

Artículo de Revisión

Modelación hidrodinámica e hidrológico de las inundaciones fluviales en la llanura de la reserva Nacional Pacaya Samiria, periodo 2018-2019

Hydrodynamic and hydrological modeling of fluvial floods in the plain of the Pacaya Samiria National Reserve, period 2018-2019

-  **Bryan Santillan Tello**
Universidad de Ingeniería y Tecnología, Perú
-  **Luis Eduardo Oré Cierito**
Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú
-  **Grecia Stefany Valdivia Vergaray**
A Rocha Perú conservación y esperanza, Perú
-  **Christian Edson Frías Pérez**
Barr Engineering Co., Minneapolis MN, USA
-  **Wendy Caroline Loarte Aliaga**
Consultor Constructor & Auditor LEOC E.I.R.L
-  **Erle Otto Javier Bustamante Scaglioni**
Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú

Aceptado: Junio de 2023

Recibido: Abril de 2023

Enero - Junio

Vol. 2 Núm. 1 – 2023

<https://doi.org/10.56275/fitovida.v2i1.19>

RESUMEN

El trabajo de investigación comprendió la descripción del proceso de inundación fluvial en la Reserva Nacional Pacaya Samiria por parte de los ríos Marañón, Ucayali, Huallaga y los tributarios Tapiche, Tigres, Samiria y Pacaya. Se describe la influencia de este proceso sobre la biodiversidad y actividad pesquera, a través del transporte de flujo y de sedimentos, nivel y caudales de los ríos según el ciclo hidrológico. Se desarrolló un modelo bidimensional con un dominio computacional que abarca la Reserva y su área de amortiguamiento. Como parte del modelo del terreno se usó un DEM, y para la geometría del fondo de los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya y Amazonas se usaron las batimetrías realizadas por parte de la Marina de Guerra del Perú en el 2014 en el río Amazonas y para los demás ríos, las batimetrías medidas por el Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CITA) en el 2018 y 2019. Con respecto a las condiciones de borde se utilizaron los caudales interpolados de las campañas del 2018 y 2019 del proyecto MOORE del CITA-UTEC; y se calibraron con los niveles de agua de las estaciones hidrométricas del SENAMHI transformadas a elevaciones con ondulación geoidal EGM96. Se calibraron los niveles de agua de los ríos Marañón y Ucayali en las estaciones San Regis y Requena con elevaciones del nivel del agua de 106.341 m y 101.96 m respectivamente con un valor de coeficiente de manning de 0.04 para ambos ríos. Se obtuvo un caudal máximo en el río Amazonas de 56459.2 m³/s, y se obtuvo un área de inundación máxima sin incluir los ríos de 6698.92 km² que corresponde al 19% del área de la Reserva para el año hidrológico 2018-2019. Se identificaron las rutas de descarga en donde el mayor ingreso es a través del canal de Puinahua en los meses de abril y mayo, con lo que se contrastaron las áreas inundadas con los mapas de cobertura vegetal, geología, geomorfología y zonas de vida. Finalmente se describió la relación del ciclo hidrológico con la diversidad de flora y fauna. Se describió la relación de la diversidad de flora y fauna con el proceso de inundación de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali, identificando la planicie de inundación, las rutas de descarga de los flujos no permanentes y productividad de la actividad pesquera.

Palabras clave: Pacaya Samiria, reserva nacional, modelización a escala regional, modelo hidráulico 2D, cuenca amazónica, interconectividad río/llanura aluvial, HEC-RAS.

ABSTRACT

The research work included a description of the fluvial flooding process in the Pacaya Samiria National Reserve by the Marañón, Ucayali, Huallaga and tributaries of the Tapiche, Tigres, Samiria and Pacaya rivers. The influence of this process on biodiversity and fishing activity is described, through flow and sediment transport, river levels and flows according to the hydrological cycle. A two-dimensional model was developed with a computational domain that encompasses the Reserve and its buffer area. A DEM was used as part of the terrain model, and for the bottom geometry of the Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya and Amazon rivers, bathymetry carried out by the Peruvian Navy in 2014 in the Amazon River and for the other rivers, by the Center for Water Research and Technology (CITA) in 2018 and 2019 were used. With respect to the boundary conditions, interpolated flows from the 2018 and 2019 campaigns of the MOORE project of CITA-UTEC were used; and calibrated with water levels from SENAMHI hydrometric stations transformed to EGM96 geoidal wavelet elevations. The water levels of the Marañón and Ucayali rivers were calibrated at the San Regis and Requena stations with water level elevations of 106.341 m and 101.96 m respectively with a manning coefficient value of 0.04 for both rivers. A maximum flow in the Amazon River of 56459.2 m³/s was obtained, and a maximum flooding area without including the rivers of 6698.92 km² was obtained, which corresponds to 19% of the Reserve area for the 2018-2019 hydrological year. The discharge routes were identified, where the largest inflow is through the Puinahua channel in the months of April and May, and the flooded areas were contrasted with the maps of vegetation cover, geology, geomorphology and life zones. Finally, the relationship between the hydrological cycle and the diversity of flora and fauna was described. The relationship of flora and fauna diversity with the flooding process of the Huallaga, Marañón and Ucayali rivers was described, identifying the floodplain, the discharge routes of non-permanent flows and the productivity of fishing activity.

Keywords: Pacaya Samiria, national reserve, regional scale modeling, 2D hydraulic model, Amazon watershed, river/floodplain interconnectivity, HEC-RAS.

INTRODUCCIÓN

La Reserva Nacional Pacaya Samiria (RNPS), se encuentra en el departamento de Loreto, tiene una superficie de 20.800 km² siendo la reserva nacional de mayor extensión del Perú limitada entre los ríos Huallaga al noroeste, Ucayali al sur y Marañón al norte.

La RNPS cuenta con una de las mayores actividades de pesca e índice de biodiversidad en el Perú con variaciones de intensidad según los niveles de agua de los ríos, cochas y llanura de inundación.

La llanura de inundación de la RNPS se caracteriza por tener una pendiente llana, poseer una extensa red de cochas conectadas entre sí, que permanecen inundadas permanente o semipermanentemente según su ciclo hidrológico anual. Los procesos de inundación y la presencia de estructuras geomorfológicas debido a la dinámica hidrodinámica de los ríos enriquecen la biodiversidad de la Reserva por medio del transporte de flujos con sedimentos y nutrientes.

Esta relación se le conoce como dinamismo fluvial que da lugar al enriquecimiento del hábitat amazónico según los ciclos de inundación, la geomorfología de los cauces y llanura de inundación; y las condiciones climáticas.

La importancia de los ríos en el ciclo hidrológico e hidrodinámico en la RNPS, requieren de una atención especial ante cualquier actividad humana. Por lo que es necesario comprender cada proceso como parte de un sistema integrado que mantiene el equilibrio entre la conservación y el bienestar de la población.

Por ello, se deben conocer los impactos ambientales de proyectos de infraestructura de gran magnitud o proyectos de dragados, de tala ilegal de madera, de la actividad

pesquera y de los efectos del cambio climático de la que puedan afectar este equilibrio.

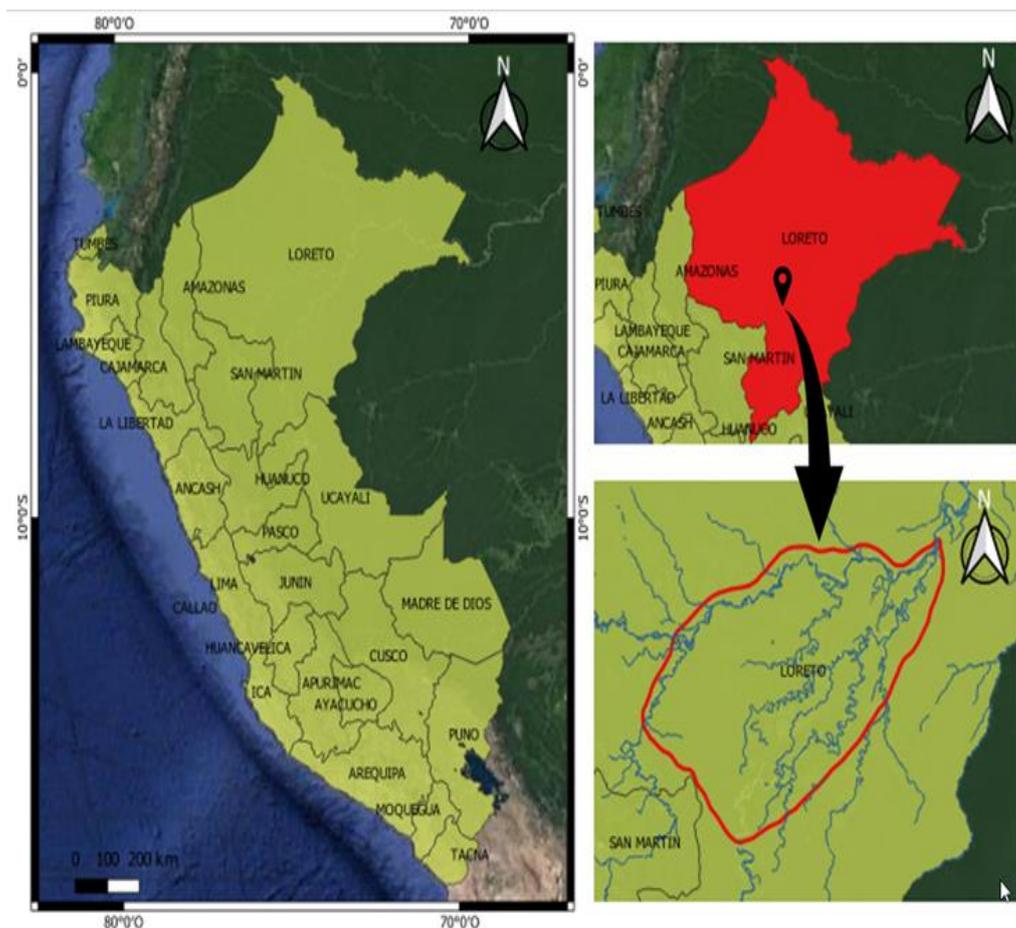
Para conocer el grado de impacto que pueden ocasionar estas actividades ajenas hacia la conservación del equilibrio de este ecosistema; en primer lugar, se debe conocer el estado actual de este mismo en un año hidrológico y como punto de partida este trabajo de investigación se desarrolló bajo la perspectiva de una línea base física ambiental que mediante la modelización bidimensional, describe la relación de la biodiversidad con el proceso de inundación en la Reserva Nacional Pacaya Samiria según la variación de los caudales y niveles de agua de los ríos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio consistió en el procesamiento de los datos de batimetría, velocidades y caudales de las campañas de campo de la Marina de Guerra del Perú para el año 2014; y 2018 y 2019 con los datos del CITA-UTEC recolectados en el área de estudio de la Reserva Nacional Pacaya Samiria (RNPS) y en su zona de amortiguamiento, que se encuentra localizado en el departamento de Loreto; entre las provincias de Loreto, Requena, Alto Amazonas y Ucayali (figura 1), entre las cuencas de los ríos Marañón y Ucayali.

