

Análisis de la Extensión y Magnitud de las Inundaciones del Río Beni en el Municipio de Rurrenabaque aplicando Modelos IRIC y Validación con Imágenes Satelitales

Adrián Wilson Mamani C. ^a, Jhon Chura Ch. ^a

^o Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Unidad de Estudios e Investigación Hidrológica La Paz, Bolivia

Email: adrian.mamani@senamhi.gob.bo, jhon.chura@senamhi.gob.bo

Información	RESUMEN
Palabras clave Satelital Inundación Rurrenabaque	El presente estudio analiza la extensión y magnitud de las inundaciones en el municipio de Rurrenabaque, mediante el uso de herramientas avanzadas como el software iRIC v4 y su solucionador Nays2D Flood v5, diseñado para simular el flujo bidimensional del río Beni y su interacción con el entorno. Las simulaciones incorporan una variedad de datos como ser: información topográfica, características morfológicas del río, así como datos hidrológicos proporcionados Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) mediante el proyecto HYBAM. Este método permitió simular con precisión el comportamiento del flujo del río, identificando áreas más vulnerables y analizando los distintos escenarios o salidas del modelo empleado La validación de los resultados del modelo se llevó a cabo utilizando imágenes satelitales del Global Surface Water, La cual su interfaz se caracteriza por registrar las extensiones máximas en cuerpos de agua. Estas imágenes proporcionan un marco de referencia esencial para evaluar la precisión de las simulaciones, garantizando un análisis confiable. Además, el procesamiento de los datos de niveles del río Beni, recolectados en el municipio de Rurrenabaque, se realizó mediante Python y Google Colab. Estas herramientas permitieron manejar de forma eficiente grandes volúmenes de información, realizar análisis detallados y asegurar una alta precisión en los resultados obtenidos. En conjunto, este método combina datos observados, modelos numéricos y valida información satelital, lo que proporciona una comprensión más clara de los riesgos de inundación en el municipio.

1. Introducción

El municipio de Rurrenabaque, situado en la cuenca del río Beni, está expuesto a un alto riesgo de inundaciones debido a su ubicación geográfica y las características hidrológicas de la región. En los últimos años, diversos eventos de inundación significativos han afectado gravemente a esta zona, destacándose las crecidas ocurridas en 2011, 2014, 2015, 2018, 2019, 2020 y 2021, que han causado importantes

daños a las comunidades cercanas al río Beni. Afectando a los habitantes en las actividades económicas locales, principalmente en el sector agrícola y turístico. Estas inundaciones han resaltado la vulnerabilidad del municipio frente a inundaciones extremas, las cuales se ven agravadas por fenómenos de índole climática que son cada vez más recurrentes.

El cambio climático en el municipio de Rurrenabaque es consecuencia de diversas actividades humanas,

la deforestación y las quemas o chaqueos. Estas prácticas han generado alteraciones en las condiciones meteorológicas e hidrológicas, provocando problemas como sequías prolongadas. Sin embargo, en la época de lluvias, el impacto es aún mayor debido al incremento en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, lo que ha aumentado significativamente el riesgo de inundaciones en la región.

Además, el crecimiento de la población y la expansión de las actividades productivas, especialmente en los sectores agrícola y ganadero, han contribuido al avance de la deforestación. La conversión de bosques en áreas de cultivo y pastoreo ha reducido la capacidad del suelo para retener agua, agravando los efectos de las sequías y aumentando la vulnerabilidad a las inundaciones.

En la siguiente **Imagen 1** se muestra el nivel de deforestación a nivel nacional, donde el departamento del Beni, al que pertenece Rurrenabaque, se posiciona como el segundo más afectado después de Santa Cruz.

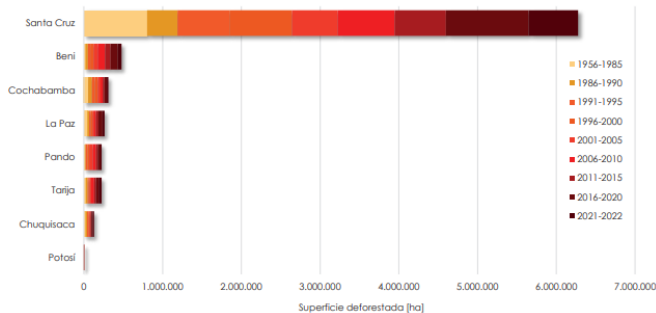


Imagen 1: Deforestación en los departamentos de Bolivia por periodos hasta el año 2022 (Deforestación en Bolivia (1956-2022)-Fundación Amigos de la Naturaleza)

La siguiente **Tabla 1** muestra el nivel de recurrencia que muestra el área de estudio.

