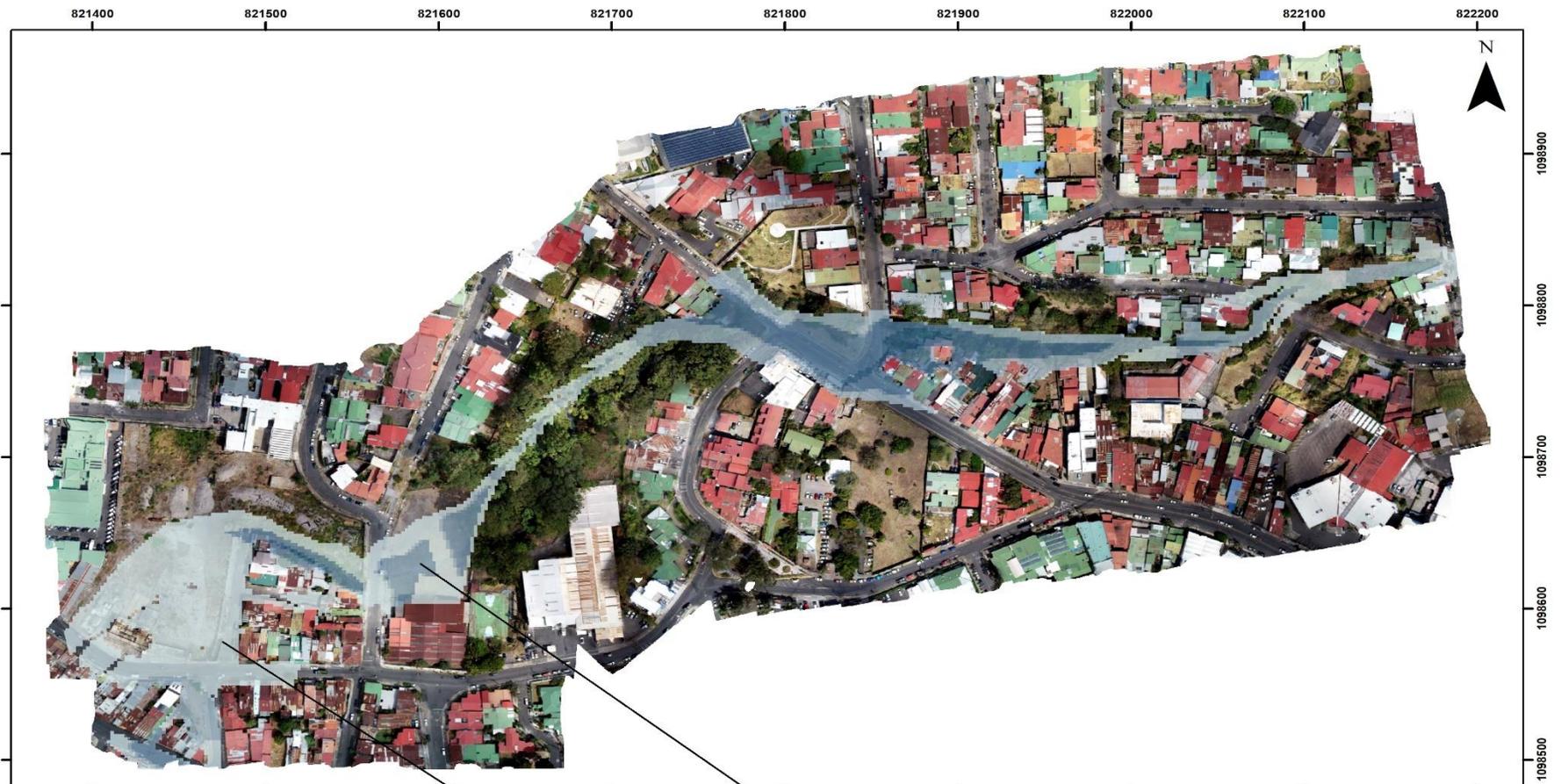
CAPÍTULO IV. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA DE INUNDACIÓN

La zonificación de las inundaciones se realizó mediante el modelado hidráulico del FLO-2D de los tres eventos seleccionados y caracterizados en el capítulo anterior. Este modelado no se apega completamente a la dinámica de inundaciones presentes en la microcuenca debido a que los mapas resultantes muestran sectores inundables donde no se presentan. Sin embargo, si muestra el comportamiento de estas en el sector de la microcuenca que se inunda, barrio Luján, presentando una distribución similar a la que realmente sucede, solamente, con variaciones en la dirección y dispersión del flujo del agua.

Además, se realizó un modelado con dos diferentes coberturas del suelo en los márgenes para conocer la incidencia de la vegetación sobre la velocidad y el flujo del agua, utilizando los datos de caudal del evento del 21 de mayo. Primero, se modeló con la cobertura presente en la microcuenca, que es mayoritariamente, infraestructura y poca vegetación, y posteriormente, se modeló con bosque para contrastar las características de las dos inundaciones y la incidencia de la vegetación en la mitigación de estas. Para el modelado de la velocidad del flujo dependiendo de la cobertura del suelo se utilizó el coeficiente de variación de Manning.

IV. 1. Evento de inundación 1, 21 de mayo del 2018

En la Ilustración 16 se muestra la profundidad y distribución de las inundaciones para el caudal registrado en este evento y modelado en el FLO-2D. Se puede apreciar que hay varios sectores que conforme a los datos de caudal y al raster de altitudes ingresados en el modelo este interpreta que se inunda sin que esto suceda en la realidad de la microcuenca. El sector que posee más área inundable y mayores profundidades presenta una altitud relativamente baja y por las características topográficas y altitudinales, mostradas en la Ilustración 8, se forma una zona de escurrimiento de las aguas de las alcantarillas y de la que fluye superficialmente. Junto con esto, en este sector el Ocloro atraviesa dos puentes; que podrían ser los factores que hacen que el modelo interprete que esta zona se inunda.