Figura 1

Ubicación política de la zona de estudio



Fuente: Página Web GPS Perú - Shape de la delimitación departamental

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión de la literatura de investigaciones ejecutadas en la zona de estudio y en la cuenca amazónica en temas de caracterización hidrológica, a manera de información base y referencial.

Para lo cual se tomarán como referencia diferentes investigaciones desarrolladas por el Instituto Geofísico Peruano y del Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD), en temas de transporte de sedimentos y modelamiento hidrológico a escala de cuenca amazónica; el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana y el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, en las áreas de geología, fisiografía y biodiversidad, así como estudios de instituciones académicas nacionales e internacionales, como la Universidad Nacional Agraria La Molina y la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Además, se recopiló la información pública disponible referente a las características físicas de la zona de estudio, como geología, geomorfología, cobertura vegetal, zonas de vida, uso y tipo de suelo, así como la caracterización topográfica de la cuenca.

También, se recolectó la información hidroclimáticas y limnimétrica existente de la zona de estudio de las

estaciones meteorológicas del SENAMHI a lo largo de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali.

Recopilación de datos sobre el terreno

La reserva es un área donde se presentan diferentes regímenes hidrológicos para los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali con temporadas de crecidas, vaciante y transición. Niveles de agua registrados por las estaciones hidrométricas de Contamana, Requena, San Regis, Nauta, Lagunas y San Lorenzo; y niveles de agua registrados con sensores de niveles a presión en los ríos Pacaya y Samiria por el CITA-UTEC. Caudales registrados en los meses de mayo, septiembre y noviembre del 2019 por el CITA-UTEC. Los datos de precipitaciones diarias fueron utilizados para determinar los ciclos hidrológicos (creciente y vaciante) para los ríos Huallaga, Marañón, Tigre, Tapiche y Ucayali en el año hidrológico 2018 – 2019 usando la metodología de CUTOFF para completar los datos faltantes (Fang, L. et al, 2014). Estos ciclos nos permitieron establecer las condiciones iniciales de caudales en el modelo bidimensional. En la figura 2 se muestran los datos de entrada utilizados para desarrollar este trabajo.

Figura 2

Datos de entrada para realizar la simulación del modelo



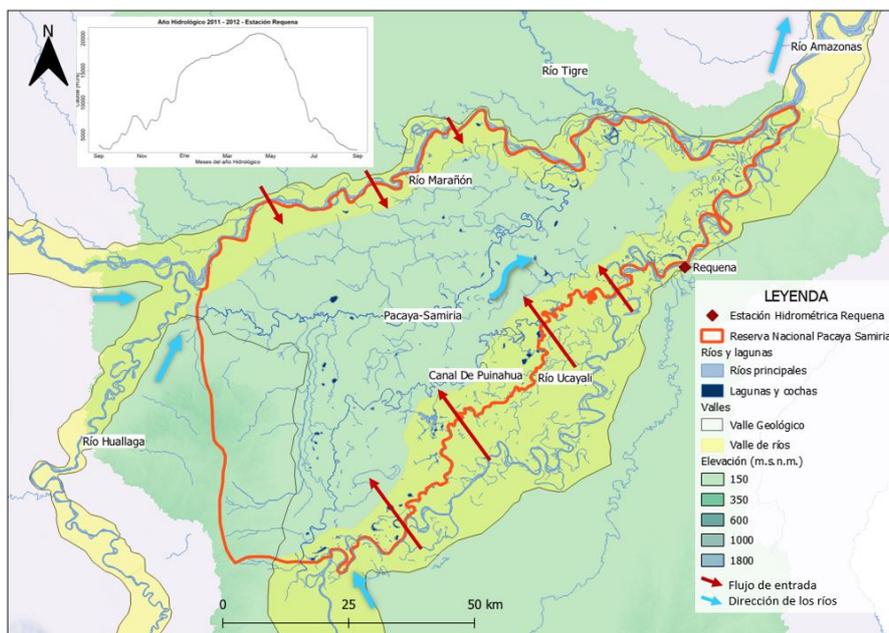
Geomorfología

La geomorfología en la zona de estudio según la clasificación del INGEMMET, conteniendo diferentes formaciones como: paleocauces, áreas de complejos de orillares antiguos y recientes; islas fluviales, terraza baja y baja aluvial; y llanura amazónica disectada u ondulada. En el trabajo de Marin, J. et al. (2020) se menciona que “en la cuenca amazónica encontramos dos principales tipos de ríos, los meándricos y los multicanales (anabranching). Es

muy importante identificar el tipo de río con el que se planea trabajar, pues presentan diferentes patrones de comportamiento en función a los procesos que ocurren en ellos, tales como la acumulación de sedimentos, la avulsión y el corte de meandros, entre otros”. Cartografía y delineación de la geomorfología de la llanura de inundación utilizando datos de teledetección (Park, E., Latrubesse, E. M., 2017) para la digitalización de paleocanales e identificación de unidades geomórficas como se muestra en la figura 3.

Figure 3

Conectividad hidrogeomorfológica de la depresión de Ucamara



La principal característica de los ríos meándricos es la de tener un canal principal bien definido y su recorrido es curvilíneo (figura 4.C). Por otro lado, los ríos multicanales (figura 4.B) son aquellos que presentan islas aluviales, que generan la división del flujo para luego volver a conectarse; es así como se forman diferentes patrones de ramificación del flujo interconectados por el mismo patrón de dirección

(Frias et al., 2015; Nanson, 2013). También podemos encontrar una clasificación de ríos denominados ríos trenzados (braided) cuya principal característica es la de tener múltiples ramificaciones separadas por pequeñas islas (figura 4.A) (Eaton et al., 2010).

Figura 4

Tipos de ríos principales (A: Río trenzado “braided”. B: Río multicanal “anabranching”. C: Río meándrico)



Cobertura vegetal

La Reserva Nacional Pacaya Samiria alberga un gran riqueza y variedad de flora y un alto dosel forestal, además, podemos encontrar su vegetación ha sido clasificada según su fisionomía, fisiografía y sus características florísticas de acuerdo con su altura, densidad, suelo y relieve. Dentro de la reserva hay predominancia de la clasificación de bosque inundable de palmeras, esto es gracias a la calidad de suelo que cumple con características del drenaje del suelo, asociado a las crecidas del río, la precipitación y fisiografía de la zona. También podemos encontrar los bosques de llanuras meándricas, que son aquellos que se encuentran en los terrenos aluviales cuyos suelos reciben periódicamente los sedimentos de los ríos. Por otro lado, el bosque maduro es aquel que se ubica más alejado de la orilla del río y presenta una alta cobertura vegetal característica de palmeras, lianas y epífitas. Otra clasificación que podemos encontrar es el bosque de terraza, que, por su topografía plana, posee un suelo con mal drenaje. También tenemos el bosque de terraza alta que posee suelos antiguos de origen aluvial y es característico de un buen drenaje, y con una vegetación que supera los 40 m de altura 1 m de diámetro a la altura del pecho (DAP). Así mismo, el bosque de colinas presenta las mismas características de diámetro y altura con la diferencia de que en este bosque hay predominancia de la especie de palmeras “irapay” (*Lepidocaryum* sp). Finalmente tenemos el sotobosque que presenta menor cantidad de especies latifoliadas y de palmeras “irapay” que pueden llegar hasta los 2 m.