MUNICIPIO	REC_INCENDIOS	REC_INUNDACION	REC_SEQUIAS
San Buenaventura	Alto	Alto	Alto
Rurrenabaque	Muy Alto	Muy Alto	

Tabla 1: Nivel de Recurrencia (VIDECI-2022)

Ante esta problemática, la implementación de modelos hidráulicos avanzados, como el software iRIC y su

solucionador Nays2D Flood, permite simular la dinámica del río Beni y predecir escenarios de inundación. Estos modelos, combinados con el análisis de imágenes satelitales de alta resolución como lo es Global Surface Water, ofrecen una herramienta poderosa para identificar áreas vulnerables y desarrollar estrategias de mitigación.

El presente estudio tiene como objetivo analizar la extensión y magnitud de las inundaciones en Rurrenabaque mediante modelos de simulación y validación con imágenes satelitales, integrando además datos hidrométricos, características morfológicas y topográficas. La importancia de esta investigación radica en la necesidad de fortalecer los sistemas de alerta temprana y diseñar medidas de adaptación que permitan reducir los impactos de futuros eventos extremos, contribuyendo a una gestión de riesgos más efectiva y sostenible en el contexto del cambio climático.

2. Descripción de la zona de estudio

El municipio de Rurrenabaque, situado en el departamento de Beni, Bolivia, forma parte de la cuenca hidrográfica del río Beni, una de las más importantes del país. Ubicado entre las llanuras amazónicas y las zonas cercanas a las montañas de los Andes, combina una riqueza ecológica excepcional con una alta vulnerabilidad a fenómenos hidrológicos extremos, como inundaciones.

La región presenta un clima tropical húmedo, con una temporada de lluvias entre noviembre y marzo. Durante este período, el caudal del río Beni y sus afluentes aumenta significativamente, provocando desbordes que afectan tanto a zonas urbanas como rurales. En eventos de inundación, grandes extensiones de terreno, especialmente en áreas urbanas y periurbanas como las urbanizaciones Isla Grande (Fases I, II y III), Los Cedros, Bibosi, Los Tajibos, La Siyaya, Los Ambaibos, así como los barrios Ciringal, Costanera, Real Beni y Asunción del Quiquibey, sufren daños graves en infraestructura, viviendas y servicios. Un ejemplo de esto es lo sucedido en febrero de 2019 en el municipio, como

se muestra en la **Imagen 2**.



Imagen 2: Familias afectadas por la crecida de ríos en Rurrenabaque (www.lostiempos.com)

Estas áreas, situadas en terrenos bajos, son especialmente vulnerables a las crecidas. Por su parte, el municipio vecino de San Buenaventura, en el departamento de La Paz, aunque se encuentra en una topografía más alta, también enfrenta afectaciones significativas. Las inundaciones impactan principalmente a la producción agrícola en las zonas bajas, reduciendo la capacidad de abastecimiento y generando pérdidas económicas. Además, las crecidas del río Beni interrumpen el tránsito fluvial, una vía fundamental de comunicación y comercio entre ambos municipios.

Por ejemplo, se presenta la **Imagen 3** que muestra el porcentaje de cultivos generados en el municipio.