Evento 21/5/18
Profundidad
Metros

| | |
|--|---------------|
| | 0,030 - 0,296 |
| | 0,296 - 0,680 |
| | 0,680 - 1,227 |
| | 1,227 - 2,011 |
| | 2,011 - 3,441 |

1:3 000

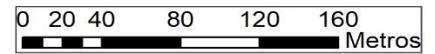


Ilustración 16: Modelado hidráulico del FLO-2D, evento de inundación del 21/05/2018

El otro sector donde el FLO-2D determina la ocurrencia de inundaciones en la microcuenca es el tramo del Ocloro que recorre barrio Luján, siendo la zona afectada, frecuentemente, por inundaciones durante la época lluviosa. El modelo muestra un comportamiento de las avenidas muy semejante al que sucede en este sector del cauce, con un área similar y determinado por las modificaciones explicadas a lo largo del capítulo 1.

El área inundada tiene una extensión aproximada de 19000 metros cuadrados y cuenta con una profundidad de 0 a 0.30 metros, valores que se aproximan a lo experimentado en las inundaciones en este sector. Las zonas donde se presentan las mayores profundidades son: el tramo localizado anterior al entubamiento del río en la propiedad de la Dos Pinos, donde el cauce es estrechado y encerrado en concreto, el otro sector es antes de atravesar el puente de la calle 25, el cual junto con la maya y la basura sirven de represa para el agua provocando que se desborde y, por último, donde se presenta la mayor profundidad modelada es en la entrada del canal de concreto, que es de un volumen insuficiente para la cantidad de agua transportada durante los eventos de precipitación.

El área inundada y las profundidades simuladas por el FLO-2D para este evento coinciden con los valores presentados durante la inundación, con las zonas de mayor profundidad en los sectores del río que se ven interrumpidos por infraestructura que son los que generan el desbordamiento del Ocloro, y profundidades que concuerdan con lo documentado por los integrantes del Comité Comunal de Emergencias de Barrio Luján durante los eventos de inundación.

IV. 1. 1. Infraestructura afectada por la inundación

Sobreponiendo las imágenes de alta resolución espacial, capturadas con el RPAS, y los rasters de inundación generados por el FLO-2D se contabilizó la cantidad de infraestructura afectada por la inundación. El cuadro 4 muestra la cantidad de infraestructura afectada conforme la profundidad de la inundación. En total se afectaron 48 edificaciones, siendo mayoritariamente las zonas inundadas las carreteras, el terreno de la Dos Pinos y el terreno contiguo al canal de entubamiento del Ocloro, donde se planeaba construir edificios habitacionales.

| | Clases (metros de profundidad) | Cantidad de infraestructura |
|---|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,00 - 0,29 | 26 |
| 2 | 0,29 - 0,68 | 10 |
| 3 | 0,68 - 1,22 | 3 |
| 4 | 1,22 - 2,01 | 5 |
| 5 | 2,01 - 3,44 | 4 |

Cuadro 4: Cantidad de viviendas afectas por clase de profundidad, evento del 21/05/2018

IV. 2. Evento de inundación 2, 24 mayo 2018

El modelado hidráulico se puede apreciar en la Ilustración 17, donde se muestra las profundidades y la distribución y expansión del flujo del agua, presentando un comportamiento similar al mostrado en la inundación del 21 de mayo del 2018. Se presentan las mismas zonas de inundación con profundidades similares a lo largo de toda el área modelada.

Como se presentó en el evento del 21 de mayo del 2018 el FLO-2D interpreta una zona de inundación donde en la realidad no se presenta. Sin embargo, en la zona de barrio Luján muestra un área inundable con un comportamiento, tanto de profundidad como de distribución, igual a lo experimentado en la realidad de este sector de la microcuenca.

Se muestran las mismas tres áreas de mayor profundidad: el sector del tramo anterior al parqueo de la Dos Pinos, el sector donde el Ocloro atraviesa la calle 25 y se ubica un puente que disminuye el tamaño del cauce, y el sector más alterado, anterior al canal de concreto. En estos tres sectores se presenta una profundidad de entre 1,22 metros y 2 metros, además de un pequeño tramo en la entrada a



Ilustración 17: Modelado hidráulico del FLO-2D, evento de inundación del 24/05/2018

canal de concreto con 3 metros de profundidad, apegándose a las profundidades que se presentan en la microcuenca durante las inundaciones.

La mayor parte de barrio Luján y la propiedad donde se pensaba construir las torres habitacionales presenta una profundidad de 0.30 metros, valor que se presenta durante las inundaciones y con un desplazamiento igual a lo experimentado durante las avenidas en la microcuenca. Como se mencionó, en este sector el área y las profundidades son iguales a las del evento del 21 de mayo, aunque el caudal registrado para las dos inundaciones fue muy diferente. En el primero se presentó un aumento en el nivel del caudal de 1,10 metros mientras que el segundo fue de 0,51 metros, el menor aumento en el nivel del Ocloro que provocó una inundación.

IV. 2. 1. Infraestructura afectada por la inundación

En el cuadro 5 se muestra la cantidad de infraestructura afectada por cada clase de profundidad. En total se vieron afectadas 58 edificaciones de las cuales 26 se presentan en barrio Luján, siendo mayoritariamente afectadas por la profundidad de 0.29 metros.

| | Clases (metros de profundidad) | Cantidad de infraestructura |
|---|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,00 - 0,29 | 23 |
| 2 | 0,29 - 0,68 | 15 |
| 3 | 0,68 - 1,22 | 10 |
| 4 | 1,22 - 2,01 | 8 |
| 5 | 2,01 - 3,44 | 2 |

Cuadro 5: Cantidad de viviendas afectas por clase de profundidad, evento del 24/05/2018

IV. 3. Evento de inundación 3, 13 julio 2018

El modelado de este evento tiene un comportamiento similar al presentado el 21 y 24 de mayo, donde el FLO-2D interpreta que hay varias áreas inundables en los mismos sectores, con variaciones en la extensión y profundidad del agua. La mayor parte del área inundable se concentra entre los 1.22 y 3.44 metros de profundidad, sin embargo, hay una mayor extensión de área inundada entre los 2 y 3.44 metros debido a que se presentó un mayor aumento en el caudal en comparación con los eventos anteriores

La otra área inundada, el sector de barrio Luján, muestra un comportamiento similar de inundación, pero con una mayor extensión del flujo de agua. Las inundaciones se rigen por los mismos factores mencionados anteriormente en este capítulo, pero se presentan mayores profundidades. Las tres zonas que provocan inundaciones poseen una mayor concentración de agua con valores entre 1.27 y 2 metros de profundidad, provocando con esto que las zonas contiguas, como el terreno de la Dos Pinos presente una mayor acumulación de entre 0.68 y 1.22 metros.