Biodiversidad y ecosistemas

La RNPS está conectada con el sistema de los Andes central y del norte por medio de los ríos transportando sedimentos a través de sus caudales. Además, el ciclo de precipitaciones en las cuencas altas da paso a la gran estacionalidad en los ciclos de inundación. Por ello las inundaciones generan cambios en la conectividad de los cuerpos de agua y de los humedales. Los cambios estacionales de nivel de agua en

los humedales tienen relación con los cambios funcionales de los ecosistemas. El transporte de roca, arena y partículas de arcilla de los ríos amazónicos transforma la geomorfología de la zona, depositando sedimentos en lechos, orillas y terrazas. Los servicios ecosistémicos que encontramos en esta región amazónica son: captura y almacenamiento de carbono, regulación hídrica, producción de alimentos, provisión de insumos y el recurso pesquero. En la RNPS encontramos a la taricaya (*Podocnemis unifilis*) que pone huevos en las playas y en las orillas de los lagos (Soini, 1986). Para la anidación de las tortugas es muy importante tener en consideración el sustrato de la zona de desove, el cual depende los nutrientes traídos por los sedimentos del río. El estudio de Soini, 1986 realizado en un tramo del río Pacaya en la zona de Cahuana identificó que era la primera vez que las tortugas estaban presentes en zonas donde parte de las playas estaban sumergidas, incluso si el tipo de sustrato es arenoso o arcilloso se realiza el desove. La tortuga charapa (*Podocnemis expansa*) y el cupiso (*Podocnemis sextuberculata*), se encuentran en época seca cuando las playas están completamente expuestas y depositan los huevos sobre sustratos arenosos. El estudio de Soini, 1986 también señala que se presenta estratificación vertical en las playas, con nidos de cupiso en las partes bajas de la playa, taricaya en las partes media y alta, y charapa en las partes altas (Vasquez y Tovar Ingar, 2007). Otra de las especies que sufre disminución por la creciente de ríos dentro de la reserva es el ronsoco (*Hydrochaeris hydrochaeris*, se tiene un registro excepcional de mortandad ocurrido en un evento de crecidas en el año 1986 del río Pacaya (Soini, 1988). El evento ocurrido en dicho año afectó de forma significativa la población de ronsocos, a pesar de ser una especie semiacuática. Esto se debió a que hubo mayor área inundada, las restingas más altas fueron inundadas, disminuyeron el área del hábitat de ronsoco y limitando su movilización (Soini, 1988). En condiciones típicas de inundaciones, las poblaciones de ronsoco no se ven afectadas (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Zonificación

La Zonificación de la RNPS está basada según los objetivos de conservación de la biodiversidad característica de un bosque tropical húmedo y en el manejo de los recursos naturales de interés ecológico y económico para su uso sostenible. La identificación de zonas de uso es importante para determinar los sectores y recursos naturales donde las organizaciones ejercen influencia a través de sus actividades extractivas; asimismo, permite comprender mejor las características y condiciones de la extracción, elemento necesario para un ordenamiento socio ambiental efectivo (OSPPA “LOS JAGUARES”, 2014). Como se describe en el Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2009 – 2013 (SERNANP, 2009), La Zona de Amortiguamiento de la RNPS tiene aproximadamente un buffer de 10 km adicionando una extensión de 20 km en los alrededores de la bifurcación del río Ucayali que genera al canal de Puinahua, con el objetivo de prevenir actividades antropogénicas que pudieran afectar la calidad de las aguas.

En el Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2017 – 2021 (Galarza, E. 2017) se muestra la zonificación más actualizada recientemente, donde las diversas zonas clasificadas han sido modificadas a comparación del plan maestro del 2009 - 2013 donde se tenía 32.31% como Zona Silvestre (S), 6.19% como Zona de Uso Especial (UE), 18.67% como Zona de Recuperación (REC) y 42.84% como Zona de Aprovechamiento Directo (AD), en la que se puede apreciar una gran variación en las zonas de aprovechamiento directo. Para la caracterización física del área de investigación, se usaron mapas temáticos del IGMEMT y del MINAM con datos de cobertura vegetal, geomorfología, zonas de vida, geología, uso y tipo de suelo y topografía de la RNPS.

Modelamiento hidrodinámico

Para el modelamiento hidrodinámico bidimensional se usó el programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's

River Analysis System) para realizar el modelo bidimensional integrando las herramientas de análisis hidráulico para flujos no permanentes. Para la delimitación del dominio computacional se tuvo en cuenta las extensiones de la RNPS y su área de amortiguamiento incorporando las características geomorfológicas de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali a nivel de planta (US Army Corps of Engineers, 2022).

Terreno y rugosidad

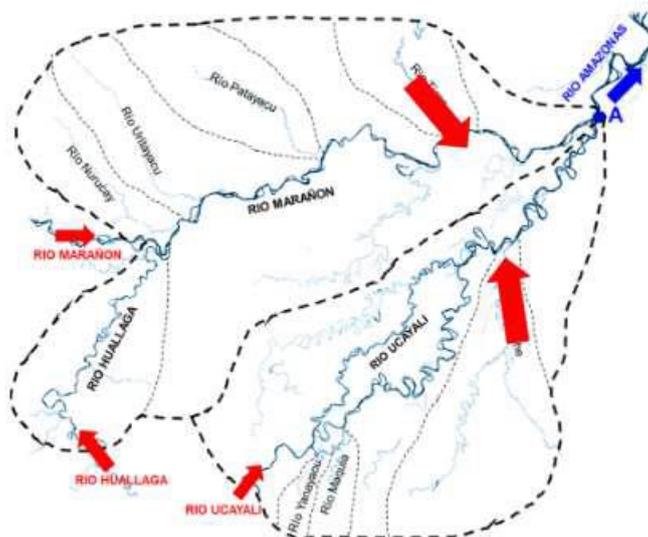
La geometría estuvo basada en una combinación de mallas estructuradas y no estructuradas en todo el dominio de 400x400m, se crearon áreas de refinamiento de 80 m x 80 m para los ríos Huallaga, Tapiche, Tigres, Ucayali y marañón; y áreas de 25 m x 25 m para los ríos Pacaya y Samiria. Se utilizaron las secciones transversales de los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Tigres, Pacaya y Samiria registrados por el equipo ADCP (ADCP, 2018) y Monohaz en las campañas del 2018 y 2019, con la finalidad de configurar la geometría del cauce de los ríos dentro del Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) del satélite ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 m x 12.5 m procesado con una ondulación geoidal EGM96. Los datos de batimetría e hidrodinámicos recopilados en las campañas del CITA-UTEC de los años 2018 y 2019 en la Reserva Nacional Pacaya Samiria y batimetría en el río Amazonas por parte de la Marina de Guerra del Perú siendo procesados con el software HYPACK, que está basado en Windows para la industria hidrográfica y de dragado (HYPACK, 2020) los datos batimétricos y WinRiver los datos de caudales con flujos secundarios y batimetría registrados por el equipo ADCP.

Terreno y rugosidad

Las condiciones de borde en el dominio computacional se establecieron 5 condiciones de entrada con hidrogramas de caudales y 1 de salida con una pendiente normal como se muestran en la figura 5 elaborada por el CITA-UTEC.

Figura 5

Condiciones de borde según el modelo conceptual de la conectividad de flujos



El coeficiente de Manning para la llanura de inundación fue de 0.2 y para los ríos de 0.035 haciendo referencia a la tabla de Ven Te Chow (1994) para ríos con fondos móviles y arenosos que abarca un rango entre 0.025 a 0.035.

Terreno y rugosidad

La curva de calibración de Caudal - Nivel se realizó con la ecuación de Manning para obtener los hidrogramas de caudales interpolados en el año hidrológico 2018 – 2019.

$$A * R^{2/3}_{calculado} = Q_{registrado} * n / S^{1/2}$$

En donde A es el área de la sección transversal (m²) de las mediciones de ADCP, n es el coeficiente de Manning (Chow, 1994), R es el radio hidráulico (m) y S es la pendiente del cauce (m/m). Los variables necesarias para desarrollar la curva de calibración fueron extraídos de los datos procesados del ADCP, donde se usó la batimetría, área y radio hidráulico de la sección transversal (Hernandez, N., 2016). Se utilizarán los caudales interpolados de las campañas del 2018 y 2019 del proyecto MOORE ejecutadas por el CITA-UTEC y para las condiciones de salida se interpolan los niveles de agua de la estación Nauta, transformando los tirantes a elevaciones (m) en el río Amazonas.

Calibración del modelo

Se realizaron varias simulaciones de régimen de flujo no permanente para determinar la calibración de los ríos Marañón, Ucayali y del modelo bidimensional. Se desarrolló un modelo hidrodinámico bidimensional para comprender y cuantificar el proceso de inundación en la RNPS, teniendo en cuenta como condiciones de borde en los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya y Samiria hidrogramas de caudales interpolados del año hidrológico 2018-2019. Se usó el solver de “Diffuse Wave” (Onda difusiva) debido a que a la escala de la zona de estudio es a nivel regional; en la cual, se desprecian los modelos de turbulencia y efecto Coriolis, otro motivo por la elección del “solver” fue porque la RNPS tiene una pendiente plana o llana y no cuenta con estructuras hidráulicas de gran envergadura en el cauce de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali.

La calibración de un modelo de volúmenes finitos (modelo matemático de HEC-RAS) es un proceso cuyo objetivo es afinar el modelo matemático del proceso de inundación en el programa HEC-RAS que refleje el comportamiento del proceso de inundación observado y los parámetros de calibración fueron los coeficientes de Manning de los ríos Marañón y Ucayali para determinar las elevaciones de los niveles del río.

Flora y fauna en la Reserva Nacional Pacaya Samiria

Las especies de flora y fauna en la RNPS dependen mucho de los humedales que este presenta, como las especies migratorias como las aves, especies amenazadas y especies endémicas que son cobijadas y protegidas en estas mismas. Una de las funciones de estos grandes humedales es en el

control de las inundaciones, actuando como esponjas absorbiendo el agua de las lluvias y de las crecientes de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali, que a su vez se infiltra lentamente a través del suelo y de la vegetación.

También se desempeñan como importantes sumideros de carbono cumpliendo un rol fundamental en la adaptación al cambio climático, amortiguando el efecto de las tormentas e inundaciones; y como filtrador de sustancias tóxicas en los cuerpos de agua.

Para determinar el impacto de la inundación fluvial con la diversidad de flora y fauna se acoplaron los resultados del modelamiento bidimensional con la cobertura vegetal y geomorfología de la zona de estudio; y se analizaron las conectividades hidrodinámicas hacia la Reserva en la zona de mayor productividad pesquera en el transcurso del año hidrológico 2018-2019.