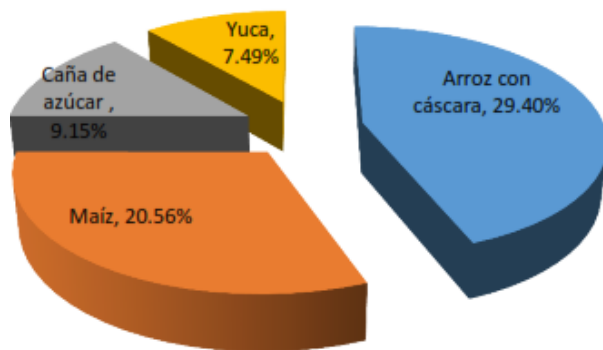


Imagen 3: Porcentaje de cultivos Anuales en relación del área total cultivada (PTDI GAM-San Buenaventura)

3. Metodología

La metodología utilizada para analizar la extensión y magnitud de las inundaciones en el municipio de Rurrenabaque se basa en un enfoque interdisciplinario que combina modelos hidrodinámicos, datos satelitales y herramientas geoespaciales. Este proceso se organiza en las siguientes etapas:

3.1. Recolección de Información

3.1.1. Datos hidrológicos e hidrométricos:

a) Niveles:

La información histórica de los niveles de agua recopilada de la estación automática hidrológica de propiedad del IRD, instalado estratégicamente en el puente que conecta los municipios de Rurrenabaque y San Buenaventura, permitió obtener registros continuos y precisos.

Estos datos fueron corroborados con las mediciones proporcionadas por la estación hidrológica convencional (reglas limnimétricas) ubicada en la Capitanía de Puerto Mayor de Rurrenabaque, asegurando así una mayor confiabilidad en los registros obtenidos.

El procesamiento de la información se realizó empleando herramientas como Python, para el análisis y la visualización de los datos, y Excel, para la organización y estructuración de las series temporales. Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión detallada de las dinámicas hidrológicas de la región, y se presentan en las figuras siguientes, destacando los patrones más relevantes de los niveles de agua durante eventos significativos.

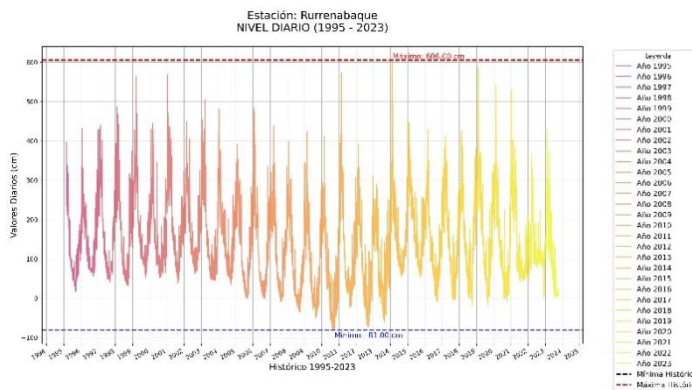


Figura 1: Niveles Históricos (1995-2023) estación Rurrenabaque (HYBAM,2024)

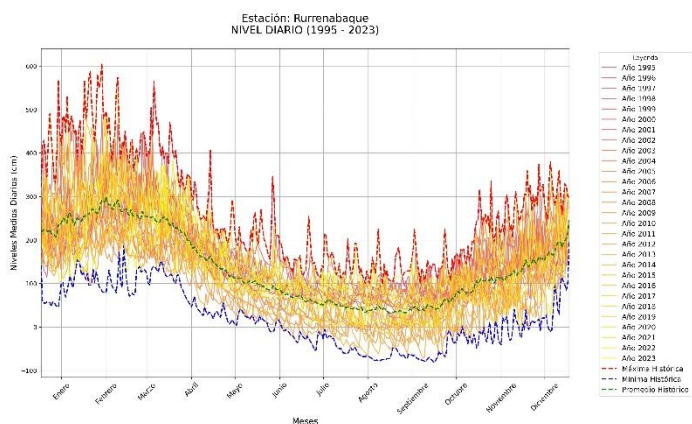


Figura 2: Niveles históricos (Máximos, Mínimos y Promedios anuales) (1995-2023) estación Rurrenabaque (HYBAM,2024)

3.1.2. Datos topográficos:

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM), obtenidos de fuentes como ALOS PALSAR, fueron procesados mediante el software Civil 3D, ajustando la superficie y realizando las correcciones de la superficie mediante los datos de batimetrías realizadas por IRD - SENAMHI y georreferenciando con las coordenadas del (BM) ubicado en el municipio de San Buenaventura. El perfil topográfico evidencia una diferencia altimétrica significativa, donde San Buenaventura presenta una mayor elevación en comparación con Rurrenabaque. Esta condición geomorfológica explica por qué Rurrenabaque es el municipio más afectado durante los eventos de inundación, ya que su ubicación en una zona más baja lo hace especialmente vulnerable.