La zona del canal presenta la mayor profundidad entre 2 y 3.44 metros generando un mayor flujo de agua hacia las zonas anexas, de entre 0.29 y 0.68 metros, inundando las viviendas cercanas y las carreteras. Algunos sectores experimentan profundidades inferiores a 0.29 metros en la propiedad contigua al entubamiento. Valores de profundidad que en condiciones extremas como las de este evento, se han presentado en la microcuenca y han afectado gran cantidad de viviendas e infraestructura.

IV. 3. 1. Infraestructura afectada por la inundación

La cantidad de infraestructura afectada por la inundación fue 53 edificaciones, de las cuales, 23 están ubicadas en el sector de barrio Luján y son impactadas por estas inundaciones durante la época lluviosa, solamente, 8 son las afectadas por la profundidad mayor de 2 a 3,44 metros de profundidad. Ver cuadro 6.

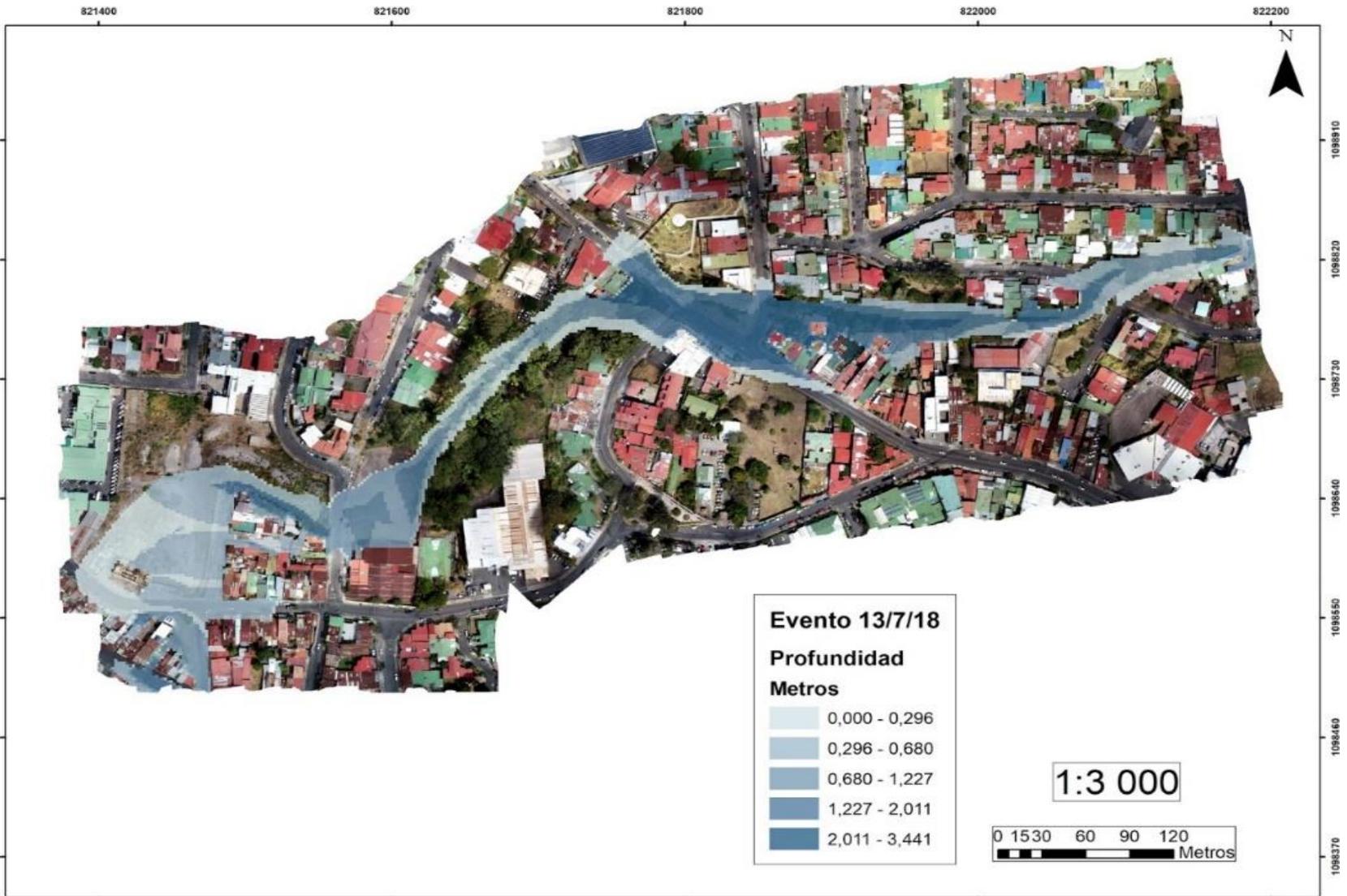


Ilustración 18: Modelado hidráulico del FLO-2D, evento de inundación del 13/07/2018

| | Clases (metros) | Cantidad de infraestructura |
|---|-----------------|-----------------------------|
| 1 | 0,00 - 0,29 | 13 |
| 2 | 0,29 - 0,68 | 19 |
| 3 | 0,68 - 1,22 | 5 |
| 4 | 1,22 - 2,01 | 8 |
| 5 | 2,01 - 3,44 | 8 |

Cuadro 6: Cantidad de viviendas afectas por clase de profundidad, evento del 13/07/2018

IV. 4. Análisis de la velocidad de flujo del agua dependiendo de la cobertura del suelo en los márgenes

El modelado de la velocidad del flujo se realizó mediante los datos de nivel del evento del 21 de mayo.

En la Ilustración 19 se muestran los rasters de la velocidad del flujo del agua con la cobertura actual y la cobertura arbustiva. Estos muestran el mismo comportamiento en la extensión y desplazamiento de la inundación, sin embargo, muestran una variación en la velocidad del flujo del agua. La variación en la velocidad entre los dos rasters se presenta en todo el Ocloro, desde el comienzo del modelado hasta el punto de desfogue.

