



**Análisis de la co-evolución humano-ecosistemas de humedal desde un enfoque socio-hidrológico. Caso de estudio ciénaga de Ayapel.**

Sergio Esteban Herazo Areiza

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Directoras

Lina María Berrouët Cadavid, Doctor (PhD) en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Esnedy Hernández Atilano, Doctor (PhD) en Biología

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

---

Cita

(Herazo Areiza et al., 2024)

---

Referencia

Herazo Areiza, S., Berrouët, L.M., & Hernández-Atilano, E., (2024). *Análisis de la co-evolución humano-ecosistemas de humedal desde un enfoque socio-hidrológico. Caso de estudio ciénaga de Ayapel*. [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte XXII.

Grupo de Investigación GeoLimna.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

Queremos agradecer a la comunidad del municipio de Ayapel, Colombia, que colaboró en las discusiones necesarias para el desarrollo del estudio. Finalmente, queremos agradecer a cada uno de los expertos que participaron en el desarrollo de la encuesta y en la construcción de la red causal. Queremos agradecer a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia, Colombia, que financió esta investigación bajo los proyectos "Análisis de la dinámica socio-hidrológica en ecosistemas de humedal en contextos tropicales (PRV2019-26630)" y "Procesos funcionales de la zona de transición acuático terrestre en una planicie de inundación tropical (PVR2019-27431)". Esta investigación fue apoyada por la Universidad de Antioquia, Colombia, y los grupos de investigación GeoLimna y Grupo de Investigación en Ecología Aplicada.

## Tabla de Contenido

<b>I. Introducción general .....</b>	<b>7</b>
<b>Artículo uno</b>	
1. Introducción .....	9
2. Coevolución en sistemas socio-hidrológicos .....	11
3. Materiales y métodos .....	12
4. Resultados .....	14
4.1. Identificación de variables para el análisis de la co-evolución en contextos de humedales tropicales. ....	14
4.2. Categorías y relaciones para el análisis de la coevolución en sistemas de humedal tropical. ....	17
4.3. Red causal socio-hidrológica .....	22
5. Discusión.....	26
6. Conclusiones .....	27
7. Referencias .....	28
<b>Artículo dos</b>	
1. Introducción .....	36
2. Materiales y métodos .....	38
2.1. Área de estudio.....	38
2.2. Red bayesiana para el análisis de la co-evolución socio-hidrológica en humedales tropicales .....	40
2.3. Análisis de datos para la definición de estados y probabilidades de la red bayesiana.....	42
3. Resultados .....	47
3.1. Modelo de red bayesiana para humedales tropicales .....	47
3.2. Efectos en la producción ganadera, agrícola y pesquera debido a cambios hidrológicos en el humedal. ....	51
3.3. Presiones del sistema social sobre aspectos de la dinámica hidrológica.....	54
4. Discusión.....	55
5. Conclusiones .....	56
6. Referencias .....	57
<b>II. Conclusiones generales .....</b>	<b>62</b>

## Lista de Figuras

### Artículo uno

**Figura 1.1.** Ruta metodológica para la creación de la red causal que permita el análisis de la co-evolución humano – ecosistemas de humedal en contextos tropicales.

**Figura 1.2.** Variables sociales y biofísicas identificadas en la revisión de literatura científica.

**Figura 1.3.** Dinámicas socio-hidrológicas de los humedales bajo diferentes niveles de inundación. Sequía, transición e inundaciones.

**Figura 1.4.** Valoración de 15 expertos en el funcionamiento hidrológico de humedales tropicales y enfoques socio-ecosistémicos sobre la importancia de las categorías elegidas.

**Figura 1.5.** Red causal para el análisis de la co-evolución humano-ecosistemas de humedal en contextos tropicales.

### Artículo dos

**Figura 2.1.** Ubicación zona de estudio del caso aplicado. Ciénaga de Ayapel.

**Figura 2.2.** Elementos que conforman una red bayesiana. Nodos padres, nodo hijo y tablas de probabilidad condicional.

**Figura 2.3.** Red causal propuesta en Herazo y Berrouet modificada para el humedal de Ayapel.

**Figura 2.4.** Modelo de Red Bayesiana del humedal de Ayapel. Las probabilidades se obtuvieron a través del método de frecuencias relativas.

**Figura 2.5.** Escenarios de análisis: afectaciones de las variables hidrológicas sobre los niveles de producción. Escenario A: el área de inundación permanente es máximo y el estacional es mínimo. Escenario B: el área de inundación estacional es máxima y el permanente es mínima, Escenario C: nivel máximo de inundación del humedal sin influencia del dique marginal.

**Figura 2.6.** Diagrama araña de los efectos de diferentes combinaciones del pulso de inundación sobre las variables de producción ganadera, agrícola y pesquera. Cambios de las probabilidades de ocurrencia de cada estado bajo diferentes escenarios.

**Figura 2.7.** Variación en los estados altos (> percentil 0.8) en la producción ganadera y pesquera bajo diferentes escenarios evaluados. Ganadería: estado  $\geq 146.998$  cabezas de ganado.

**Figura 2.8.** Posibles causas del aumento en área de la cobertura bosque y pasto. Cambios en las probabilidades de ocurrencia de las variables hidrológicas.

## Lista de Tablas

## **Artículo uno**

**Tabla 1.1.** Relaciones identificadas en la literatura para cada una de las categorías y variables seleccionadas. Se establece una métrica de relación entre categorías. (Fuente: los autores)

**Tabla 1.2.** Retroalimentaciones identificadas en la literatura para analizar las relaciones del componente social sobre el biofísico. Se establece una métrica de relación entre categorías. (Fuente: los autores).

## **Artículo dos**

**Tabla 2.1.** Fuente de datos utilizados para el modelo RB.

**Tabla 2.2.** Indicadores, unidades y estados de los nodos del modelo RB para el humedal de Ayapel.

**Tabla 2.3.** Distribuciones de probabilidad para las principales variables de la RB en tres modelos evaluados.

**Tabla 2.4.** Estadísticos de validación para los principales nodos de la red bayesiana. La pérdida logarítmica varía entre 0 e infinito, siendo 0 el mejor ajuste. La pérdida cuadrática varía entre 0 y 2, siendo 0 el mejor ajuste. La recompensa esférica varía entre 0 y 1, siendo 1 el ajuste perfecto.

## **Lista de Anexos**

**Anexo 1.** Encuesta a conocimiento experto realizado para la validación de variables y categorías en el artículo uno.

**Anexo 2.** Encuestas a pescadores de Ayapel, Colombia, para conocer su percepción en producción de pesca entre 1995 y 2020.

## **I. Introducción general**

Los enfoques de sistemas socio-ecológicos (SSE) y sistemas socio-hidrológicos (SSH) tienen el objetivo de analizar las interacciones entre sistemas biofísicos y sociales, entendiendo cómo el sistema biofísico soporta el bienestar de la sociedad vía provisión de servicios ecosistémicos y cómo desde las decisiones que se toman en los sistemas sociales generan presiones y pulsos sobre la integridad ecológica del sistema biofísico. Aunque desde estos enfoques se han realizados avances en la comprensión de las distintas interacciones, aún persisten retos para entender de forma acoplada el funcionamiento de los sistemas bajo escenarios de cambio ambiental (i.e eventos climáticos extremos) debido, principalmente, a la dificultad de abordar conceptual y operativamente características de los SSE y SSH como: i) la no linealidad en las dinámicas biofísicas, sociales y las interacciones entre estas, ii) el acoplamiento de escalas espaciales y temporales a las que dichas dinámicas y cambios ocurren y iii) el análisis de retroalimentación entre dinámicas sociales y ecológicas. Para avanzar en estos retos, desde el enfoque de SSH se propone analizar estos sistemas desde la perspectiva de co-evolución (Sivapalan et al., 2012; Sivapalan and Blöschl, 2015), mirando los sistemas sociales como parte endógena del ciclo hidrológico y cómo las interacciones a través del tiempo entre los sistemas hidrológicos y sociales evolucionan de manera conjunta.