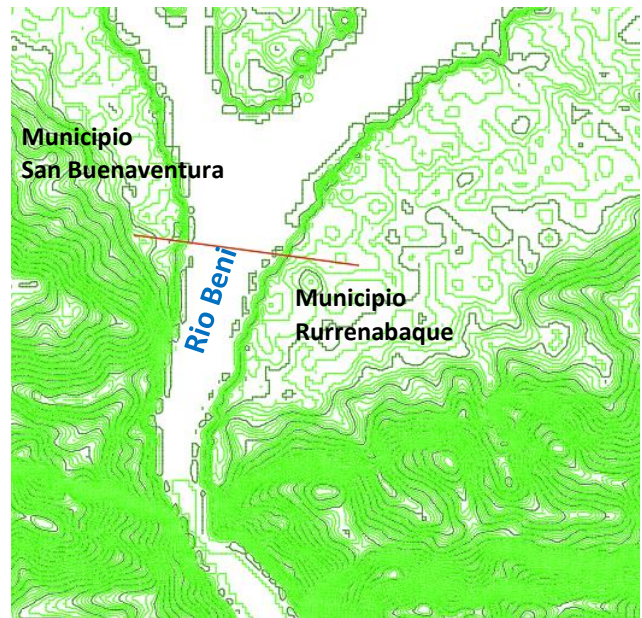


Figura 3: Topografía del río Beni

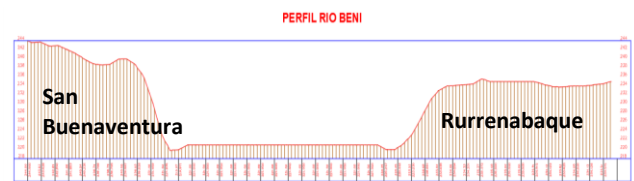


Figura 4: Perfil del río Beni

3.1.3. Información local:

Esta información fue obtenida de un programa ejecutado por UCEP - Mi Riego, en el marco del programa Bolivia Resiliente (BO-L1188). Los datos fueron recopilados mediante entrevistas realizadas a comunidades afectadas y autoridades locales, con el propósito de identificar zonas críticas y validar la información obtenida. Los resultados de este análisis fueron fundamentales para el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana en el municipio, contribuyendo a la gestión y mitigación de riesgos en las áreas identificadas.

N	Comunidad	Municipio	Tipo	Lat.	Long
1	Urb. Isla Grande Fase II	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42368	-67.51704
2	Ubr. Isla Grande Fase 3	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42759	-67.51874
3	Urb. Bibosi	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42126	-67.50859
4	Urb. Los Cedros	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42254	-67.51091
5	Barrio Ciringal	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42342	-67.5139
6	Urb. Isla Grande Fase I	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42602	-67.51362
7	Urb. Los Tajibos	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42664	-67.51011
8	Urb. Isla Grande Fase III (cont)	Rurrenabaque	Periurbana	-14.42607	-67.50867
9	Ampliación Urb. Los Sauces	Rurrenabaque	Urbana	-14.42914	-67.51524
10	Urb. Los Sauces	Rurrenabaque	Urbana	-14.43344	-67.51825
11	Urb. La Siyaya Municipal	Rurrenabaque	Urbana	-14.43127	-67.51233
12	Barrio Costanera	Rurrenabaque	Urbana	-14.43722	-67.52778
13	Ubr. Los Ambaibos	Rurrenabaque	Urbana	-14.43632	-67.52348
14	Asuncion del Quiquibey	Rurrenabaque	Comunidad	-14.63565	-67.50767
15	Real Beni	Rurrenabaque	Comunidad	-14.51235	-67.48424

Tabla 2: Comunidades del municipio de Rurrenabaque vulnerables a inundación (UCEP – Mi Riego)

3.1.4. Modelo Nays2D Flood - IRIC:

El solver Nays2D Flood permite simular el flujo bidimensional en un río y la deformación de su lecho, siendo una herramienta versátil para el modelado hidrodinámico. Este software fue desarrollado por el profesor Yasuyuki Shimizu de la Universidad de Hokkaido y destaca por su capacidad de considerar múltiples variables y factores, como obstrucciones (por ejemplo, edificaciones) y diferentes condiciones hidráulicas, incluidos caudales y niveles de agua.