RESULTADOS

Flora y fauna en la Reserva Nacional Pacaya Samiria

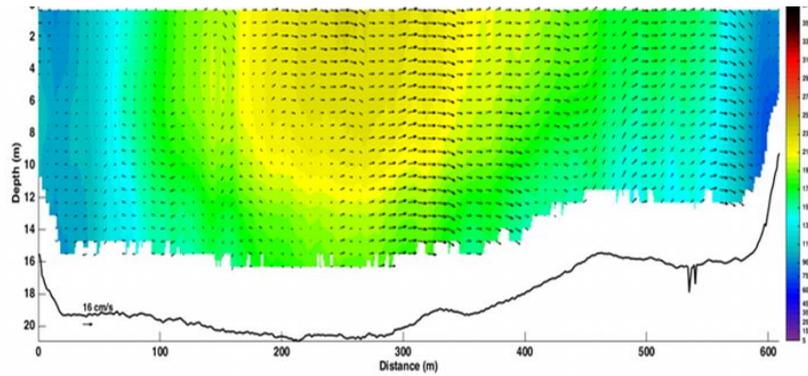
El CITA-UTEC realizó el estudio de caracterización fluvial de la RNPS, a partir de lo cual se determinó la extensión espacial del área de la llanura de inundación de la reserva y la delimitación del dominio computacional. Se determinó el ciclo de las inundaciones y su distribución espacial en el área de la llanura de inundación de la reserva. Se emplearon datos meteorológicos, climáticos e hidrológicos de la base de datos libre del SENAMHI, los cuales pasaron por los procesos de completación y análisis de datos para poder obtener los datos visuales y cuantificables de los regímenes hidrológicos en la RNPS.

El área del dominio computacional es de 34754.704 km² con un perímetro de 829.398 km conteniendo 322782 celdas con un conjunto máximo de 125577 en un área máxima de 4338197.70 m², mínimo de 2458.15 m² y un promedio de 119526.50 m² y para las áreas de refinamiento que abarca los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Tigres, Tapiche, Pacaya y Samiria cuenta con un área total de 2158.71 m² y un perímetro de 4132.50 km.

También, se crearon “Breaklines” para diferenciar el cauce de la llanura de inundación en el dominio, contando con un perímetro total de 3057.30 km. Con respecto a la batimetría, se trabajó con datos de los años 2014, 2018 y 2019 para interpolar la batimetría de los ríos Ucayali, Huallaga y Marañón en todo el dominio del modelo (figura 6 y figura 7), estos datos registrados por el ADCP fueron procesados con el programa WinRiver y VTM como parte de una extensión de MATLAB sin necesidad de contar con licencia de esta misma. Estas secciones transversales también fueron empleados para la curva de calibración Caudal - Nivel.

Figura 6

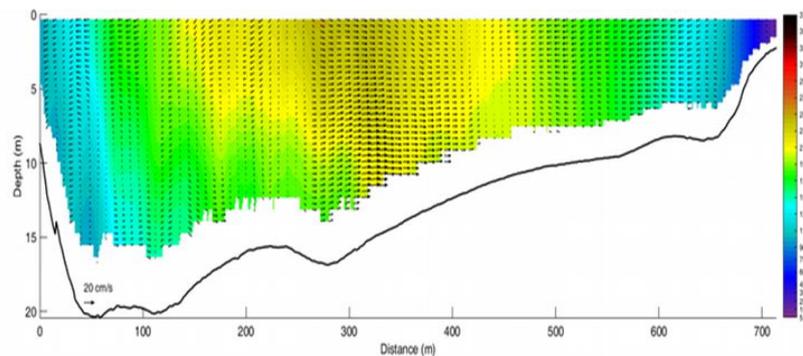
Magnitud de velocidad con la distribución del flujo secundario (cm/s) en la sección transversal del río Marañón, registrada el 18/01/19



Fuente: CITA-UTEC, 2019

Figura 7

Magnitud de velocidad con la distribución del flujo secundario (cm/s) en la sección transversal del río

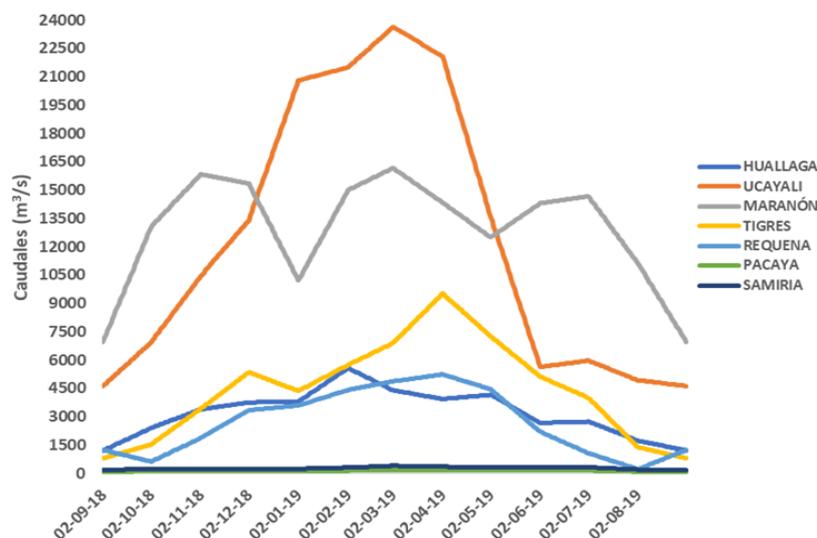


Para la calibración de la curva caudal - nivel como condiciones de borde de entrada de caudales para el modelo, se utilizaron tanto los caudales como las secciones transversales medidos por el ADCP en las campañas del CITA-UTEC en el año 2019. Los niveles de agua del año 2019 registrados por las estaciones hidrométricas, se utilizaron para calibrar con los caudales medidos y así

obtener la curva de calibración caudal (medición)-nivel (SENAMHI). Además de los caudales registrados, también se usaron las velocidades y profundidades promedio; y batimetría. Los resultados de la calibración de Caudal - Nivel se muestran en la figura 8, obteniéndose la interpolación de caudales para los ríos Ucayali, Marañón, Huallaga, Tigres, Pacaya, Samiria y Tapiche.

Figura 8

Interpolación de caudales con la curva de calibración curva - nivel



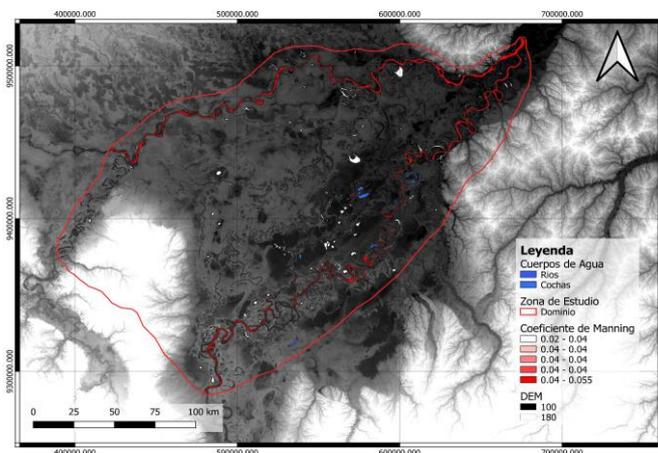
Se define a la llanura de inundación desde el área de geomorfología como un terreno con composición de material depositado no consolidado, proveniente del transporte de sedimentos de los ríos, además el comportamiento hidrológico del terreno conlleva a inundaciones temporales y cíclicas (Schmudde, 1968).

La calibración de los ríos estudiados, Ucayali y Marañón, para la obtención del coeficiente de Manning para cada río, se logró por medio de la comparación de los niveles de agua de la simulación con los niveles de agua transformados a elevaciones con la ondulación geoidal EGM96 de las estaciones del SENAMHI. La calibración para el río Marañón para la fecha del 15 de enero para caudales

máximos como condición de borde de entrada en el dominio computacional, obteniéndose un valor de 101.96 m de los 101.973 m medidos y para la calibración para el río Ucayali alcanzando un valor de 106.341 m de los 106.718 m medidos. En la calibración se obtuvieron los valores de 0.04 para el río Marañón y Ucayali, esta calibración se realizó a través de la comparación de los niveles de agua transformado en elevaciones para el mes de evaluación (23 abril 2019), en donde se tuvo una diferencia menor al medio metro y este valor estaría validada para una modelo a nivel regional como lo es para la RNPS. Los valores de coeficientes de Manning en el dominio computacional se muestran en la figura 9.

Figura 9

Valores de los coeficientes de Manning para los ríos y cochas



En la figura 10 se muestra la simulación hidráulica e hidrodinámica en el tiempo “0 días” como mínima inundación y en la figura 11 en el tiempo “213 días” como máxima inundación a nivel de toda la Reserva; y en las zonas de mayor interés es en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, esta zona está altamente conectada entre sí por cochas y canales, que en épocas de crecida se llega a observar una alta conectividad lateral (inundación

por los ríos). También, se aprecia la recarga de estas cochas y como estas se conectan hacia los demás canales y ríos colindantes dentro de la Reserva. Con respecto a los niveles de agua, se muestra que los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali se encuentran entre los 10 m a 30 m de profundidad, esta última; se registran cercano a la confluencia del Marañón y Ucayali que dan origen al río Amazonas.