La velocidad del flujo del agua con cobertura arbustiva en los márgenes se redujo conforme la velocidad presentada con la cobertura actual de la microcuenca, principalmente, en las zonas donde la inundación es más prolongada. En el sector del Ocloro que atraviesa una pequeña zona de vegetación, ubicada antes del entubamiento en la propiedad de las Dos Pinos, se observa una reducción de la velocidad del agua, concentrándose la mayor velocidad del flujo en el centro del río, contrariamente, a lo que sucede en la microcuenca con las características actuales

que la misma velocidad se presenta en la totalidad del ancho del cauce. La velocidad del Ocloro en esta sección se redujo de entre 1,312 y 2,494, con infraestructura en los márgenes, a una entre 0,728 a 1,311 metros por segundo, con vegetación, provocando que en barrio Luján se presente una disminución en la velocidad de la inundación.

En toda el área inundable se presentan modificaciones en la velocidad del flujo, la propiedad de la Dos Pinos presenta una velocidad entre 0 y 0,157 metros por segundo, aumentando a una velocidad entre 0,158 y 0,365 metros por segundo en la sección anterior al canal de concreto. Posterior a este la velocidad se mantiene constante sobre el canal y la carretera y disminuye a entre 0 y 0,157 metros por segundo dentro de la propiedad donde se tenía previsto la construcción de torres habitacionales debido a que se presentan acumulaciones de escombros que detienen el flujo del agua. Esto con arbustos y follajes en los márgenes

Para las condiciones actuales en este sector de la microcuenca la velocidad varía entre los 0 y 0,365 metros por segundo, concentrándose, mayoritariamente, en el intervalo de 0,158 a 0,365. En la sección posterior al entubamiento del Ocloro en el canal de concreto la velocidad se concentra entre 0,158 a 0,365 metros por segundo afectando a las viviendas y las carreteras que se localizan en este sector de barrio Luján. La velocidad disminuye dentro de la propiedad contigua al canal de concreto debido a los escombros y la pendiente.

IV. 4. 1. Variación de la velocidad del flujo de agua en dos secciones del río Ocloro

En la Ilustración 21 se puede apreciar la variación de la velocidad en dos secciones específicas de la microcuenca, tanto con la cobertura actual de los márgenes como con bosque y arbustos. Las dos secciones son la zona con vegetación anterior a la propiedad de la Dos Pinos, que afecta directamente la velocidad experimentada en barrio Luján y la otra en el sector de barrio Luján, en la entrada al canal de concreto, que es el responsable de las inundaciones de esta sección de la microcuenca.

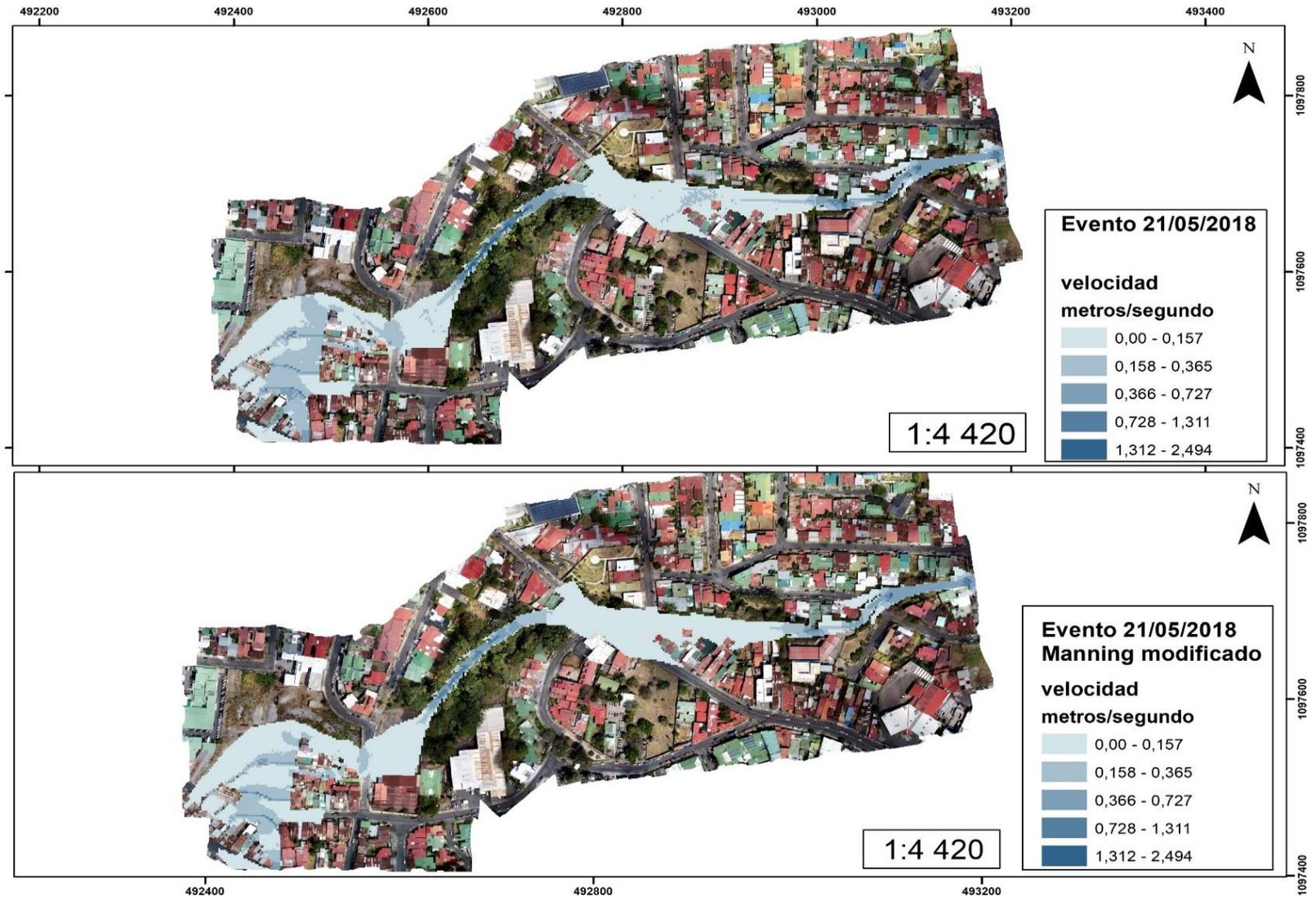


Ilustración 19: Modelado hidráulico del FLO-2D con diferente cobertura del suelo en los márgenes, Manning modificado

En los cuatro gráficos se puede apreciar que se presenta un mismo comportamiento en la distribución de las velocidades, aumentan la velocidad en los mismos sectores, pero con diferentes magnitudes. En el sector 2, donde el Ocloro atraviesa una pequeña zona con vegetación se presenta una velocidad máxima de 2,2 metros por segundo con infraestructura en los márgenes. Las velocidades en toda esta sección se mantienen entre un 1 metro por segundo y 2,2, variando entre estas dos velocidades a lo largo de la línea de velocidad dibujada. Posterior a este sector del cauce se presenta una disminución en la velocidad del flujo sobre la propiedad de la Dos Pinos, disminuyendo desde un 1 metros por segundo hasta los 0,30, esto debido a que el área inundable se expande y la pendiente disminuye provocando la dispersión del flujo y la disminución de la velocidad.