3.1.5. Imágenes satelitales:

Se descargaron imágenes satelitales de Global Surface Water, imágenes correspondientes a los períodos de lluvia que muestran las extensiones de agua con mayor recurrencia y máximas. Posteriormente, se realizaron las correcciones necesarias a las imágenes satelitales, con el

fin de compararlas y validar los resultados generados por el modelo Nays2D Flood - IRIC.

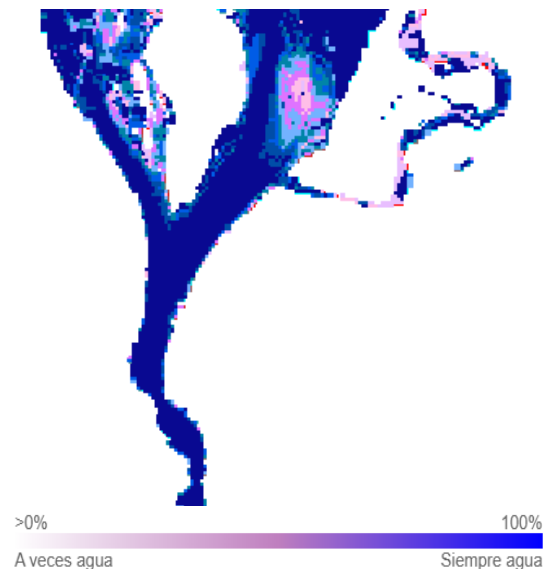


Figura 5: Recurrencia de aguas superficiales (Global Surface Water)

3.2. Modelación Hidráulica

La modelización se llevó a cabo utilizando los datos recolectados y el software IRIC, lo que permitió simular el flujo del río Beni y evaluar los riesgos de inundación en las áreas vulnerables.

3.3. Comparación y análisis de resultados

Se compararon los resultados del modelo con las imágenes satelitales para evaluar la precisión y coherencia de los resultados de inundación.

4. Presentación de Resultados

Resultados Generados por el Modelo:

4.1. Mapa de contornos de niveles máximos del agua

Los mapas generados por el modelo muestran las áreas inundables bajo diferentes escenarios de nivel. Estos mapas reflejan las zonas de mayor riesgo en función de los niveles de agua simulados para diversos escenarios de precipitación y caudal en el río Beni.

Este mapa muestra cómo los niveles del agua cambian en diferentes puntos del río Beni. Se observan áreas de mayor inundación cerca del cauce principal, mientras que las zonas más alejadas presentan niveles de agua más bajos.

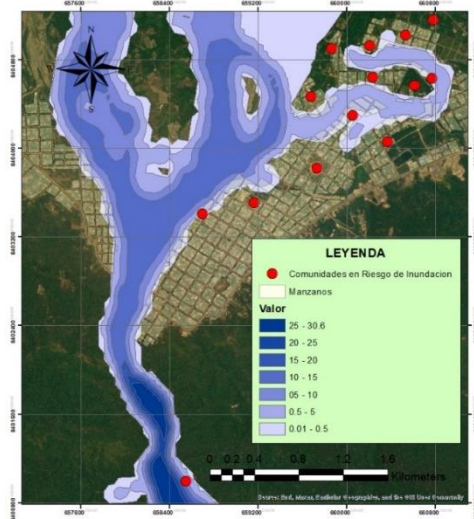


Figura 6: Mapa de niveles del agua (Iric)

4.2. Mapas de velocidades del flujo y Direcciones

Este mapa ilustra la distribución de las velocidades del flujo en diferentes áreas del río. Se observa que las velocidades más altas ocurren en las zonas cercanas al cauce principal, mientras que en las áreas alejadas las velocidades son más bajas.