Figura 10

Simulación mínima en la RNPS

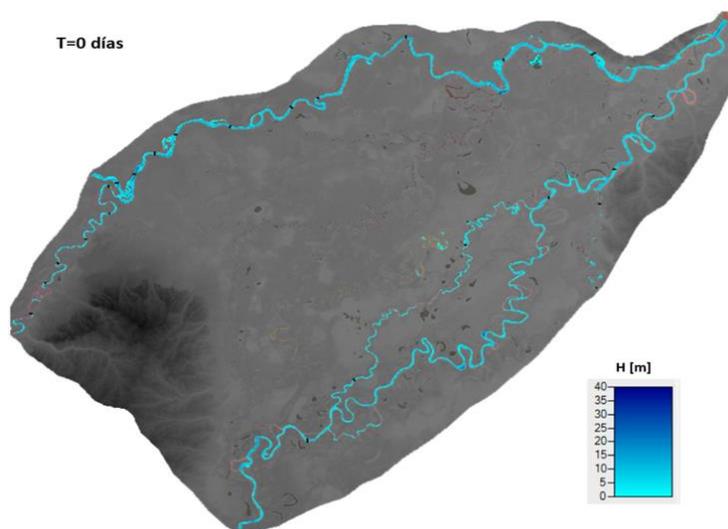
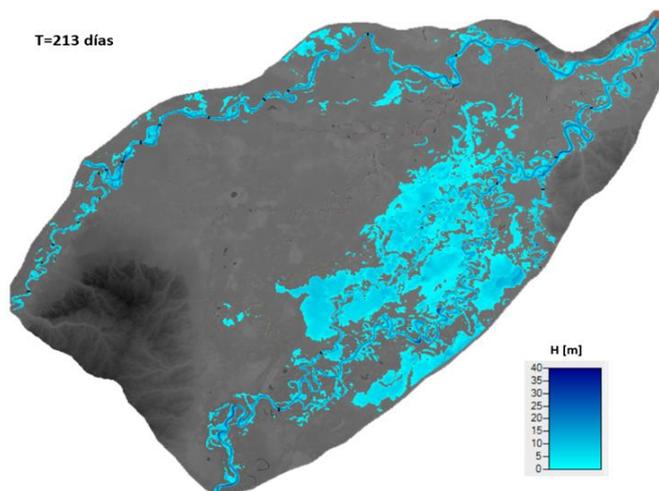


Figura 11

Simulación máxima en la RNPS



Según los resultados como se muestran en la figura anterior se llegan a concluir que la mayor conectividad lateral (tiempo de llegada más rápido con mayor duración) se da desde los ríos Puinahua y Ucayali hacia la llanura de inundación, también; la mayor área de inundación se localiza en la subcuenca del Pacaya, la cual está altamente correlacionada con las características geomorfológicas en la RNPS, y por otro lado; la mayor afluencia localizada a la llanura de inundación es causada por el desbordamiento de las riberas del Puinahua.

Con respecto a la estabilidad del modelo, el número de courant para una simulación hidráulica e hidrodinámica para la máxima inundación, Los valores tienen un rango de 0 a 5 debido a que se usó el “solver” de onda difusiva y esta se resuelve de forma implícita, por lo que se muestra menores valores de courant en la llanura de inundación y mayores valores en los ríos, esto puede deberse al tamaño de las mallas, el paso del tiempo y por qué los ríos fueron interpolados con batimetría escasa. El error generado en la simulación del modelo bidimensional calibrado obteniendo un valor mucho menor al 1%, siendo un modelo estable.

Se puede apreciar que la mínima inundación se encuentra entre los meses de septiembre a noviembre y para la máxima

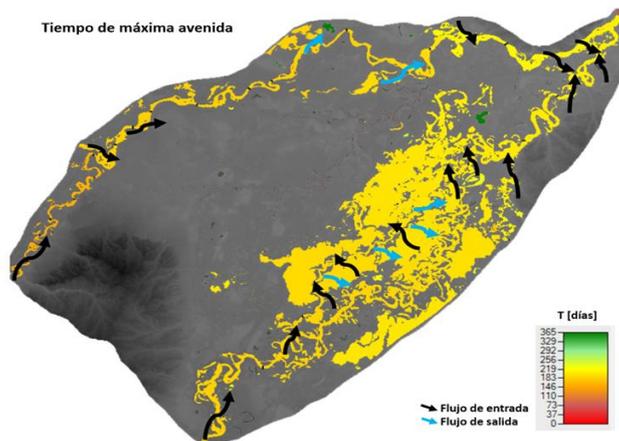
inundación entre los meses de enero a abril y el porcentaje de inundación con respecto al área total del dominio establecido, en donde la máxima inundación es del 19% del área total del dominio computacional.

Rutas de conectividad

De acuerdo con Junk et al. (1989) los ríos son los responsables de la diversidad de hábitats y el enriquecimiento de los suelos, gracias al transporte de sedimentos y el procesos de erosión lateral, conllevando a una alta diversidad de especies de flora y fauna; por tal motivo, en la figura 12 se representa a nivel gráfico la conectividad lateral a través de la simulación hidráulica e hidrodinámica del dominio, las flechas de esa figura muestran la trayectoria del flujo (conectividad lateral) entre los ríos y la llanura de inundación, donde las flechas de color negro son las direcciones de entrada para los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali hacia la Reserva; también se puede observar las de flechas azules son las de salida de la Reserva hacia los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali por parte de los ríos Pacaya y Samiria. También muestra el tiempo máximo que tarda una celda en mojarse. Los valores más pequeños significan que la celda se inunda antes que las celdas que tienen valores de tiempo de llegada mayores.

Figura 12

Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo



Flora y fauna en la reserva

Las inundaciones en planicies aluviales con grandes extensiones son procesos que contribuyen al enriquecimiento de la biodiversidad. A través del transporte de sedimentos y los procesos de erosión y deposición se genera la formación islas, lagunas, canales laterales y canales inactivos, entre (Ringuelet, 1963; Neiff, 1981). Con

respecto a la duración e intensidad de las inundaciones, son factores que permiten las adaptaciones en la fisonomía vegetal concadenando la diversidad de hábitats de la fauna silvestre (Bó y Malvárez, 1994). En la figura 13 y figura 14 se acoplaron los resultados del modelamiento hidrodinámico con la cobertura vegetal y geomorfología de la zona de estudio (dominio computacional) respectivamente.

Figura 13

Inundación fluvial máxima con un área incluyendo los ríos de 14604.59 km² acoplado al mapa de cobertura vegetal

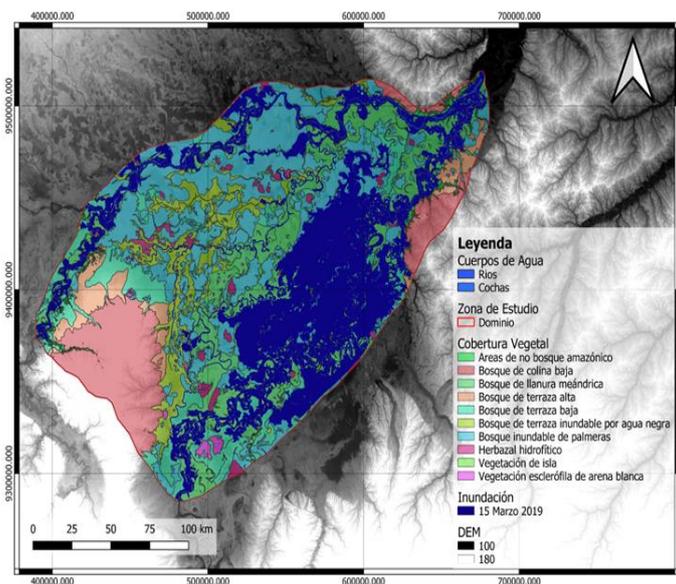
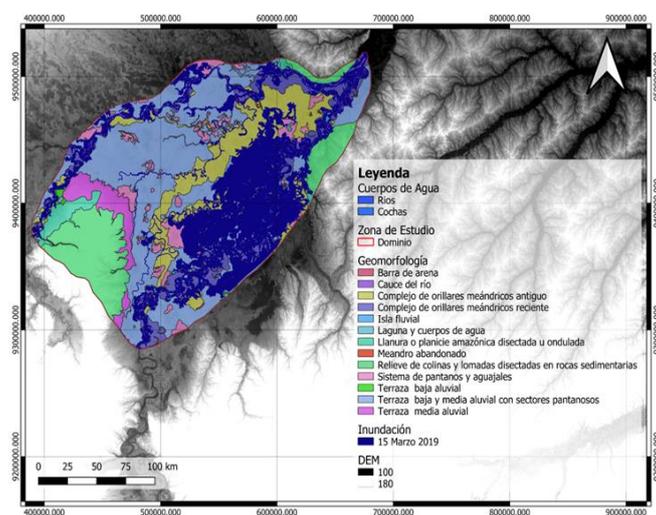


Figura 14

Inundación fluvial máxima con un área incluyendo los ríos de 14604.59 km² acoplado al mapa de geomorfología en el dominio computacional



Los ciclos típicos de inundación favorecen la existencia de una alta diversidad ecológica en la RNPS por lo que la relación existente entre la migración de la fauna se relacionaría las áreas de mayor inundación con las limitaciones de movilidad de las especies terrestre, pero con las especies que no tienen esta limitante guardarán relación con los niveles registrados en estas zonas y en toda la Reserva. Por otro lado, los pobladores realizan la actividad de pesca principalmente en las áreas cercanas a sus comunidades, adyacentes al río Pacaya con previa

obtención de la autorización de ingreso en el Puesto de Vigilancia del SERNANP y en el canal del Puinahua. En épocas de crecientes también pescan en los caños, debido al incremento de los niveles de agua. Con respecto a la conectividad biológica con los ciclos de inundabilidad, en la figura 15, figura 16 y figura 17 se observan las inundaciones fluviales durante el año hidrológico 2018 - 2019 cerca de las áreas de pesca para las especies de cahuara, zúngaro mota, boquichico y carachama.