Los humedales tropicales, como ecosistemas dominados principalmente por un pulso de inundación, son escenarios donde los sistemas hidrológicos y sociales han evolucionado conjuntamente y pueden evaluarse a través del enfoque de co-evolución. Por ende, esta investigación se abordaron los vacíos conceptuales del enfoque de sistemas socio-hidrológicos resolviendo la pregunta: ¿Cuáles son las categorías y variables que determinan la co-evolución humano-ecosistema en un ecosistema de humedal tropical?, para responder esta pregunta se propuso un modelo conceptual para el análisis de la co-evolución en humedales tropicales (Artículo 1) y su operativización por medio de un modelo de simulación a través de redes bayesianas para un caso de estudio en el humedal de Ayapel, Colombia (Artículo 2). En el artículo 1 se presenta la red causal como modelo de co-evolución. El artículo 2 presenta un modelo de simulación de red bayesiana de la red causal para un caso de estudio en el humedal de Ayapel, Córdoba, Colombia.

Los principales resultados de los artículos muestran como la co-evolución en los humedales tropicales puede explicarse a partir del pulso de inundación y los niveles de producción económica. Con los resultados de esta investigación se aporta al entendimiento de las interacciones socio-hidrológicas en diferentes escenarios hidrológicos y de tomas de decisión (uso del suelo). Este análisis permite conocer estados tendenciales en la funcionalidad hidrológica de estos ecosistemas y sus relaciones con actividades económicas de las poblaciones que habitan el humedal. Los análisis basados en simulaciones posibilitan comprender las tendencias y la generación de escenarios futuros, pues permiten someter al sistema socio-hidrológico a diferentes condiciones de manejo y/o intervención, contribuyendo al diseño y formulación de planes de gestión y manejo del territorio de humedales.

## ARTÍCULO UNO

### RED CAUSAL PARA EL ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES SOCIO-HIDROLÓGICAS EN LOS HUMEDALES TROPICALES DESDE UN ENFOQUE DE COEVOLUCIÓN.

Sergio Herazo<sup>1</sup> · Lina Berrouët<sup>2</sup> – Esnedy Hernández<sup>3</sup>

#### Resumen

La socio-hidrología contempla al ser humano como parte endógena del ciclo del agua y analiza la relación entre las dinámicas sociales e hidrológicas, permitiendo incorporar las dinámicas históricas de las interacciones entre ambos sistemas, a esto se le denomina co-evolución. La principal dificultad de este tipo de enfoques se asocia a la limitación para integrar las diferentes escalas espaciotemporales en las que se manifiestan los procesos y dinámicas de los sistemas social e hidrológico. Además, aún persisten retos para entender la co-evolución de ambos sistemas en contextos de humedales tropicales bajo escenarios de cambio ambiental. Este trabajo presenta un análisis de las variables y relaciones que determinan la coevolución humano-ecosistemas de humedal en contextos tropicales, consolidando una red causal de dichas interacciones como base para procesos de simulación de tendencias de cambio en estos sistemas socio-hidrológicos. Para el análisis de las interacciones y la construcción de la red causal, se hizo una revisión sistemática de literatura indexada que permitió identificar las categorías, variables, sus interacciones y describir el funcionamiento socio-hidrológico de humedales tropicales. El análisis y la propuesta de red causal se validaron con conocimiento experto a través de encuestas dirigidas a investigadores en el funcionamiento hidrológico de humedales y enfoques socio-ecosistémicos. La red causal propuesta permite principalmente entender la dinámica entre el pulso de inundación y los niveles de producción para los sectores agropecuario y pesca. De acuerdo con los resultados, estas dos variables permiten identificar los procesos de adaptación de los sistemas sociales en la toma de decisiones de usos del suelo ante las variaciones del pulso de inundación, y así mismo, como el área cubierta por las manchas de inundación sufren transformaciones en el tiempo inducidas por cambios en las variables biofísicas asociados a impulsores endógenos (i.e. uso del suelo) y exógenos (i.e. variabilidad climática), lo cual permite dar un paso en la comprensión de las dinámicas socio-hidrológicas de los humedales tropicales. Los resultados de este trabajo suponen un avance en el entendimiento de los procesos co-evolutivos entre los sistemas sociales e hidrológicos ocurridos en humedales tropicales, lo que permite el fortalecimiento en la construcción de escenarios para requeridos para los procesos de gestión del riesgo por inundación, gestión del recurso hídrico y de planificación territorial.



## 1. Introducción

En las últimas décadas, desde las ciencias de la sostenibilidad, se ha avanzado en el entendimiento articulado de los sistemas sociales y biofísicos, analizando la incidencia del entorno natural sobre los procesos de adaptación de los sistemas humanos y/o las transformaciones de la integridad ecológica derivada de acciones provenientes de la dinámica del sistema social. Bajo esta lógica emergen enfoques como el de sistemas socio-ecológicos y sistemas socio-hidrológicos, desde los cuales se busca entender las interacciones entre dos o más sistemas a partir del análisis de las contribuciones que la naturaleza hace al bienestar humano (Díaz et al., 2015; Sivapalan et al., 2014) y de cómo los grupos humanos al capturar dichos beneficios generan procesos de transformación en las propiedades y atributos de los ecosistemas, comprometiendo así, la funcionalidad de estos y su capacidad para mantener las contribuciones a la sociedad (Collins et al., 2010; Sivapalan et al., 2012).

A pesar del reciente y creciente avance en estas áreas de conocimiento, aún persisten vacíos en entender de forma acoplada los cambios o transformaciones en el tiempo de los sistemas socio-ecológicos o socio-hidrológicos frente a diferentes presiones o pulsos, esto debido principalmente a la dificultad que genera el integrar las diferentes escalas espaciotemporales en las que se dan los procesos sociales y biofísicos (Kramer et al., 2017; Kumar et al., 2016). Dicha complejidad ha limitado la operatividad de ambos enfoques en procesos de toma de decisiones como los planes de ordenamiento y/o planificación del territorio (Turner II et al., 2003), por tanto, la integración de las diferentes escalas espaciotemporales analizadas bajo escenarios de cambio, como los cambios o intensificaciones en los usos del suelo, los cambios en los requerimientos del mercado o la variación climática proporcionan información para el fortalecimiento de los mencionados planes de ordenamiento y planificación del territorio (Collins et al., 2010; Laterra et al., 2019). En este sentido, la socio-hidrología propone aportar a la operatividad de estos enfoques a través del concepto de co-evolución, entendida como la evolución en el tiempo de las diferentes relaciones directas e indirectas entre componentes del sistema hidrológico y el sistema social (Sivapalan et al., 2012; Sivapalan y Blöschl, 2015).