En la misma sección de la microcuenca, pero con cobertura boscosa en los márgenes se presentan la misma distribución de la velocidad del flujo, aunque, con magnitudes inferiores. La mayor velocidad presente es de 1,3 metros por segundo, disminuyendo 0.9 metros por segundo en comparación con la velocidad experimentada con los márgenes no modificados. La velocidad en esta sección se



Ilustración 20: Franja de 10 metros de la modificación de la cobertura de los márgenes para el modelado con el Flo-2d

concentra entre los 0,4 y los 1,3 metros por segundo, y disminuyendo hasta los 0.1 en el parqueo de la Dos Pinos.

En el sector 1 donde se ubica el canal de entubamiento y se genera un giro en forma de "L" con un ángulo de 90 grados se presentan velocidades similares entre los dos modelos. La velocidad máxima experimentada con infraestructura en los márgenes fue de 0,42, y de 0,41 metros por segundo con vegetación arbustiva. Estos valores se presentaron en una sección que el FLO-2D interpretó con mayor profundidad pero que en campo no se presenta ninguna variación. Las velocidades en esta sección presentan un mismo comportamiento, pero con mayores magnitudes en el raster sin modificaciones, en este el mayor porcentaje de área se concentra en velocidades entre 0,15 e inferiores a 0.25 metros por segundo mientras que en el raster con los márgenes modificados la velocidad se concentra entre magnitudes de 0,1 e inferiores a 0,2 metros por segundo.

El producto de los tres eventos simulados arroja resultados importantes para la interpretación y la discusión de la problemática de inundaciones. El resultado del modelamiento del flujo de agua tuvo diferentes comportamientos unos más apegados a la realidad y otros más erróneos. La zona de Barrio Luján es donde se presentan las inundaciones, la extensión y la profundidad del agua en el desbordamiento se comportó de manera muy aceptable, simulando correctamente la inundación real. Después del bosque cerca de la propiedad de la Dos Pinos fue donde menos se apegó a la realidad el modelo, a pesar de que el DEM se corrigió y los posibles obstáculos para el flujo de agua fueron identificados antes de la simulación, infraestructura como puentes generan un margen de error más grande. Para la mejora de los resultados se necesitan de más medidas de nivel a lo largo de la microcuenca del río Ocloro e idealmente contar con una estación meteorológica dentro de esta.

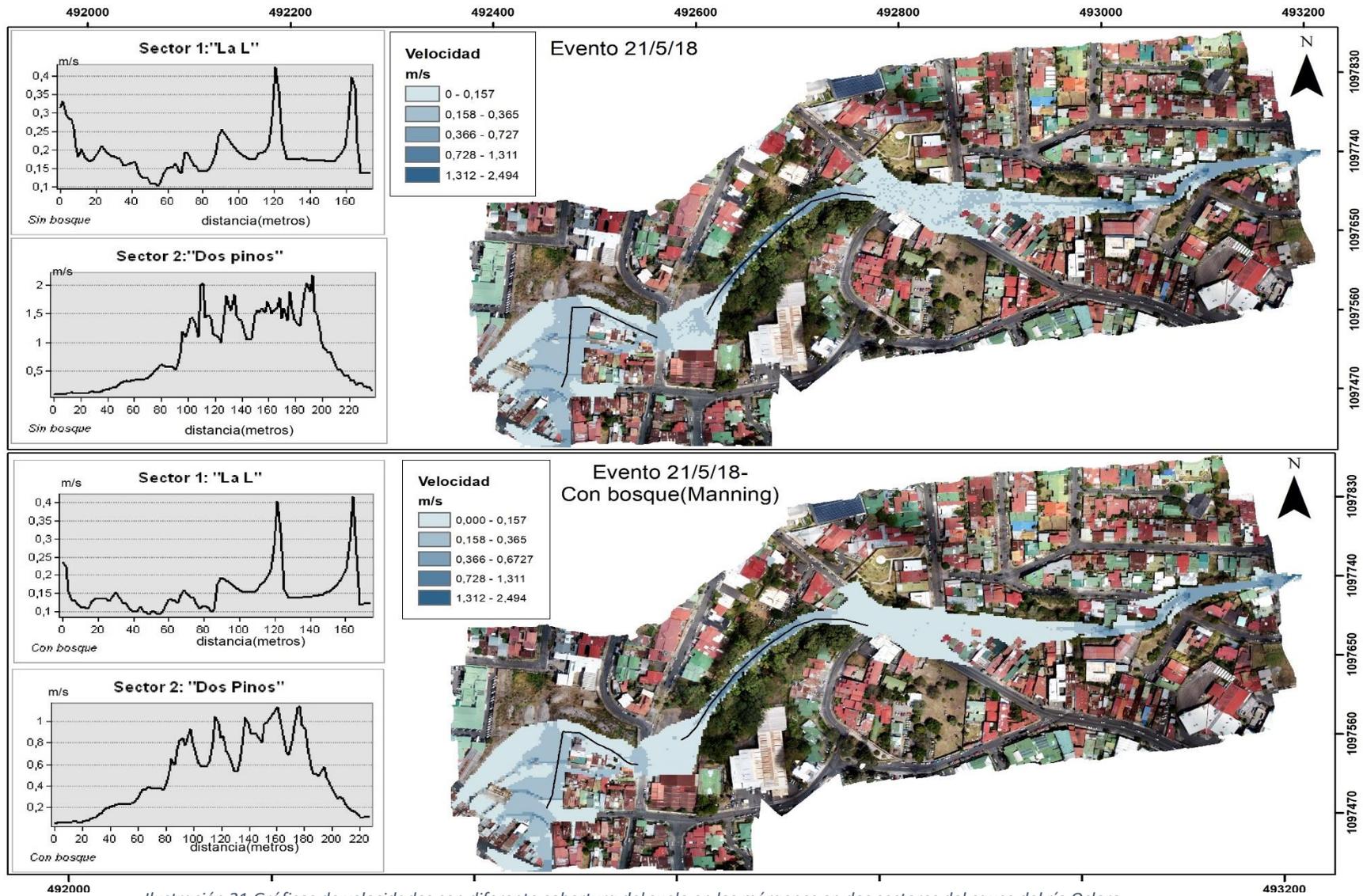


Ilustración 21: Gráficos de velocidades con diferente cobertura del suelo en los márgenes en dos sectores del cauce del río Ocloro