Figura 15

Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de octubre del 2018

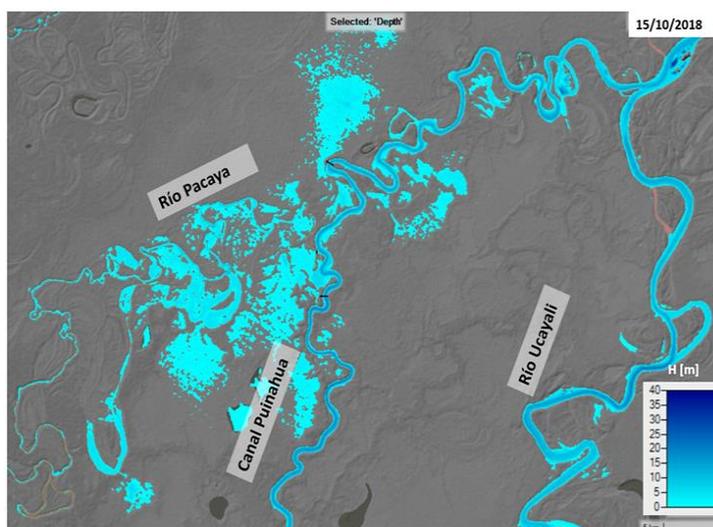


Figura 16

Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de enero del 2019

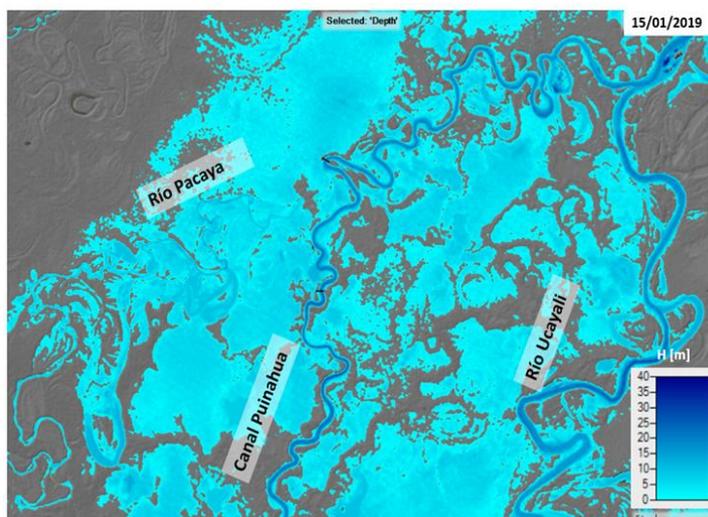
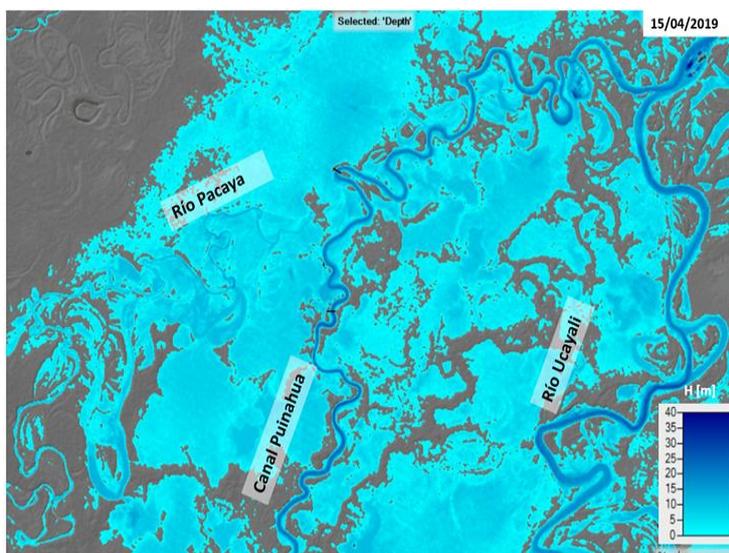


Figura 17

Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de abril del 2019



Para la simulación del mes de julio del 2019 se observa un gran descenso de la inundación y esto está relacionado con el ciclo hidrológico encontrándose en la época de vaciante para el río Ucayali.

Por otro lado, la topografía obtenida sobreestima la elevación debida a la densa vegetación, esto afecta en el cálculo del DEM y por ende en el proceso de simulación de la inundación.

La caracterización de las áreas inundadas y las no inundadas podrían ser más precisas si se tuviesen mayor cantidad de datos y si se tuviese mayor rango de tiempo de análisis.

El análisis predictivo de inundación y la dinámica entre el cauce y la llanura aluvial se emplearán como línea base para diferentes estudios que requieran datos de la hidrodinámica de la zona, proporcionando datos cuantitativos de las características físicas de los ríos.

Las simulaciones pudieran describir y relacionar como las épocas de vaciantes y crecientes están relacionadas con los ciclos reproductivos de las especies de peces como el boquichico, llambina, carachama y zúngaro mota en las zonas de pesca mostrados en el boletín de WCS (2017) sobre el recurso pesquero en la cuenca del Pacaya.

Por otro lado, una investigación realizada en la RNPS (SERFOR, 2017), el caimán blanco (*Caimán crocodylus*) es afectado por los ciclos de bajo caudal y niveles extremos mínimos de agua; por otro lado, el caimán negro (*Melanusuchus niger*) es una especie más adaptativa y no se ve muy afectado por dichos eventos.

La caída de la abundancia de caimanes blancos se debió a que migraron hacia áreas aisladas, buscando zonas de caudales estables.

Cuando iniciaron las temporadas de inundación, dicha especie retornó a su área habitual dentro de la reserva (Bodmer, et al., 2013).

DISCUSIÓN

En el modelo bidimensional se consideró caudales de entrada como condiciones de borde para los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Tigres, Tapiche, Pacaya y Samiria que fueron interpolados y calibrados (relación caudal – nivel) con los datos de caudales recolectados en campo en el 2018 y 2019 por parte del CITA-UTEC y con los datos de niveles de agua de las estaciones hidrométricas de Contamana, San Lorenzo, Lagunas, San Regis y Requena. Siendo únicamente de carácter hidrodinámico, debido a que no se consideró los aportes por escorrentías directa producto de las precipitaciones aguas arriba y en la zona de estudio. Adicionalmente, los datos topográficos obtenidos a nivel satelital (DEM) tienden a sobreestimar la elevación por la densa vegetación, lo que afecta la conectividad lateral en la simulación.

La determinación de las áreas inundadas y no inundadas en la simulación depende de la temporalidad y cantidad de datos. Por lo que, el ciclo de inundaciones entre los ríos, cochas y llanura de inundación son datos útiles de

caracterización física ambiental para futuros estudios bioquímicos y geomorfológicos que requieren información hidrodinámica detallada.

En los informes de Wildlife Conservation Society (WCS) sobre los recursos pesqueros señalan la alta relación de la conectividad de los ríos con las cochas, debido a que, diversas especies de peces de uso comercial, consumo y ornamentales están relacionadas con sus ciclos reproductivos, dando hincapié a una relación directa con los niveles de agua en la reserva que conectan con cochas y así con los ríos grandes como el marañón, huallaga o al canal de puinahua como se muestran en la figura 18 (Wildlife Conservation Society - WCS, 2017).

También, mencionan la relación con el transporte de sedimentos y nutrientes hacia la reserva con funciones ecosistémicas adicionales a medida que la vegetación crece en nuevos sustratos y los sistemas acuáticos se someten a la sucesión llegando a la conclusión de que Muchos movimientos migratorios se sincronizan con el pulso de inundación de los ríos (Wildlife Conservation Society - WCS, 2017).

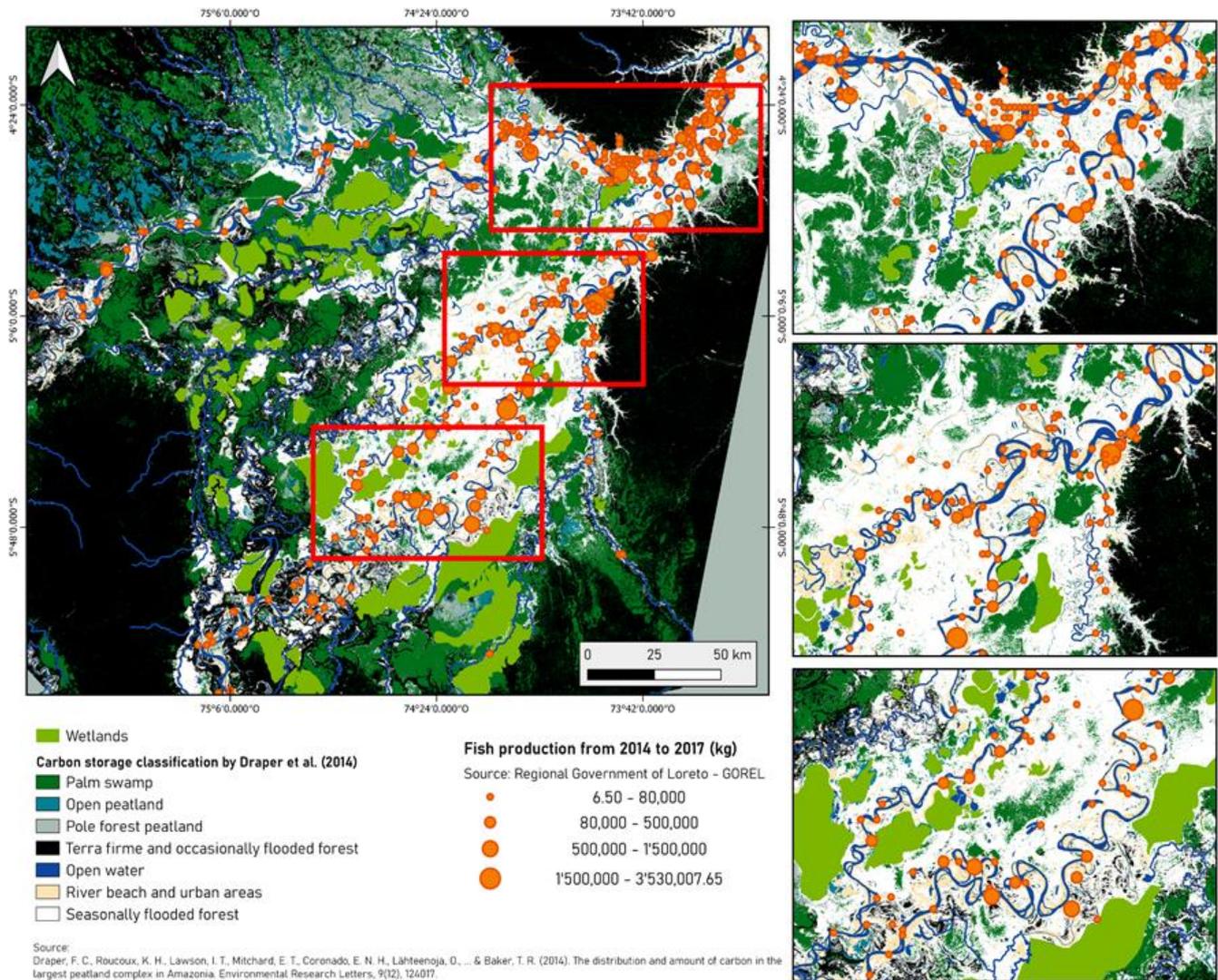
La conectividad de ecosistemas acuáticos, dentro de la cuenca y entre las cuencas, es determinada por el régimen de flujo y es una característica fundamental de los ríos amazónicos.