Los ecosistemas de humedal son escenarios socio-ecosistémicos donde las interacciones socio-hidrológicas determinan la adaptación del ecosistema y de manera conexas de los sistemas sociales que habitan o dependen de estos sistemas naturales. En esa relación, emergen motores de transformación exógenos y endógenos que han conllevado a perder entre un 64% y 71% de la extensión mundial de estos ecosistemas durante el último siglo (Davidson, 2014; Junk et al., 2013). La funcionalidad de estos ecosistemas está determinada principalmente por las condiciones geomorfológicas, pedológicas e hidrológicas (Lisenby et al., 2019; Ricaurte et al., 2019), por lo que, el alterar alguno de estos atributos a través de intervenciones antrópicas como los cambios de relieve y la construcción de tecnología hidráulica para aprovechamiento de la tierra, pueden modificar significativamente la funcionalidad de estos (Di Baldassarre et al., 2013; Euliss y Mushet, 1996; Junk et al., 2013).

Además, el modificar esta funcionalidad podría conllevar alteraciones considerables en la oferta de servicios ecosistémicos que prestan los humedales, tales como el aprovisionamiento de alimentos, agua potable, regulación climática, hidrológica, identidad cultural y oportunidades de turismo y educación ambiental (Acreman y Holden, 2013; de Groot et al., 2006; Ricaurte et al., 2019; Sultana et al., 2020; Zhang et al., 2016). Esta interacción socio-hidrológica, es aún más compleja en humedales tropicales como los sudamericanos, debido a las múltiples condiciones ecológicas, hidrológicas y geomorfológicas que presentan, influenciados, por ejemplo, por la variabilidad altitudinal de la cordillera de los Andes o la funcionalidad ecológica de la cuenca del Amazonas (Junk et al., 2014; Ricaurte et al., 2019). Así mismo, la complejidad al evaluar en estas regiones el estado de la funcionalidad y la comprensión de los servicios ecosistémicos provistos es limitado, debido principalmente a la falta de conocimiento alrededor de variables biofísicas como los niveles de distribución, extensión, volumen, variabilidad interanual de inundaciones, perturbaciones de los humedales y la falta de conocimiento alrededor de las dinámicas sociales y económicas asociadas a estos ecosistemas (Jaramillo et al., 2019; Junk et al., 2013; Langan et al., 2018; Wittmann et al., 2015).

En línea con lo planteado, la contribución de este trabajo se centra en dos aspectos: *i*) contribuir a los procesos de integración de escalas (espaciales y temporales) y *ii*) aportar a los elementos conceptuales de la co-evolución entre humedales tropicales y sociedad. Para este fin, el trabajo se enfocó en resolver dos preguntas centrales: *i*) ¿Cuáles son las variables y categorías determinantes que pueden explicar la co-evolución humano ecosistema de humedal tropical? y *ii*) ¿Cómo son las relaciones entre las diferentes categorías que pueden explicar la co-evolución humano – humedal tropical? Para responder a estas preguntas se creó una red causal que permite analizar la interacción entre los componentes biofísicos y sociales (para este caso de estudio se toma el sistema social asociado a los niveles de producción de actividades económicas) bajo diferentes condiciones de manejo y/o intervención del sistema socio-hidrológico para ecosistemas de humedal tropical. Esta red causal permite, por ejemplo, el análisis de las relaciones entre variables que ocurren a escalas locales como los usos del suelo y la implementación de tecnología hidráulica, y escalas regionales o continentales como lo es la dinámica hidrológica que domina la cuenca del humedal estudiado, además, al observar las interacciones entre estas variables a través del tiempo se observaría cómo han evolucionado y permitiría analizar cómo podrían comportarse bajo diferentes escenarios futuros. Si bien el análisis y red causal propuesta deben ser complementados con la inclusión de otras variables asociadas con gobernanza, el resultado de este trabajo supone un avance para el entendimiento de la coevolución entre los sistemas sociales e hidrológicos en humedales tropicales, y puede aportar al fortalecimiento en la construcción de escenarios para diferentes planes de gestión del riesgo por inundación, gestión del recurso hídrico y planes de ordenamiento territorial.

## **2. Coevolución en sistemas socio-hidrológicos**

La socio-hidrología se centra en el entendimiento de la sociedad como parte endógena del ciclo del agua y estudia no solo el impacto de un sistema social sobre el agua, sino también del agua como determinante en la dinámica social (Sivapalan et al., 2012). Algunos autores como Troy et al., (2015) sostienen que la socio-hidrología puede verse como un caso especial del enfoque socio-ecológico con énfasis en el agua, esta deducción puede verse soportada gracias a que ambos enfoques se basan en la premisa fundamental de que los sistemas biofísicos y sociales interactúan entre sí (Folke et al., 2010). De este modo, la socio-hidrología tiene como objetivo analizar de forma acoplada los sistemas humano-agua, sustentado en la idea que el agua y los sistemas humanos co-evolucionan, es decir que, el sistema social modifica al sistema hidrológico y viceversa.

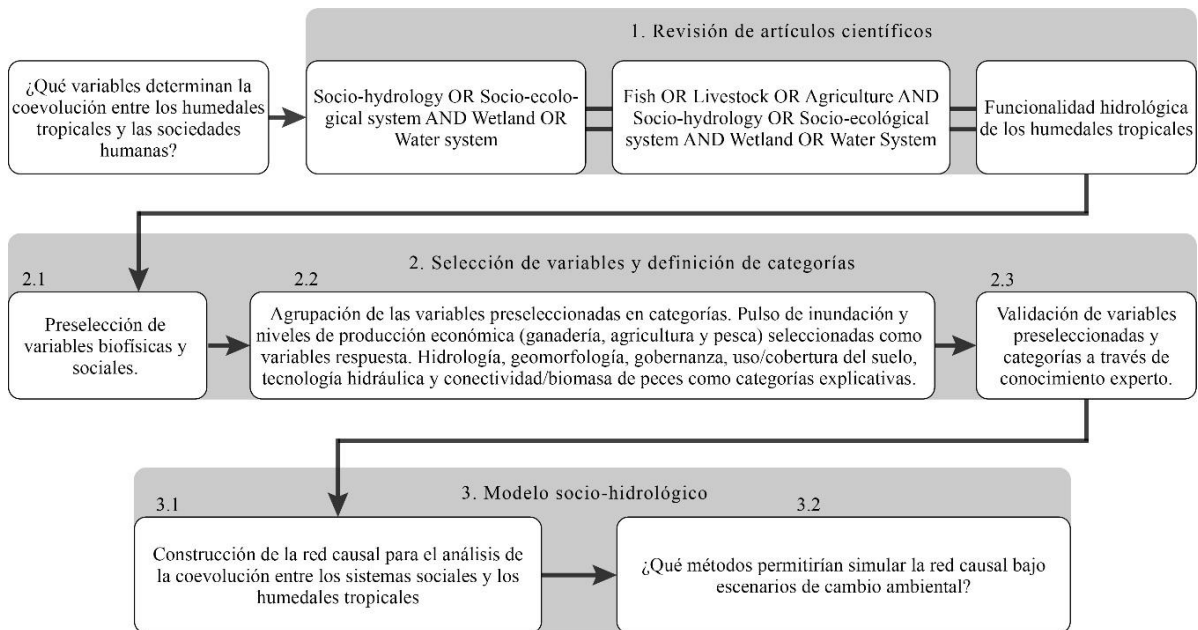
Solo desde un punto de vista biofísico, sin contemplar la incidencia del sistema social, la hidrología se ha enfrentado a diferentes retos en cuanto al entendimiento de las dinámicas temporales y espaciales. En la primera mitad del siglo XX, la hidrología estaba dominada por enfoques que trataban las cuencas hidrográficas como sistemas agrupados o cajas negras, con un enfoque explícito en el tiempo (Sivapalan et al., 2014). Posteriormente, con el desarrollo tecnológico y el uso de computadoras, se desarrolló una ciencia hidrológica con mayor énfasis en la variabilidad espacial y las influencias químicas o biológicas sobre las dinámicas hidrológicas. Sin embargo, en las últimas décadas, los cambios provocados por los impactos antrópicos aumentaron la necesidad de volver a centrarse en la dependencia del tiempo y en la necesidad de entender la interacciones entre ambos sistemas, esto con el objetivo de disminuir el horizonte temporal sobre el que se toman las decisiones de planificación y gestión (Sivapalan y Blöschl, 2015).