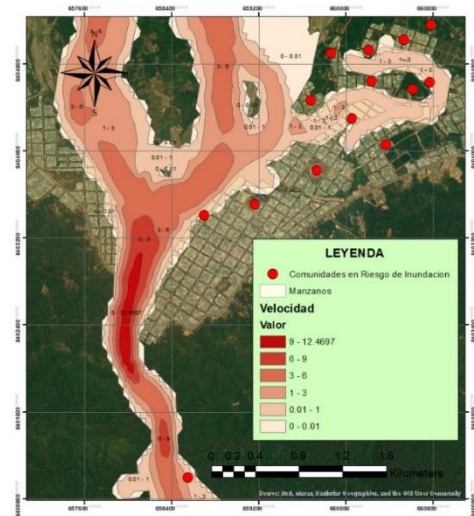


Figura 7: Mapa de velocidades del agua (Iric)

Este mapa muestra como las flechas indican hacia dónde se desplaza el agua, señalando las zonas más propensas a desbordamientos. En el municipio de San Buenaventura, debido a su topografía elevada, el riesgo de inundación es bajo, a pesar de que las velocidades del flujo son altas. En cambio, en Rurrenabaque, que está ubicado en una zona más baja, las inundaciones son más frecuentes a pesar de tener bajas velocidades.

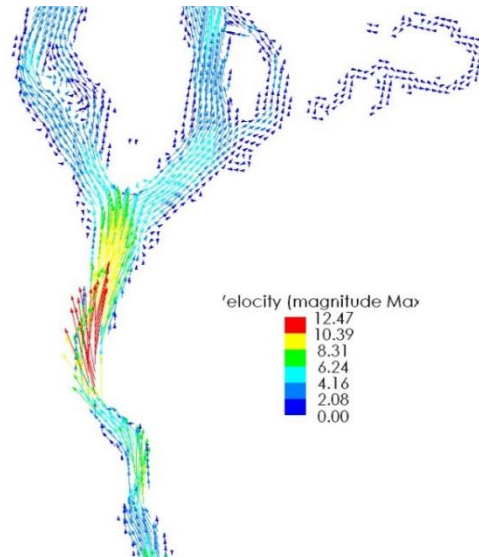


Figura 8: Mapa de direcciones del flujo del agua (Iric)

En el estudio realizado, el gráfico de la **figura 9** disperso de velocidad vs. profundidad máxima refleja una relación inversa: a medida que la profundidad del agua disminuye, la velocidad del flujo aumenta. Este patrón se observó especialmente en las zonas del río Beni con cauces más estrechos o superficiales, donde el espacio limitado para el flujo genera un incremento en la velocidad del agua.

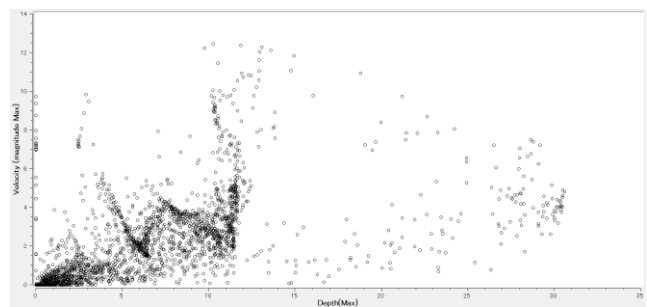


Figura 9: Gráfico disperso de velocidad vs profundidades máximas (Iric)

El gráfico de la **figura 10** velocidad vs. elevación de la superficie del agua evidencia que, en las áreas más reducidas o confinadas analizadas, las velocidades del flujo son mayores. Esto sugiere que, en dichas zonas, el agua tiende a concentrarse y desplazarse con mayor rapidez, generando impactos como la erosión del cauce y un aumento en el transporte de sedimentos, lo que afecta tanto la dinámica fluvial como las áreas adyacentes. Estos resultados confirman que el río Beni desempeña un papel significativo en el transporte de sedimentos, intensificando los efectos en las zonas vulnerables.