El régimen de flujo mantiene la conectividad entre las cabeceras y la desembocadura (a otra cuenca o al mar), y entre el canal principal y el bosque adyacente en la planicie de inundación (sistema de cochas) (Junk y Wantzen, 2004).

En la cuenca amazónica, las migraciones están íntimamente relacionadas con las fluctuaciones estacionales del régimen hidrológico (Goulding, 1980; Junk et al., 1989; Wildlife Conservation Society - WCS, 2017).

Figure 18

Fishery production in the Pacaya Samiria National Reserve during 2014 and 2017 and the carbon storage classification (obtained from Draper et al. 2014). Source of fishery production: Regional Government of Loreto



La RNPS se destaca por sus características hidrográficas y su dinámica fluvial, se identifica por su variedad en su sistema de ríos, cochas y sus diferentes cuerpos de agua. Además, presenta bosques inundables, que, en estaciones de creciente del nivel de agua, se cubren de las aguas de río, entre los meses de octubre y abril; por otro lado, su época de vaciante se da entre los meses de mayo y septiembre. Este ecosistema tiene un clima de la clasificación de bosque húmedo tropical, con una temperatura media anual entre 20. 1° C a 33. 1° C. No se define una estación seca debido a la variación en la distribución anual de precipitaciones (Marengo, 1998).

De acuerdo con la clasificación empleada por el CDC, UNALM (1993), “las formaciones más importantes para la RNPS por su extensión son los bosques inundables (26.7%) y los aguajales (densos 27.2% y mixtos 9.9%). La Reserva alberga 965 especies de plantas silvestres y 59 de plantas cultivadas, agrupadas en 559 géneros y 132 familias, y provee de importantes especies de valor para la alimentación, construcción, artesanía, leña y medicina”; la importancia de la RNPS es su diversidad en flora y fauna,

donde destaca las extensas áreas ocupadas por “Aguajales” (*Mauritia flexuosa*) encontrándose en asociación con “huasái” (*Euterpe precatoria*) (Kalliola, 1993). Así mismo, el autor Kahn (1991) realizó un estudio sobre los aguajales donde define a los bosques de aguajal como palmerales que habitan las áreas inundadas, y se ubican paralelamente al lecho del río y tienen afinidad por los suelos con sustrato arcilloso.

Las zonas de amortiguamiento son espacios para dar seguridad y generar una transición entre un área que se gestiona para conservarla, con los espacios que están fuera de ella y que podrían tener distintas modalidades e intensidades de uso. La Ley de áreas naturales protegidas define a las zonas de amortiguamiento como «aquellas zonas adyacentes a las áreas naturales protegidas del sistema, que por su naturaleza y ubicación requieren un tratamiento especial para garantizar la conservación del área protegida. El plan maestro de cada área definirá la extensión que corresponda a su zona de amortiguamiento. Las actividades que se realicen en las zonas de amortiguamiento

no deben poner en riesgo el cumplimiento de los fines del área natural protegida» (Solano et al., 2020).

Hess et al., 2015 muestra la relación entre cobertura vegetal y su variación con respecto al régimen de inundación para los ciclos hidrológicos máximos y mínimos. Se muestra de color celeste y blanco las áreas de inundación.

También se observa la variación de la especie de vegetación predominante, para época seca se encuentran arbustos no inundables y en época húmeda, macrófitas. También, se observa la conectividad de los cauces abandonados y cochas (oxbow lakes) con el cauce principal y sus afluentes.

En la región amazónica, las variaciones del nivel de agua que superan el nivel máximo típico es un fenómeno muy recurrente.

El aumento de los procesos erosivos en la parte alta de las cabeceras de cuencas genera el aumento en la carga de sedimentos en las aguas de la red de drenaje; las cuales, cuando llegan a la zona baja, producen inundación de las terrazas estacionales, donde se realizan actividades agrícolas. Uno de los ríos que más se caracteriza por presentar este fenómeno es el Marañón (MINSA, 2011 - PALMER MURGA).

La fauna amazónica y su sostenibilidad están relacionada con la variación en el nivel de agua. El estudio de Bodmer, et al. (2013), Analiza la relación de la variación del nivel en el agua y su afectación a los delfines de río, es así como el estudio brinda datos de la sequía en el año 2010 que provocó la migración de los delfines del río Samiria provocada por la disminución en el tamaño de peces, que a su vez tiene relación con la disminución del flujo en los ríos y el transporte de nutrientes.

En contraste a dicho evento; en el año 2012 se analizaron eventos de crecidas del río, correlacionado con datos de las poblaciones de peces, identificación de especies y número de población de delfines. También, podemos afianzar los resultados donde se correlaciona las variaciones en los niveles de agua y su impacto en la fauna amazónica.

El impacto que se obtiene en las poblaciones de delfines durante eventos de crecidas o sequías son indicadores de la vulnerabilidad de la fauna frente a los eventos hidrológicos y como su relación ecosistémica depende de la variación de los flujos de agua. (Bodmer, et al., 2013).

El análisis de poblaciones de peces también es un indicador de la vulnerabilidad de las especies acuáticas y su relación con la variabilidad en los flujos de agua en los ríos de la llanura amazónica.

Una variación tangible se dio en el año 2011 donde se pudieron ver la disminución de poblaciones de peces acarreada por la sequía del año 2010. En el año 2012 se observó una recuperación en el número de peces, que retornaban a una población normal luego del evento de crecientes de cauce extremos por dos años (Bodmer, et al., 2013).

Los impactos ocasionados por el aceleramiento del calentamiento global, las industrias extractivas y la expansión de las actividades humanas sobre territorio de conservación, son un desafío para la conservación de las áreas naturales y de las comunidades que alberga. Los cambios en los niveles del agua se están volviendo cada vez más evidentes, incluidas las sequías extremas y las inundaciones persistentes más severas (Bodmer, et al., 2013).

Otra especie de análisis en el estudio de Bodmer, et al. (2013) son los caimanes, ya que se relaciona con los diferentes recursos alimenticios como aves, mamíferos, peces, reptiles e insectos.

Su importancia ecosistémica y relación con la variación de los ríos, radica en que los caimanes usan los hábitats acuáticos y terrestres requiriendo de la disponibilidad de dichas áreas para desarrollarse y migran cuando ocurren eventos extremos de variación en el nivel de agua.

El autor Bodmer (1989) concluyó que las dos especies mencionadas experimentan una alteración en su conducta alimentaria entre la estación seca y la estación alta.

La alimentación del ciervo colorado en época seca tuvo una proporción mucho mayor de consumo de frutas que la dieta en la época alta; se encuentra un patrón similar para el cuello bovino y la extensión de la inundación del bosque será un limitante para poder acceder a estos frutos (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Las inundaciones afectan a diversas especies como los mamíferos terrestres, roedores, ungulados y edentados, entre otros. Estas especies se ven afectadas por la variación en los regímenes de inundación, ya que eventos extremos disminuyen las áreas de hábitat terrestre y reduce los corredores ecológicos.

Por otro lado, las especies acuáticas como el bufeo colorado (*Inia geoffrensis*) y el bufeo gris (*Sotalia fluviatilis*) se ven beneficiados en su hábitat, ya que pueden acceder a zonas ricas en nutrientes y mayor cantidad de peces (SERFOR, 2017). Sumado a las variaciones cíclicas de los niveles de agua; la dinámica fluvial, modifica las formas fluviales y genera diferentes tipos de hábitats donde se desarrollan la gran diversidad de flora y fauna, que evolucionan en el tiempo.

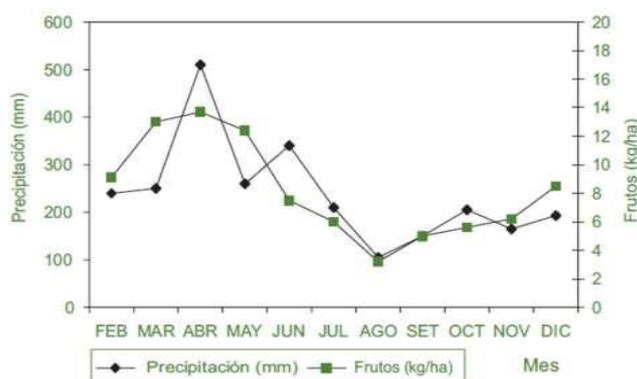
El resultado es un mosaico de ecosistemas ricos en nutrientes, que otorga a los organismos el hábitat para su desarrollo (Pouilly, 2004).