Analizar los sistemas socio-hidrológicos bajo el enfoque de co-evolución permite entender que los procesos hidrológicos que se dan a escalas de tiempo amplias (e.g. regímenes de precipitación, regímenes de caudal) pueden verse transformadas por intervenciones del sistema social, tales como cambios en las coberturas vegetales, intensificaciones en el usos del suelo del territorio o implementación de tecnología hidráulica, y así mismo, como estos procesos generan retroalimentaciones que generan pérdida de servicios ecosistémicos asociados, por ejemplo, a procesos de regulación hidrológica y aprovisionamiento del recurso hídrico (Liu et al., 2015; Sivapalan y Blöschl, 2015; Troy et al., 2015). Plantear una definición de coevolución, desde este se puede entender la incidencia de variables sociales provenientes de factores como la economía, demografía y gobernanza como variables endógenas de las dinámicas hidrológicas y permite a su vez, analizar las retroalimentaciones entre los sistemas sociales e hidrológicos. Analizar bajo este tipo de enfoques acoplados al análisis de escenarios futuros permite la generación de información para la toma de decisiones de planificación y gestión del recurso hídrico a través de la integración de las escalas espaciotemporales en las que se dan las dinámicas socio-hidrológicas (Gain et al., 2020).

### 3. Materiales y métodos

Para determinar las variables y categorías determinantes para la explicación de la co-evolución humano-ecosistemas de humedal se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica indexada en bases de datos acreditadas. Para la selección de los estudios se seleccionaron artículos que tuviesen en cuenta al menos una de las siguientes tres consideraciones (Punto 1 – Figura 1): *i*) que los estudios se realizaran en ecosistemas acuáticos desde enfoques socio-hidrológicos o socio-ecológicos, *ii*) que en los trabajos se hiciera un análisis de interacciones entre variables socioeconómicas (i.e. niveles productivos de pesca, agricultura o ganadería) y biofísicas (i.e. inundaciones, sequías, cambios en coberturas vegetales, etc.) y finalmente *iii*) se analizaron estudios que exploraran la funcionalidad hidrológica de los humedales tropicales.

Para seleccionar las variables utilizadas en la literatura, que permitieran analizar los sistemas de humedal y sus interacciones con los sistemas sociales desde el enfoque de la co-evolución, se construyó una ficha de sistematización donde se identificó inicialmente el objetivo de cada estudio, los sistemas analizados, las interacciones y retroalimentaciones entre los componentes biofísicos y sociales contemplados, para los casos en que existían retroalimentaciones entre los sistemas sociales e hidrológicos se hizo una revisión de mayor detalle y se preseleccionaron las variables y métricas usadas para dicho análisis a través de las ecuaciones de búsqueda presentadas en punto 1 de la figura 1. Como producto de esta sistematización se seleccionaron en total 59 artículos de 150 revisados, que permitieron la identificación de las variables y métricas (indicadores) para determinar diferentes estados de las interacciones entre ambos sistemas. Adicionalmente, se revisaron 22 artículos más para el análisis específico de la interacción entre las variables identificadas y su relación con la funcionalidad en humedales tropicales, para un total de 81 artículos seleccionados.



**Figura 1.1.** Ruta metodológica para la creación de la red causal que permita el análisis de la co-evolución humano – ecosistemas de humedal en contextos tropicales. (Fuente: los autores)

Posteriormente, se identificaron alrededor de 30 variables, usadas en estos artículos, para describir la funcionalidad hidrológica y/o social de los humedales, de estas se preseleccionaron finalmente once variables de acuerdo con la frecuencia de mención en los artículos revisados (Punto 2 – Figura 1). Las once variables preseleccionadas se clasificaron en variables de estado (o respuesta) y variables explicativas. En esta investigación, las variables de respuesta son el pulso de inundación y los niveles productivos de las actividades ganaderas, agrícolas y pesqueras. En línea con los trabajos de Junk et al., (1989), Di Baldassarre et al., (2013), Ivory et al., (2019) y Arias et al., (2013) estas dos variables se han descrito como variables determinantes en la funcionalidad ecológica de los humedales y sus relaciones con los sistemas sociales. Además, las once variables preseleccionadas como variables explicativas de la dinámica pulso de inundación-actividad productiva, se agruparon en seis categorías: hidrología, geomorfología, gobernanza, usos del suelo/coberturas vegetales del suelo, tecnología hidráulica y conectividad/biomasa de peces (Punto 2.2 – Figura 1).