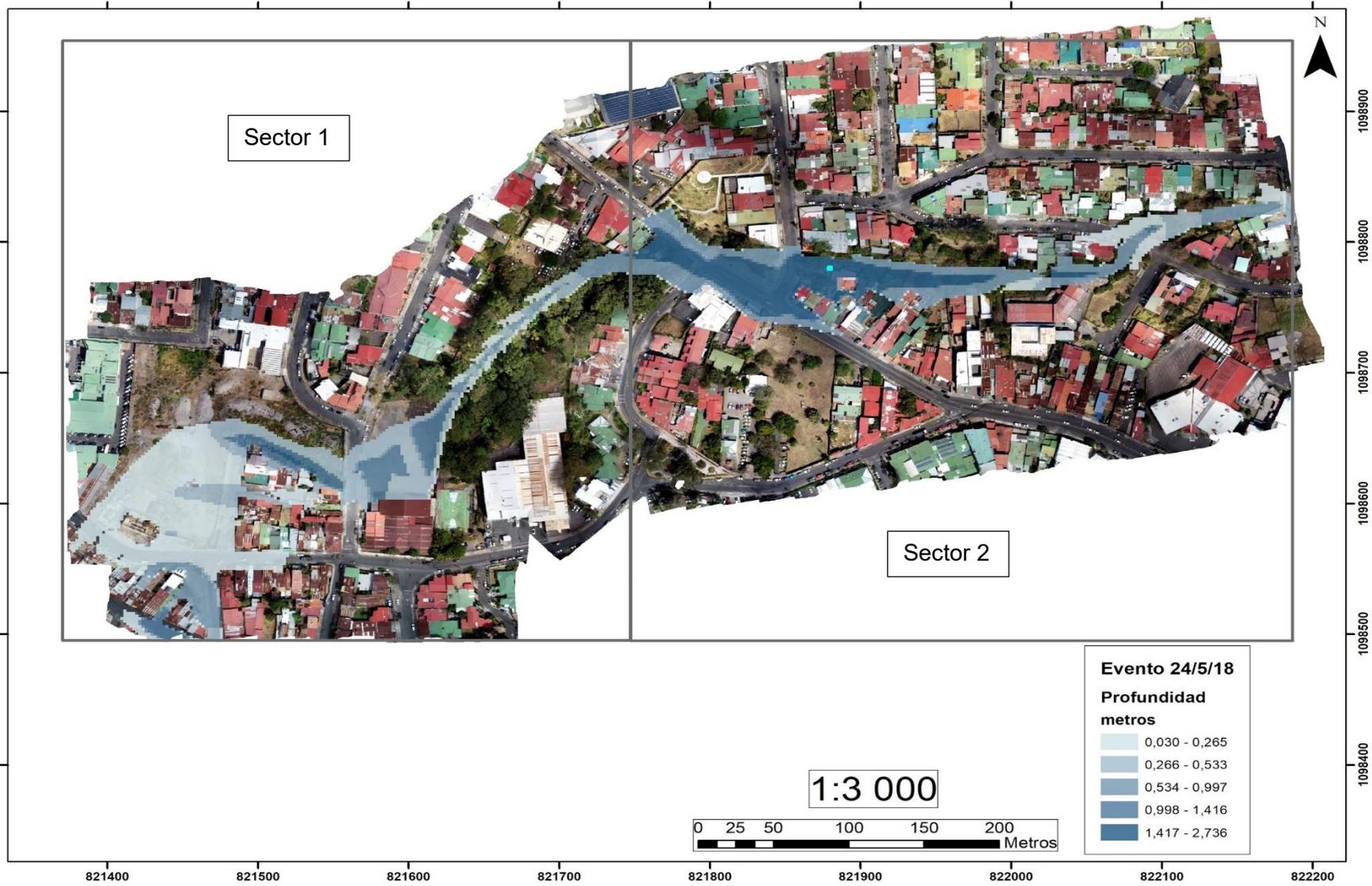


Ilustración 22: Sectores de modelamiento con el FLO-2D

CAPÍTULO V. CONSIDERACIONES FINALES

Después de la realización de esta investigación se determinaron algunas conclusiones generales del trabajo, limitaciones y se sugieren posibles recomendaciones que reducirían el impacto de las inundaciones en la microcuenca.

V. 1. Limitaciones y resultados

La información espacial sobre la microcuenca es muy limitada y la que se encuentra disponible posee muy poca resolución espacial impidiendo realizar estudios sobre inundaciones. Recursos como el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), la plataforma que contiene los datos territoriales y espaciales de Costa Rica, posee muy poca información sobre la microcuenca, y la que posee como: las curvas de nivel y rasters de altitudes no muestran diferencias debido a la resolución a la que se crearon.

Los RPAS son una herramienta de gran utilidad para áreas donde no se disponen de datos espaciales. Estos permiten la obtención de modelos de elevación fundamentales para los modelados hidráulicos y la comprensión de fenómenos espaciales. Además, de fotografías aéreas con alta resolución espacial que permiten determinar la infraestructura afectada por las inundaciones.

Según lo observado con el RPAS y lo explicado en la bibliografía consultada se estima que la microcuenca posee más del 90% del territorio con infraestructura provocando la impermeabilización del suelo y que mayor cantidad de agua de lluvia llegue al río. Junto con esto, se presenta un irrespeto a la franja de protección de los ríos urbanos de 10 metros a ambos lados en la mayor parte del desplazamiento del Ocloro

Este fue severamente modificado en su tiempo por la industria de lácteos Dos Pinos en el tramo que recorre barrio Luján, modificaciones que son las responsables de las frecuentes inundaciones en esta zona.