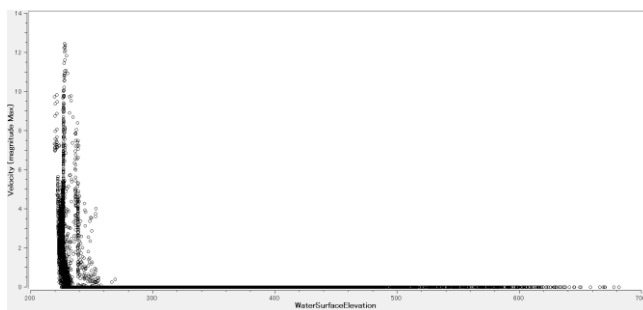


Figura 10: Grafico disperso de velocidad vs elevación de la superficie del agua (Iric)

Finalmente, el gráfico de la **figura 11** disperso de elevación de la superficie del agua vs. velocidad revela que, en las áreas del municipio de Rurrenabaque con menor profundidad de agua, se observan superficies inundadas más amplias. Esto confirma que las áreas más vulnerables a las inundaciones en Rurrenabaque suelen ser las de menor elevación, donde el flujo del agua, aunque más lento, cubre extensas superficies.

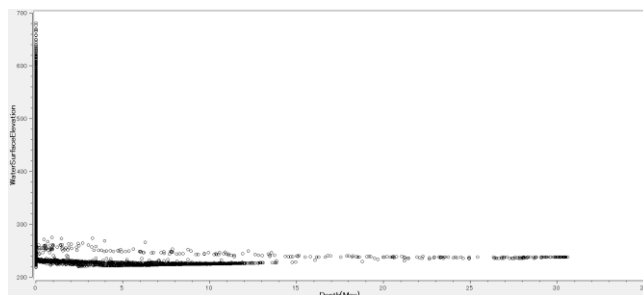


Figura 11: Grafico disperso de elevación de la superficie del agua vs velocidad (Iric)

5. Análisis de la Extensión y Magnitud de las Inundaciones:

El análisis comparativo entre las simulaciones del modelo hidráulico y las imágenes satelitales de Global Surface Water (GSW) revela coincidencias generales en las áreas inundadas, pero también discrepancias significativas en algunos sectores. Estas diferencias se atribuyen a factores como la acumulación local de lluvias, la influencia de afluentes secundarios no representados completamente en el modelo y las variaciones topográficas no actualizadas.

Aunque el modelo utiliza un DEM de alta resolución, la topografía del terreno cambia con el tiempo debido a procesos naturales y actividades humanas, lo que afecta la precisión de las simulaciones. Estas limitaciones resaltan la necesidad de incorporar datos más actualizados y considerar variables adicionales para mejorar la precisión del modelo.

El estudio destaca la importancia de integrar modelos hidráulicos con datos satelitales recientes para fortalecer los sistemas de alerta temprana y diseñar estrategias más efectivas de gestión del riesgo de inundaciones en áreas vulnerables como Rurrenabaque.

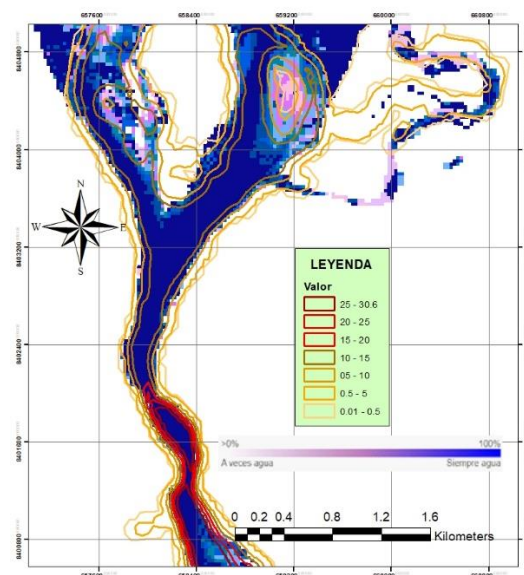


Figura 12: Comparación entre el Modelo de Inundación y la Imagen Satelital Recurrencia de aguas superficiales Global Surface Water

Los resultados obtenidos mediante el modelo hidráulico y las imágenes satelitales revelan un alto grado de concordancia, lo que confirma la confiabilidad del método empleado. La superposición entre las áreas identificadas como inundables en las simulaciones y las observadas en las imágenes satelitales confirma la precisión del modelo en la delimitación de zonas de riesgo. Además, esta información se alinea con los datos obtenidos en las encuestas realizadas por la consultoría, verificando que las comunidades más vulnerables a inundaciones se encuentran dentro o cerca de las franjas de inundación definidas por el modelo.