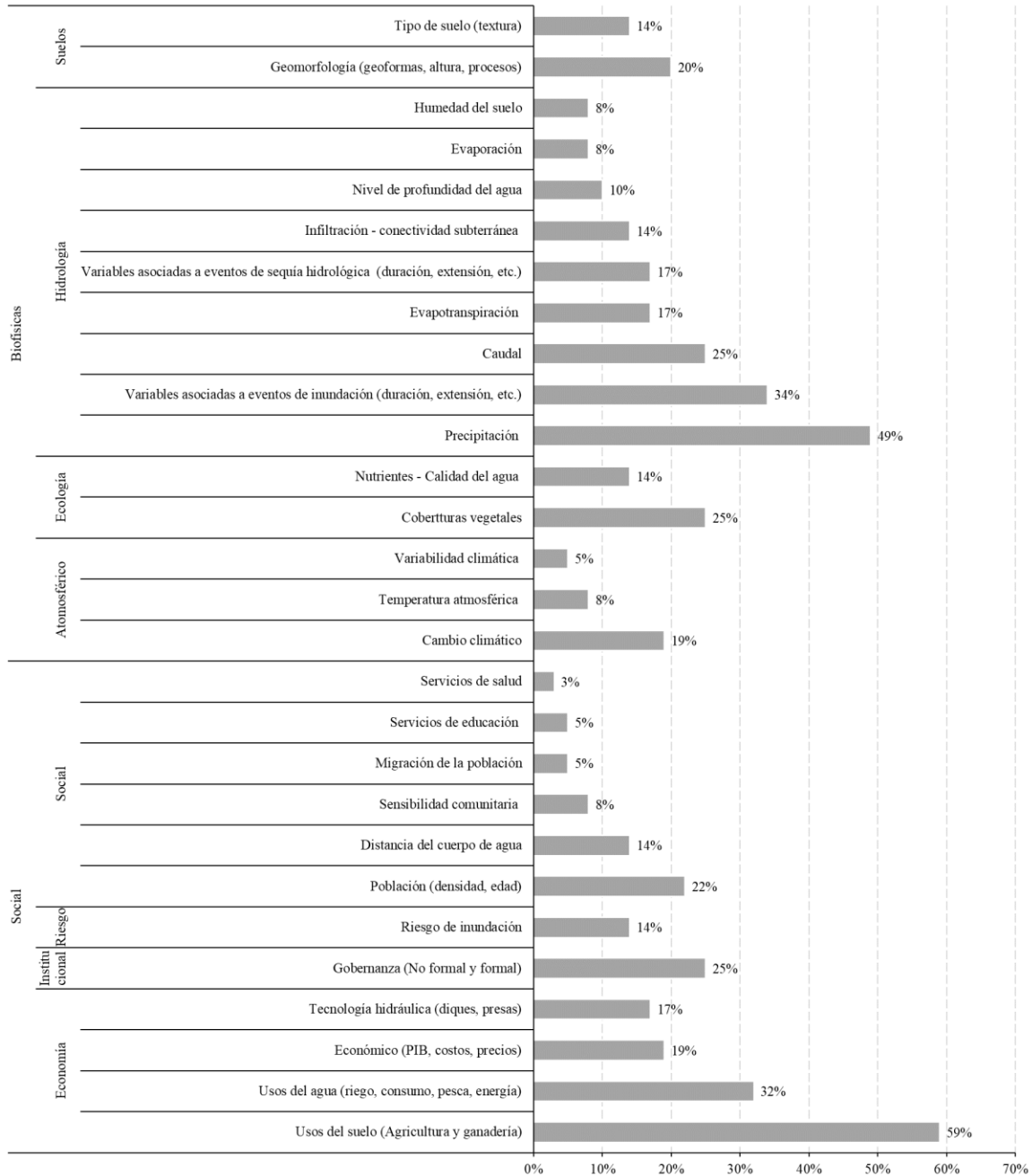
Para la validación de las variables y categorías preseleccionadas se realizó una encuesta de conocimiento experto (Punto 2.3 – Figura 1), para así, consolidar la identificación de las variables que permitan el análisis de la coevolución humano-ecosistemas de humedal y crear una red causal definitiva con las interacciones entre sí. En este proceso de validación con conocimiento experto se contó con la participación de 15 expertos en funcionalidad ecológica, hidrológica, hidráulica, socio-ecológica, biológica y/o geomorfológica asociada a humedales tropicales. A los expertos se les consultó sobre la pertinencia de cada una de las

variables preseleccionadas y su nivel de importancia para la propuesta de red causal construida, esto a través de preguntas de calificación dónde el cero significó que la variable o categoría es “nada importante” y 5 “muy importante” para establecer relaciones que expliquen la co-evolución en el contexto de humedales. Además, se les consultó sobre la necesidad de incluir categorías o variables que la propuesta inicial de red no contempló y sobre la pertinencia de los índices preseleccionados para dar respuesta a cada una de las categorías (Ver encuesta a expertos – Anexo 2). Finalmente, se consolidó el modelo socio-hidrológico a través de la creación de una red causal ((Punto 3 – Figura 1) que permite el análisis de la co-evolución entre humedales tropicales y sociedades humanas.

## **4. Resultados**

### **4.1. Identificación de variables para el análisis de la co-evolución en contextos de humedales tropicales.**

En la figura 2, se presenta una síntesis de las variables sociales y biofísicas (que describen procesos hidrológicos) identificadas a partir de la revisión y sistematización de literatura. La precipitación (nombrada en el 49% de los artículos revisados, n=81 artículos) es una de las variables frecuentemente utilizadas para analizar relaciones socio-ecológicas con énfasis en el agua, esto debido a que determina, especialmente en el contexto de humedales, procesos sociales y ambientales (Bullock y Acreman, 2003; Ricaurte et al., 2019).



**Figura 1.2.** Variables sociales y biofísicas identificadas en la revisión de literatura científica. (Fuente: los autores)

Características como la intensidad y frecuencia de los eventos de lluvia determinan la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos de sequías e inundaciones y estas pueden afectar considerablemente la profundidad de la lámina de agua y las actividades de usos del suelo de un sistema social y su bienestar (Lerner et al., 2018; Melsen et al., 2018; Ricaurte and Max Finlayson, 2017; Trenberth et al., 2015), además, los eventos de precipitación son determinantes en la cantidad de humedad del suelo y en el caudal de flujos de corriente

superficial, los cuales son funciones que determinan servicios ecosistémicos de regulación y aprovisionamiento de agua (Pande and Savenije, 2016; Trenberth, 2011).

Así mismo, variables como los pulsos de inundación (expansión, duración y frecuencia), la magnitud de los flujos superficiales como caudal y escorrentía, el tipo de cobertura vegetal, su distribución y los diferentes procesos geomorfológicos junto con las geoformas y las características del suelo se utilizaron en la literatura para describir diferentes dinámicas socio-hidrológicas, siendo mencionadas al menos en el 20% de los artículos revisados. Autores como De-Campos et al., (2013) ponen en evidencia como los diferentes procesos geomorfológicos y sus contextos geológicos influyen en el origen de los humedales tropicales y su funcionalidad biofísica, esto dado que las pendientes, los escarpes, el tipo de suelo y los diferentes procesos de sedimentación o erosión juegan un papel determinante en los procesos de infiltración y escorrentía, lo que se traduce en la creación de las condiciones ambientales necesarias para la formación de humedales terrestres. Por otro lado, autores como Daskin et al., (2019) y Valente et al., (2013) demuestran como en los ecosistemas de humedales tropicales, las coberturas vegetales juegan un papel importante en las relaciones entre los procesos bióticos y los abióticos, esto debido a que las dinámicas históricas en los cambios de las geoformas del suelo y variables como la duración y frecuencia de las inundaciones pueden verse reflejadas en las dinámicas de los tipos de coberturas vegetales y sus distribuciones.

Respecto al componente social (Figura 2), la variable de usos del suelo, entendido desde el tipo de actividad económica realizada sobre el suelo, fue la variable más vinculada a la evaluación de fenómenos socio-hidrológicos, esta variable mencionada en el 59% (35 artículos) de los artículos revisados se analizó para describir como las diferentes actividades económicas, dentro de las que destacaron las actividades ganaderas y agrícolas, se relacionan con las dinámicas biofísicas, donde los cambios en los usos del suelo o su intensificación promueven los cambios en las coberturas vegetales y afectan los procesos de escorrentía e infiltración (Birhanu et al., 2019; Garg et al., 2019). Además, estudios como los de Forio et al., (2020); Van Dam et al., (2013), no solo evalúan el tipo de actividad económica realizada, sino que vinculan los usos del suelo con el bienestar social, estos analizan como bajo escenarios de intensificación agrícola se afecta la funcionalidad del ecosistema y disminuyen los beneficios provenientes de servicios ecosistémicos de regulación. Así mismo, otros estudios analizan como las dinámicas de usos del suelo al promover cambios en las coberturas vegetales afectan los ciclos hidrológicos dado que, por un lado afectan la actividad de transpiración vegetal y dinámicas atmosféricas (Birhanu et al., 2019; Janse et al., 2019; Lathuillière et al., 2016) y por el otro, afectan la estructura hidráulica del suelo y los procesos de infiltración-escorrentía (Garg et al., 2019; Harbor, 1994; Voldseth et al., 2007).