El territorio de la microcuenca es gestionado y administrado por tres municipalidades dificultando una planificación integral que genere soluciones a los problemas de inundaciones en el Ocloro.

El caudal natural del Ocloro en condiciones normales es de 1,15 metros cúbicos por segundo. Durante el registro de datos de caudal, desde mayo hasta agosto del 2018, en promedio el aumento del nivel fue 3,36 metros cúbicos por segundo con una desviación estándar de 0,369.

Durante el registro de datos se presentaron seis inundaciones, la de menor aumento de caudal que genero una inundación fue de 4,83 metros cúbicos por segundo y la de mayor aumento fue de 18,31 metros cúbicos por segundo. En promedio el aumento del caudal durante las seis inundaciones fue de 4,98 metros cúbicos por segundo con una desviación estándar de 2,18 metros cúbicos por segundo.

La microcuenca presenta dos máximos de lluvias, el primero durante los meses de mayo y junio con una precipitación promedio entre los 45 a 50 milímetros, y el segundo máximo entre los meses de setiembre y octubre registrándose en promedio de 50 a 55 milímetros en un día.

Las precipitaciones que causaron las inundaciones en la microcuenca en promedio duraron entre siete y ocho horas, con un aumento máximo del caudal una hora después del aumento máximo en las precipitaciones. El valor máximo y mínimo de precipitaciones que generaron inundaciones fue de 31.6 mm/h y el 22.6 mm/h, respectivamente. El promedio de precipitación durante los 6 eventos de inundación fue de 5.67 mm/h con una desviación estándar de 8.75 mm/h.

En el Ocloro se presenta un caudal antrópico, producto de las aguas de los drenajes que son depositadas directamente al río. Durante las horas de mayor consumo de agua de la población, en la mañana, cuando las personas se preparan para ir al trabajo o a los centros educativos y, en la noche, en las horas de llegada de las personas del trabajo se presenta un aumento del caudal. El aumento de mayor nivel registrado fue de 0.030 metros.

La distribución de las inundaciones modeladas por el FLO-2D para cada uno de los eventos de inundación ingresados son iguales, variando, únicamente, las profundidades en diferentes partes.

La zonificación de las inundaciones modeladas no se comporta exactamente como lo experimentado en la microcuenca, debido a que muestra un área inundada que no se presenta en la realidad. Sin embargo, en la zona de barrio Luján, sí muestra un comportamiento apegado a lo vivido en las inundaciones, tanto en profundidad como en extensión del flujo. La mayor parte de barrio Luján presenta valores de entre 0 y 0,30 metros de profundidad.

Las tres zonas de mayor profundidad de inundación en barrio Luján obedecen a las modificaciones realizadas por la Dos Pinos en el cauce, mostrando profundidades entre los 1,227 y 3,441 metros.

Los modelos generados con la modificación de la rugosidad de la superficie de los márgenes, uno con infraestructura y otro con vegetación arbustiva, muestran una distribución espacial de las inundaciones idéntica, sin embargo, si se presenta una variación en la velocidad y comportamiento del flujo del agua.

La velocidad en ambos modelados en la sección de barrio Luján se ubica entre 0,158 y 0,365 metros cúbicos por segundo, aunque hay una mayor extensión del flujo a esta velocidad en el modelado con infraestructura en los márgenes.

El raster con vegetación arbustiva presenta una disminución de la velocidad del flujo del agua en comparación con el raster con infraestructura. El valor máximo en el primero fue de 1,3 metros cúbicos mientras que en el segundo el valor máximo fue de 2,4, presentándose en ambos en el sector anterior a la propiedad de la Dos Pinos.

En la sección de barrio Lujan los dos modelados de velocidad muestran los mismos valores máximos de 0.42 metros cúbicos por segundo, aunque no hay un motivo observable en campo que justifique donde estos se experimentan. En el resto del barrio se presenta una disminución de aproximadamente 0,05 metros cúbicos por segundo entre cada modelado.

V. 1. 1. Recomendaciones finales propuestas

Crear un comité intermunicipal que facilite el trabajo conjunto entre las tres municipalidades para tratar los temas relacionados con el río Ocloro y haya una coordinación por parte de cada una para generar soluciones integrales a los problemas de inundación y contaminación experimentados en la microcuenca.

Promover en este comité intermunicipal la participación de representantes del Comité Comunal de Emergencias de Barrio Luján para discutir los problemas de inundación desde la perspectiva de las comunidades que son afectadas y que conocen de primera mano la severidad de las inundaciones y las zonas de afectación. Además, de analizar en conjunto las posibles soluciones planteadas para los problemas de inundaciones y contaminación propiciando la participación de la ciudadanía en la toma de decisiones.

Realizar por parte de las municipalidades la limpieza de las alcantarillas y de la basura presente en los márgenes del Ocloro para reducir la severidad de las inundaciones, principalmente, anterior a los dos meses de máximas precipitaciones presentes en la microcuenca, mayo y octubre.

Llevar a cabo campañas de protección, conservación y cuidado del agua para concientizar a la población de la microcuenca sobre la importancia de la reducción de la cantidad de agua que llegue al Ocloro sin ningún tipo de tratamiento.

Capacitar a la población sobre técnicas de reciclaje, reducción y reutilización de desechos para evitar que estos sean depositados en los márgenes del Ocloro.

Generar un plan de gestión del riesgo de inundaciones en barrio Lujan y capacitar a la población sobre cómo reaccionar durante los diferentes eventos con el fin de mitigar la influencia de estos.

Tratar de modificar el cauce del Ocloro en la zona de barrio Lujan para disminuir la severidad y frecuencia de las inundaciones. Además de modificar la infraestructura que sirve de obstáculo para el flujo natural del agua.