Las zonas de alta vulnerabilidad corresponden principalmente a las comunidades de Villa Alcira, Barrio Costanera, Ampliación Urb. Los Sauces Barrio Ciringal, Isla Grande Fase III ubicadas cerca del río Beni, donde la exposición a eventos de crecida es más significativa debido a la baja altitud y la proximidad al cauce. Este análisis resalta la importancia de implementar medidas de mitigación específicas en estas áreas para reducir los impactos de futuros eventos de inundación.

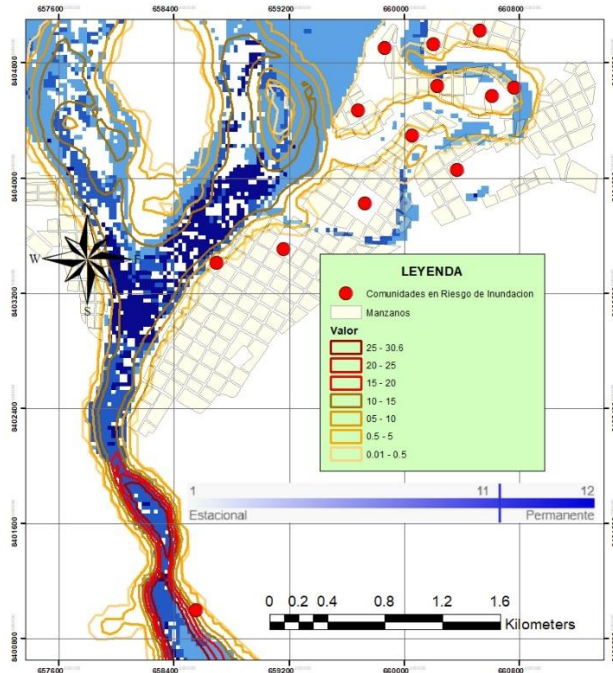


Figura 13: Comparación entre el Modelo de Inundación y la Imagen Satelital Extensión Máxima de Agua 1984-2021 Global Surface Water

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

El modelo de inundación muestra una representación adecuada de las áreas afectadas, pero se observan diferencias con las imágenes satelitales de Global Surface Water. Esto sugiere que factores como lluvias locales y afluentes secundarios pueden influir en las predicciones.

La topografía empleada en el modelo no refleja todas las variaciones actuales del terreno. Las alteraciones naturales y humanas pueden afectar la precisión de las predicciones, especialmente en áreas de baja elevación como Rurrenabaque.

Las comunidades cercanas al río Beni, como Villa Alcira, Barrio Costanera, Ampliación Urb. Los Sauces Barrio Ciringal, Isla Grande Fase III ubicadas cerca del río Beni son las más vulnerables.

6.2. Recomendaciones

Mejorar la recolección y análisis de datos hidrológicos y topográficos mediante el uso de tecnologías más precisas, como drones y estaciones totales, para obtener mediciones in situ. Es crucial verificar las modificaciones de las secciones del río, ya que estas pueden cambiar debido a la acumulación de sedimentos.

Realizar actualizaciones periódicas del modelo utilizando datos nuevos y colaborar con instituciones como el IRD y el SENAMHI para garantizar su fiabilidad a largo plazo.

Utilizar los resultados del modelo para identificar zonas de riesgo y desarrollar obras de mitigación, así como implementar sistemas de alerta temprana.

7. Referencias

- Yasuyuki Shimizu, Takuya Inoue, Eiichi Suzuki Satomi Kawamura, Toshiki Iwasaki, Michihiro Hamaki, Tomohiko Yoshida, Jagriti Mishra,

Kensuke Omura, Eriko Kakegaw IRIC software
Changing River Science Nays2D flood Examples
2024

- Ing. Adriel Quillama Torres, Ing. Edgar A. Vílchez Obando, Bach. Geo. Jhon Kevin Chávez Rojas, INFORME DE EVALUACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN FLUVIAL EN AMBAS MARGENES DEL RIO HUARMAMAYO ENTRE LAS LOCALIDADES DE NINABAMBA Y ACCOBAMBA DEL DISTRITO DE SAN MIGUEL, PROVINCIA LA MAR AYACUCHO 2018
- <https://www.lostiempos.com/actualidad/pais/20190205/lluvias-rurrenabaque-dejan-casas-inundadas-sembrados-destruidos-animales>