En el 32% (19) de los artículos revisados, se mencionaron usos del recurso hídrico para irrigación, consumo residencial, pesca o generación de energía como variables que explican los diferentes intercambios o sinergias que se dan entre la oferta de recurso hídrico dada por



el sistema biofísico y los servicios demandados por el sistema social (Al-Amin et al., 2018; Han and Liu, 2017; Ogilvie et al., 2019; Song et al., 2018). Otras variables usadas en el componente social de los sistemas socio-hidrológicos, se asociaron a las características poblacionales como la edad, la densidad y la migración, mencionadas en más del 20% de los artículos, estas dinámicas sociales se analizaban como indicadores de migraciones poblacionales a partir de inundaciones o de la demanda de agua urbana y rural. Además, variables económicas como costos de producción, precios de propiedad raíz y niveles de producción, mencionados en el 19% (11) se analizaron como indicadores de las relaciones oferta/demanda. En estos se analizaba, por ejemplo, como los niveles de producción de actividades económicas aumentaban a partir del buen rendimiento hidrológico de las cuencas de captación de agua para usos agrícolas, y cómo, bajo escenarios de bajo rendimiento, aumentaban los costos de producción, afectado así los niveles de producción. Además, otros estudios ponen en evidencia como bajo escenarios de bajo rendimiento hídrico de los ecosistemas, se disminuye la capacidad de oferta del recurso y los sistemas sociales aumentan su sensibilidad social, lo cual logra organizar al sistemas social en aras de establecer políticas de gobernanza o acciones sociales para aumentar el rendimiento hídrico de las cuencas (Cumming et al., 2014; Jeong and Adamowski, 2016; Kumar et al., 2016; Liu et al., 2015).

#### **4.2. Categorías y relaciones para el análisis de la coevolución en sistemas de humedal tropical.**

A partir de la revisión sistemática de los 81 artículos científicos, se identificaron las variables comúnmente utilizadas en la literatura para analizar dinámicas socio-hidrológicas y describir la funcionalidad de los humedales. Dichas variables se clasificaron en variables de estado (o respuesta) y variables explicativas. Las variables de estado son el pulso de inundación y los niveles productivos (de actividades agrícolas, ganaderas y pesqueras). Factores como la duración, frecuencia y profundidad del pulso de inundación son determinantes en el área y distribución de las coberturas vegetales, siendo factores que determinan la humedad del suelo en épocas secas y aportan nutrientes al suelo en épocas húmedas, sin embargo, debido a alta cantidad de nutrientes con que cuentan estas zonas acuático-terrestres de los humedales (Daskin et al., 2019; Junk et al., 1989), las poblaciones sociales han alterado los pulsos de inundación para usos económicos como agricultura y ganadería, generado así, un deterioro en la funcionalidad hidrológica del ecosistema (Arias et al., 2013; Junk et al., 2013).

Así mismo, la producción de actividades ganaderas y agrícolas se benefician al aumentar el área de vegetación disponible para la actividad económica, en el caso de los humedales, esta área disponible estará dispuesta por el pulso de inundación (Van Dam et al., 2013). Dado que la producción de pesca en el humedal está determinada, en parte, por las conexiones entre el humedal con los ríos conexos u otros cuerpos de agua permanentes o semipermanentes, los niveles de producción de actividades de pesca estarán en función de esta conectividad (McCauley et al., 2015). Así, el pulso de inundación y las actividades económicas de ganadería, agricultura y pesca interactúan a través del área inundada y el área disponible para

actividades productivas, por tanto, ambas variables son consideradas en esta investigación como variables respuesta de la co-evolución socio-hidrológica asociada a humedales tropicales, considerando la dinámica del pulso de inundación como un indicador del estado biofísico del humedal y los niveles de producción del estado económico/social asociado a estos socio-ecosistemas.

Una vez que se definieron el pulso de inundación y los niveles productivos como variables respuesta, se seleccionaron de las variables que permiten describir la interacción entre las variables respuesta, las cuáles se agruparon por categorías según su naturaleza. Se definieron seis categorías de variables que permiten explicar y analizar la interacción entre las variables respuesta: i) hidrología, ii) geomorfología, iii) usos del suelo/coberturas vegetales, iv) gobernanza formal, v) conectividad/biomasa de peces y vi) tecnología hidráulica. Estas relaciones entre categorías y variables respuesta (Tabla 1) se presentan de forma detallada a continuación:

**Tabla 1.1.** Relaciones identificadas en la literatura para cada una de las categorías y variables seleccionadas. Se establece una métrica de relación entre categorías. (Fuente: los autores)

Relación		Variables explicativas	Métrica de relación	Referencia
Hidrología	→ Pulso de inundación	<b>Exógenas:</b> Variabilidad Ambiental, Cambio climático, Precipitación en la cuenca, caudal. <b>Endógenas:</b> Temperatura, Evaporación, Precipitación local, flujo subterráneo.	Índice de balance hidrológico	(Daskin et al., 2019; Junk et al., 1989; Ricaurte et al., 2019; Van Dam et al., 2013)
Geomorfología	→ Pulso de inundación	<b>Endógenas:</b> Procesos geomorfológicos dominantes, Suborden de suelos.	Zona potencialmente inundable	(Frenkel et al., 1978; Kadykalo and Findlay, 2016; Lisenby et al., 2019; Schallenberg et al., 2013)
Pulso de inundación	→ Usos/coberturas del suelo	<b>Endógenas:</b> Usos del suelo, Cobertura vegetal, Nutrientes.	Área disponible para actividades productivas	(Sultana et al., 2020; Van Dam et al., 2013)
Pulso de inundación	→ Biomasa de peces	<b>Endógenas:</b> Nivel de profundidad del agua	Conectividad de cuerpos de agua	(Arias et al., 2013; McCauley et al., 2015)
Biomasa de peces	→ Niveles de producción	<b>Endógenas:</b> Cantidad en biomasa de peces	Disponibilidad de captura	(Arias et al., 2013)
Usos/coberturas del suelo	→ Niveles de producción	<b>Exógenas:</b> Demandas del mercado, políticas nacionales.	Unidad producida/área	(Pande and Savenije, 2016; Ricaurte et al., 2019; Sultana et al., 2020)
Tecnología hidráulica	→ Niveles de producción	<b>Endógenas:</b> Construcción de tecnología hidráulica.	Nivel de control hidráulico	(Davidson, 2014; Di Baldassarre et al., 2013)

#### a. Categoría Hidrología:

Dado que la hidrología es una de las categorías determinantes de la dinámica de los pulsos de inundación de humedales tropicales (Ricaurte et al., 2019), se estableció a partir de la revisión de literatura que un indicador adecuado para determinar la cantidad aproximada de

agua que un humedal tendría a su disposición es el índice de humedad (IH) como se muestra en la ecuación (1), este índice está en función de la precipitación local ( $Pl$ ), la precipitación en la cuenca ( $Pc$ ) que se asocia a la conexión a los humedales a través de procesos de escorrentía, y finalmente, por la humedad saliente del humedal en forma de evaporación y evapotranspiración ( $ET$ ):

$$IH = f(VC(f(Pl, Pc) - ET)) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Además, se considera la incidencia de variables externas como la variabilidad climática ( $VC$ ) (i.e. ENSO, ONI, etc.) y el cambio climático sobre el índice de humedad (ecuación 1). Índices similares han sido utilizados en el trópico por autores como Daskin et al., (2019) y Van Dam et al., (2013) para caracterizar la humedad que predomina en humedales.