Bibliografía

- Alrajhi, M., Mudasir-Khan, Afroz Khan, M., y Alobeid, A. (2016). Influence Of Dem In Watershed Management As Flood Zonation Mapping. Recuperado de. Visitado el 10/10/2019.
- Canto, M. (2002). Documento "Introducción a las políticas públicas, Participación Ciudadana y Políticas Públicas en el Municipio". México.
- Castañeda, L. A. (2014). Universidad Católica de Colombia. Recuperado el 11 de noviembre de 2017, de Ordenamiento territorial: elementos para su desarrollo:
<http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1617/1/Ordenamiento%20Territorial.pdf>
- Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI). (2018). Datos de precipitación desde el 2005 hasta el 2018. Universidad de Costa Rica.
- Chamocho, W. (2012). El ordenamiento territorial en la gestión de cuencas hidrográficas: criterios de base y nuevos elementos de discusión. Revista América Latina en Movimiento, 11.
- Chávarri, E. (2008). El Ciclo Hidrológico e Introducción a Modelos Hidrológicos. Obtenido de http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/clase_ii_met_el_ciclo_hidrologico_y_modelos_def.pdf
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de Teledetección. Madrid: RIALP.
- Denyer, P. y Kussmaul, S. (2000). Geología de Costa Rica. Costa Rica, Cartago: Tecnológica de Costa Rica
- Estudios y Proyectos S. A. (1979). Estudio Drenaca: Informe Final para Ejecutivos. Recuperado de <http://docplayer.es/14746450-Estudio-drenaca-informe-final-para-ejecutivos.html>

- FAO. (2007). La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. Roma.
- FAO. (2009). Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i0304s.pdf>
- Gobierno de la Republica Costa Rica. (2016). Planta de Tratamiento Los Tajos genera beneficios adicionales al saneamiento. Recuperado de <https://presidencia.go.cr/comunicados/2016/03/planta-de-tratamiento-los-tajos-genera-beneficios-adicionales-al-saneamiento>. Visitado el 07/07/2018.
- Gómez, M. (2007). Estudio e instrumentación de una cuenca urbana en el municipio de Sant Boi de Llobregat. En Hidrología Urbana. Barcelona, España.
- Hernández, E. y Retana, D. 2016. El Enfoque Territorial Participativo como herramienta para la gestión de cuencas urbanas, el caso de la microcuenca del río Burío-Quebrada Seca. Heredia-Alajuela, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Geografía. Facultad de Ciencias Sociales. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- IDEAM. (2017). Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación. Bogotá, Colombia.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2017). Generalidades y registros climatológicos de las tormentas severas que han afectado la microcuenca del río Ocloro, en el área metropolitana de San José. 1967 – 2014. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Informe+T%C3%A9cnico+R%C3%ADo+Ocloro>
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (2009). Programa Nacional de Manejo Adecuado de las Aguas Residuales Costa Rica 2009-2015. Recuperado de <http://www.bvs.sa.cr/AMBIENTE/textos/ambiente39.pdf>

Instituto Geográfico Nacional. Fotografías aéreas años: 1945, 1963, 1970 y 1976.
Registro Nacional de Costa Rica. Costa Rica: San José.

Llanos-Hernández, L. (2010). El concepto del territorio y la investigación en las ciencias sociales. Universidad Autónoma Chapingo: Agricultura, Sociedad Y Desarrollo, volumen 7, número 3.

López, J. (2012). Manejo integral del agua pluvial en tuxtla gutierrez, chiapas.
Recuperado de https://www.academia.edu/31012829/UNIVERSIDAD_NACIONAL_AUT%C3%93NOMA_DE_M%C3%89XICO_MAESTRO_EN_INGENIER%C3%8DA.
Visitado el 11/10/2019

López, M. (1978). Contaminación de los Ríos en el Área Metropolitana: El río Ocloro.
Tesis de Pregrado. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca.

Mora, J. R. (2003). Análisis del Crecimiento Urbano de la Gran área Metropolitana de Costa Rica período 1983 al 2000. Tesis de Maestría en Geografía.
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Mundial, B. (2012). Gestión Integral de Aguas Urbanas. Washington DC.

Municipalidad de San José. (2017). Drenaje fluvial y drenaje de aguas pluviales en San José. Boletín informativo n. 21. Recuperado de <https://www.msj.go.cr/MSJ/Municipalidad/Boletines/Boleti%CC%81n%20Informativo%20Observatorio%20N%C2%B0%2021%20Abril%202017.pdf>.
Visitado el 01/06/2018.

Naciones Unidas. (2018). Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Recuperado de <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>. Visitado el 07/07/2018.

- Ozdemir, H., Sampson, C., de Almeida, G., y Bates, P. (2013). Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data
Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/258788049_Evaluating_scale_and_roughness_effects_in_urban_flood_modelling_using_terrestrial_LIDAR_data. Visitado el 01/10/2019.
- Peng, S. (2013). FLO-2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in southeastern Taiwan during Typhoon Morakot.
Obtenido de Springer Link:
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11629-013-2510-2#citeas>
- PROAPAC. (2010). Modelación Hidráulica. Obtenido de Biblioteca Virtual de la cooperación alemana: http://www.bivica.org/upload/ag_modelacion.pdf
visitado el 07/07/2018.
- Provoste, Y. (s. f.). Zonificación para la planificación territorial. Oficina de Planificación Territorial de Chile. Recuperado de <http://www.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/btca/txtcompleto/mideplan/cuad1-zon.planterrit.pdf>. Visitado el 07/07/2018.
- Quirós, E. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Cáceres: Universidad de Extremadura.
- Ramírez, P. (s. f.). Estudio meteorológico de los veranillos en costa rica. Instituto de Agricultura y Ganadería. Nota de investigación n. 5. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Estudio+sobre+veranillos+en+Costa+Rica>. Visitado el 06/06/2018.
- Rodríguez, M. (1990). Efectos del desvió del río Ocloro hacia el río María Aguilar. Tesis de Pregrado. Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca.

Salgado, G., y Bonola, I., (2012). Modelación numérica para el análisis de deslizamientos y flujos de lodo y escombros en cuencas. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C.

Slater, L., y Villarini, G. (2017). Evaluating the Drivers of Seasonal Streamflow in the U.S. Midwest. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/9/695/pdf>.. Visitado el 12/08/2019

Solano, J., y Villalobos, A., (2017). Generalidades y registros climatológicos de las tormentas severas que han afectado la microcuenca del río Ocloro, en el área metropolitana de San José. 1967 – 2014. Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Informe+T%C3%A9cnico+R%C3%ADo+Ocloro>. Visitado el 11/10/2019

Tussi, C. (2007). Associated Programme on Flood Management. Recuperado de Associated Programme on Flood Management: http://www.apfm.info/pdf/Urban_Flood_Management_Es_low.pdf. Visitado el 30/10/2017.

UNESCO. (2012). Glosario hidrológico internacional. Obtenido de la UNESCO: <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>

UNESCO. (2015). Las aguas urbanas en Costa Rica. México