Una investigación de Arboretum Gennaro Herrera, observó los estados morfológicos de la especie, encontrando que el mayor número de las plantas suelen florecer entre los meses de julio y octubre, entre la época más seca y la época con aguas bajas.

En la figura 19 se muestra el resultado de la cantidad de frutos y entre marzo y mayo se produjo la mayor cantidad, siendo en los meses de mayor precipitación (*Iryanthera tricornis*) (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Figura 19

Comparación entre la precipitación y la producción de frutos mensual basado en el peso de frutos, semillas y cáscaras



Fuente: Garber, 1993

El estudio de la relación de eventos extremos que afectan los flujos de los ríos y su relación con la vulnerabilidad ecosistémica, son analizados en diferentes puntos del planeta, es así que el estudio de Roberto F., A. Malvárez (2000) menciona que los eventos extremos, definido como tal, por la elevación del nivel de agua y la permanencia prolongada del evento, generan cambios en el régimen hidrológico en la zona y tienen impacto en la flora y fauna.

CONCLUSIONES

Se desarrolló el modelo bidimensional de las inundaciones fluviales en los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali en la llanura de inundación de la RNPS para el año hidrológico 2018 – 2019.

En donde el modelo bidimensional permitió describir el proceso de inundación guardando relación con la biodiversidad, los ciclos reproductivos, rutas de migración y de alimentación de la fauna; y sucesión ecológica relacionada con la dispersión y diversidad de flora por la aportación de sedimentos y nutrientes de cada río. Se encontró que en épocas de inundación hay mayor migración de peces de la Reserva hacia los ríos y viceversa, beneficiando la actividad pesquera artesanal; la movilidad de la fauna terrestre se ve restringida a diferencia de la fauna subacuática; y la fauna acuática se ve beneficiada al tener mayores canales de conexión; por último, la dinámica del ciclo hidrológico presenta un alto impacto en la diversidad y dispersión de las especies de flora.

El modelo bidimensional predijo el proceso de inundación mediante las rutas de descarga y conectividad lateral del río Hualla, Marañón y Ucayali hacia la Reserva Nacional Pacaya Samiria para el periodo 2018-2019; identificado las máximas y mínimas extensiones de áreas de inundación y elevaciones de los niveles máximos y mínimos de los ríos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ADCP. (2018). Medición de caudal por el método acústico doppler (ADCP) – avanzado. [En línea]: Universidad Estatal Paulista - UNESP

[2] Bodmer, F., Tula, P., Antunez, M., Bodmer, K. C. (2013). Cambio climático y fauna silvestre en la

Amazonía peruana. Impacto de la sequía e inundaciones intensas en la Reserva Nacional Pacaya Samiria. 10.13140/2.1.3954.7685.

<https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas/30.pdf>

- [3] Bó, R., & Malvárez, A. (1999). Las inundaciones y la biodiversidad en humedales. Un análisis del efecto de eventos extremos sobre la fauna silvestre. Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica. Laboratorio de Ecología Regional, Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 147-168. http://server.ege.fcen.uba.ar/gieh/PDF_MIOS/Rober_mab.pdf
- [4] CDC-UNALM. 1993a. Evaluación ecológica de la Reserva Nacional Pacaya Samiria. Fase I. Fundación Peruana para la Conservación de la Naturaleza-The Nature Conservancy. Employment and Natural Resources Sustainability Project. Lima, 74 p. + 17 apéndices.
- [5] Chow, V. (1994). Hidráulica de canales abiertos. California Spanish Books. McGraw-Hill. No. TC175.C6818. https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS
- [6] CITA-UTEC. (2021). Ríos danzantes Guías metodológicas para el desarrollo de línea base física de los ríos en Andes-Amazonia. Universidad de Ingeniería y Tecnología. Lima, Perú. ISBN: 978-612-48794-0-1
- [7] Eaton, B. C., Andrews, C. A. E., Giles, T. R. y Phillips, J. C. (2010). Wildfire, morphologic change and bed material transport at Fishtrap Creek, British Columbia. *Geomorphology*, 118(3-4), 409-424. Doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.008
- [8] Galarza, E. (2017). Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2017 – 2021. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ministerio del Ambiente. 154 p. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/509828/RP_273-2017.pdf

- [9] Garber, P. 1993. Seasonal patterns of diet and ranging in two species of tamarin monkeys: Stability versus variability. *International Journal of Primatology*, 14(1):145-166
- [10] Goulding, M. 1980. *The Fishes and the Forest, Explorations in Amazonian Natural History*. Univ. of California Press, Berkeley, 280 pp.
- [11] Hernandez, N. (2016). Aproximación metodológica para la valoración de la incertidumbre en la parte alta de las curvas de calibración de caudales líquidos. Maestría en Ingeniería Énfasis en Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Tecnológica de Bolívar. <https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/1639/0068928.pdf?sequence=1>
- [12] Hess, L.; Melack, J.; Affonso, A.; Faria, C.; Gastil, G.; Novo, E.; Novo, M. (2015). Wetlands of the Lowland Amazon Basin: Extent, Vegetative Cover, and Dual-season Inundated Area as Mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar.
- [13] HYPACK a xylem brand. (2020). “Manual del Usuario HYPACK”. https://www.hypack.com/File%20Library/Resource%20Library/Manuals/2021/HYPACK-2021-User-Manual_SP.pdf
- [14] Kalliola, R.; Puhakka, M.; Danjoy, W. (1993). Amazonía peruana : vegetación húmeda tropical en el llano subandino. Universidad de Turku, ONERN, FINNIDA. Bibliografía : p. 251-265.
- [15] Junk, W. J., P. B. Bayley, R. E. Sparks. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems, p. 110-127. In D. P. Dodge [ed.] *Proceedings of the International Large River Symposium*. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 106.
- [16] Pouilly, M., Beek, M., Moraes, R., Ibañez, C. (2004). Diversidad biológica en la llanura de inundación del Río Mamoré. Importancia ecológica de la dinámica fluvial. Centro de Ecología Simón I. Patifio, Santa Cruz, Bolivia. 383 p. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-05/010036904.pdf
- [17] Marin, J., Flores, G., Abad, J. D. (2020). Similarities and differences between meandering and anabranching rivers. AGU Fall Meeting 2020
- [18] Marengo, J. A.; Tomasella, J., & Uvo, C. R. 1998. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru. *J. Geophys. Res.* 103 (D2): 1775-1783. doi: 10.1029/97JD02551
- [19] Fang, L., Nowak, G., Neill, T.J., Welsh, A.H. (2014). CUTOFF: A Spatio-temporal imputation method. *Journal of Hydrology* 519 (2014) 3591–3605
- [20] OSPPA “LOS JAGUARES”. (2014). Programa de manejo pesquero de la especie, arapaima gigas, en la zona de yarina - cuenca pacaya-rnps 2014 – 2018. ProNaturaleza - Iquitos.
- [21] Park, E., Latrubesse, E. M. (2017). Remote sensing and field control assessed the hydrogeomorphologic complexity of the lower Amazon River floodplain and hydrological connectivity. *Remote Sensing of Environment*, 198, 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.021>
- [22] Roberto F., A. Malvárez. (2000). Las inundaciones y la biodiversidad en humedales. un análisis del efecto de eventos extremos sobre la fauna silvestre. Laboratorio de Ecología Regional, Departamento de Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. http://server.ege.fcen.uba.ar/gieh/PDF_MIOS/Rober_mab.pdf
- [23] Schumde, T.H. "Floodplain" in R.W. Fairbridge, *The Encyclopedia of Geomorphology* (New York: Reinhold, 1968), pp. 359-362.
- [24] Serfor. (2017). Mapa de vulnerabilidad de ecosistemas y hábitats críticos frente al cambio climático de la Amazonía peruana. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. Departamento de Loreto. http://www.serfor.gob.pe/programaforestal/wpcontent/uploads/2018/10/1_INFORME-NACIONAL_MAPA-DEVULNERABILIDAD-DE-ECOSITEMAS.pdf
- [25] Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas - Jefatura de la Reserva Nacional Pacaya Samiria. (2009). Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2009 – 2013. Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Peru N° 2009-15094. ISBN: 978-612-45650-1-4. https://old.sernanp.gob.pe/sernanp/archivos/biblioteca/publicaciones/RN_Pacaya/Plan%20Maestro%202009-2014%20RN%20Pacaya%20Samiria%20ver%20pub.pdf
- [26] Soini, P. 1986. A Synecological study of a primate community in the PacayaSamiria National Reserve, Perú. *Primate Conservation*. 7: 63-71.
- [27] Vásquez, P. y C. Tovar. 2007. La fauna silvestre en la Reserva Nacional Pacaya Samiria: Una guía para el manejo comunal. Centro de Datos para la Conservación – Universidad Nacional Agraria La Molina / ProNaturaleza / The Nature Conservancy / USAID. Lima, 120 p.
- [28] Wild Conservation Society. (2017). El recurso pesquero en la cuenca del Pacaya. D&S GRAF AMAZONIA E.I.R.L. Iquitos, Perú. <https://library.wcs.org/doi/ctl/view/mid/33065/pubid/DMX337760000.aspx>
- [29] Wilson, M., Bates, P., Alsdorf, D., Forsberg, B., Horritt, M., Melack, J., ..., Famiglietti, J. (2007). Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. *Geophysical Research Letters*, 34(15). https://escholarship.org/content/qt3t58v454/qt3t58v454_noSplash_d9dc46cee5d803f9afdca7780a361352.pdf?t=n0u9i6
- [30] US Army Corps of Engineers. (2022). “HEC-RAS User’s Manual.” <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>