#### b. Categoría Geomorfología:

Los humedales son ecosistemas que se forman en el vaso superficial dispuesto por los procesos geomorfológicos (De-Campos et al., 2013), por tanto, su incidencia en la dinámica de expansión y distribución de la mancha de inundación del humedal puede ser medido a través del área potencialmente inundable (API), la cual está determinada por los procesos geomorfológicos fluviales y el tipo de suelo con presencia en el humedal (Kadykalo and Findlay, 2016; Schallenberg et al., 2013).

Esta área inundable, medida en porcentaje, está en función de la relación entre los procesos y características de geomorfología fluvial como transporte, erosión y depósito, y las características del suelo que determinan la infiltración del agua sobre al subsuelo (Lisenby et al., 2019; Valente et al., 2013), donde el porcentaje de área potencialmente inundable (API) estará definido por la relación entre las áreas dominadas por procesos geomorfológicos de acumulación y sedimentación y, los tipos de suelo que promuevan la retención de agua en superficie, en relación al área total del humedal o del área total de análisis.

#### c. Categoría Gobernanza

La gobernanza, está asociada a los procesos de toma de decisiones formal (i.e. normatividad) y no formal, por parte de poderes públicos, institucionales y sociales sobre un territorio, así, los procesos de gobernanza formal (i.e. declaratorias de protección, planes de ordenamiento, etc.) y no formal (i.e. acuerdos sociales, etc.) pueden incidir sobre los patrones de uso del suelo en el territorio, y por ende, modificar las actividades económicas asociadas al uso del suelo y las coberturas vegetales del territorio (Eppink et al., 2004; Srinivasan et al., 2012). Trabajos como los planteados por Garcia Corrales et al., (2019) y McCoskey et al., (2011) ponen en evidencia cómo políticas públicas asociadas a usos del suelo para conservación o desarrollo y seguridad poblacional ante conflictos armados, pueden generar cambios importantes en las coberturas vegetales o en la funcionalidad eco-hidrológica de los humedales. El acceso a la tierra sin políticas claras en el uso del suelo puede conllevar a

procesos de deforestación o políticas orientadas a manejo sostenible pueden generar procesos de reforestación y conservación de la biodiversidad.

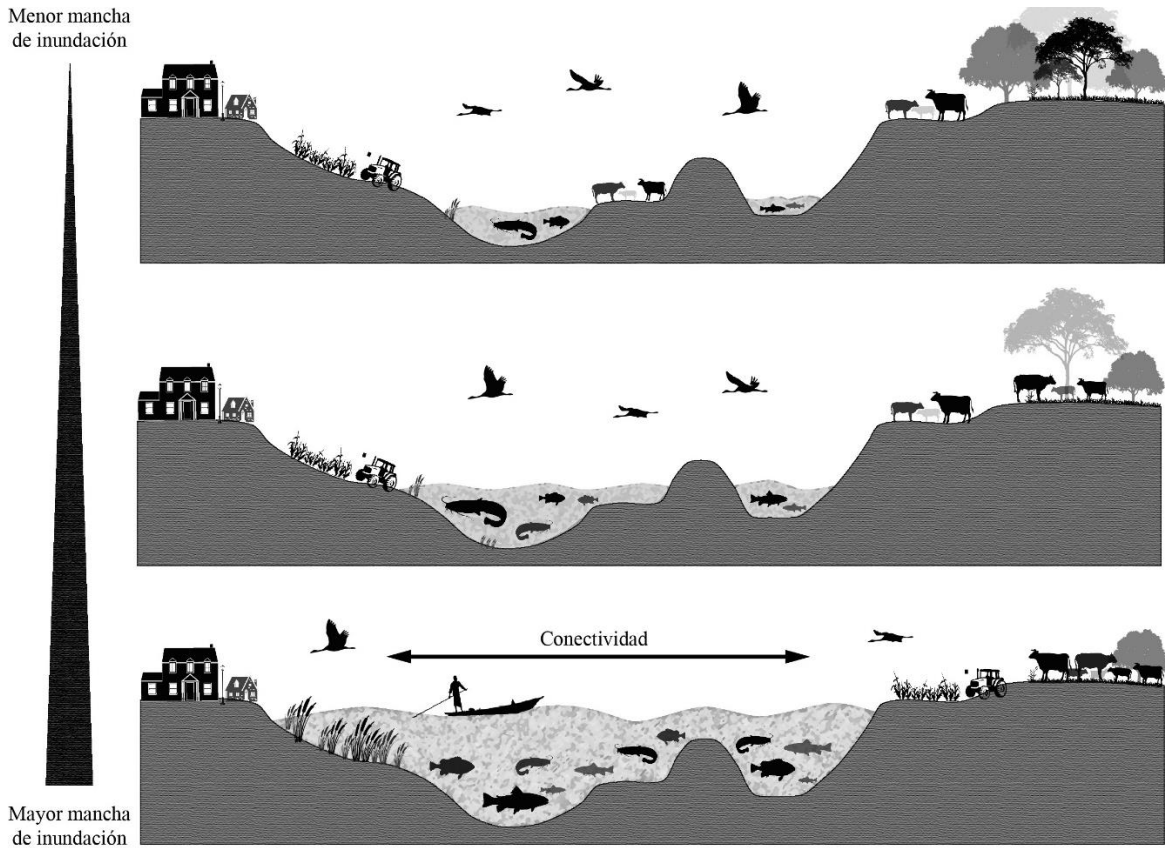
Estas reglas formales asociadas al uso del suelo pueden modificar la distribución de las coberturas vegetales, las dinámicas de nutrientes en el suelo y los procesos de escorrentía-infiltración, lo que modificaría la calidad y cantidad del agua de los cuerpos de hídricos receptores (Chang et al., 2014). Está claro que los procesos de gobernanza y su relación con las políticas de usos del suelo son determinantes en el ordenamiento territorial y conllevan a la toma de decisiones orientadas a conservación, desarrollo económico y/o sostenibilidad del territorio, lo cual tiene una implicación directa con la dinámica ecohidrológica de los sistemas socio-hidrológicos. Así, esta investigación toma las reglas de gobernanza formal como una categoría determinante en la co-evolución humano-ecosistemas de humedal, estableciendo como referente las diferentes normas formales de usos del suelo que se tengan sobre los ecosistemas de humedal. Sin embargo, aspectos cognitivos, de relacionamiento y de desarrollo espiritual derivadas de la relación entre los sistemas sociales y el territorio también pueden generar procesos de cambio o conservación de los ecosistemas, por tanto, es necesario acoplar este tipo de dinámicas en estudios futuros bajo el enfoque de sistemas socio-hidrológicos asociados a humedales.

#### d. Categorías Usos del suelo, coberturas vegetales.

Las dinámicas de expansión y contracción del humedal como respuesta de las dinámicas hidrológicas y geomorfológicas, pueden modificar la distribución de las coberturas vegetales adyacentes al humedal, lo que tiene un impacto directo en los usos del suelo (Arias et al., 2013; Van Dam et al., 2013). Esta relación se mide a través de un indicador de área disponible para actividades productivas dejada por el pulso de inundación. Además, para el caso específico de las llanuras de inundación, estas zonas de transición acuático terrestre presentan características de nutrientes en el suelo que son de alta productividad para los sistemas sociales (Junk et al., 1989; Junk and Wantzen, 2004).

El pulso de inundación, las coberturas vegetales y la conectividad entre cuerpos de agua permanentes y semipermanentes determinan paisajes como los presentados en la figura 3 y su relación con los niveles de producción económica. Por ejemplo, la producción ganadera suele incrementarse ante el aumento de área disponible para pastoreo y disminución del área cubierta por el humedal (IDEAM and The Nature Conservancy, 2019; Pande and Savenije, 2016; Sultana et al., 2020; Van Dam et al., 2013). También, siendo la agricultura una actividad que también depende de las prácticas y técnicas empleadas, es una actividad que también suele verse beneficiada por el aumento de áreas disponibles para cultivos (Junk et al., 2013; Pande and Savenije, 2016; Van Dam et al., 2013). Así, un esquema general de las dinámicas en el territorio que se dan ante diferentes momentos hidrológicos se presenta en la figura 3, donde se evidencia como ante eventos hidrológicos de sequía los sistemas sociales tienden a ocupar las áreas disponibles para el establecimiento de actividades económicas, mientras que, en épocas de inundación estas zonas pasan a estar cubiertas por agua y los

procesos productivos se desplazan a otras zonas, generando cambios en las coberturas vegetales del territorio.



**Figura 1.3.** Dinámicas socio-hidrológicas de los humedales bajo diferentes niveles de inundación. Sequía, transición e inundaciones (Fuente: los autores).

e. Categoría Conectividad y biomasa de peces:

Las dinámicas de expansión, contracción y frecuencia del pulso de inundación de los humedales determinan los diferentes niveles de profundidad del cuerpo de agua, la conectividad de los cuerpos permanentes del humedal con otros cuerpos de agua permanentes o semipermanentes y la funcionalidad ecológica en la transición acuático-terrestre, la cual es determinante en la distribución y calidad de los sedimentos y nutrientes dispuestos en el suelo, en general, de la calidad del agua y suelos del humedal. La conectividad hidrológica, por ejemplo, modifica las zonas de distribución de los peces y sus dinámicas reproductivas, esto debido a la sensibilidad en el sistema sensorial que presentan estos organismos, la cual los hace sensibles a cambios en el caudal líquido y sedimentológico de las sistemas fluviales, y por ende, la perturbación de éstas condiciones incide en el sistema nervioso y endocrino estos, afectando entre otras funciones, la reproducción y la disponibilidad en biomasa de estos organismos (McCauley et al., 2015; Van Dam et al., 2013). Así, la actividad pesquera, aunque depende de parámetros intrínsecos cada especie y su ciclo reproductivo, puede disminuirse como consecuencia de la pérdida de conectividad entre cuerpos de agua y la

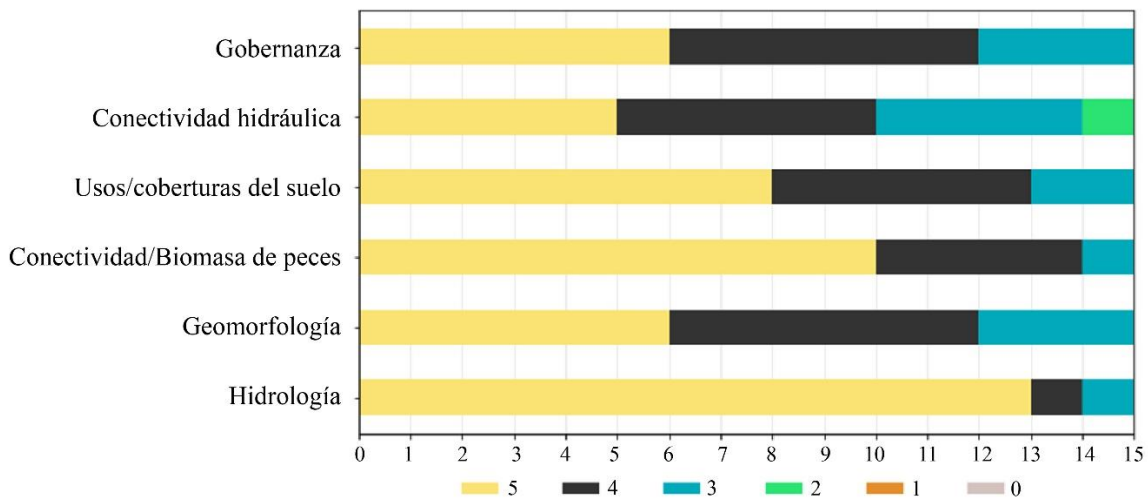
disminución de los cuerpos de agua permanentes (Arias et al., 2013; McCauley et al., 2015). En la figura 2, se esquematiza la dinámica de las poblaciones ícticas en diferentes escenarios de conectividad hidrológica, siendo el escenario con mayor conectividad hidrológica el que tiene una incidencia en mayor biomasa de peces debido al mejoramiento del hábitat.

f. Categoría tecnología hidráulica:

Con el objetivo de disminuir el riesgo por inundaciones, controlar los pulsos de inundación de los humedales y aumentar el área disponible para actividades humanas e incluso aumentar la productividad de algunas actividades económicas, los sistemas sociales, dependiendo de su capacidad económica, demandan la construcción de tecnología hidráulica como diques, canales y presas para aumentar su bienestar, sin embargo, estas prácticas pueden generar un deterioro en los procesos de expansión, frecuencia y profundidad de los humedales (Davidson, 2014; Di Baldassarre et al., 2013; Van Emmerik et al., 2014). La implementación de este tipo de infraestructuras conlleva a un cambio en la dinámica temporal y espacial del pulso de inundación de los humedales y su relación con la funcionalidad ecológica, lo cual genera, por ejemplo, la pérdida de nutrientes en la zona acuático terrestre, la oferta de sedimentos y la calidad del agua (Heath and Plater, 2010; Ricaurte and Max Finlayson, 2017).

#### **4.3. Red causal socio-hidrológica**

Para la validación de las variables y selección de categorías seleccionadas se realizó una encuesta dirigida a conocimiento experto. Se les preguntó a 15 expertos sobre el grado de importancia que consideraban tenía cada una de las categorías, variables e indicadores descritos previamente (Tabla 1) dentro del análisis socio-hidrológico, esta importancia se calificó asignando valores de cero a cinco, donde cero es nada importante y cinco muy importante. Respecto a las categorías, el 93% de los expertos consideró la hidrología como una categoría importante o muy importante para el análisis de la co-evolución humano-ecosistema de humedal (Figura 4), así mismo, el 80% consideró importante o muy importante la categoría de geomorfología, el 93% lo consideró así mismo para el componente de conectividad y biomasa de peces, el 87% para la categoría de usos del suelo y coberturas vegetales, el 67% para la categoría de tecnología hidráulica y el 80% para la gobernanza. Por otra parte, un 27% de los expertos recomendó consolidar a futuro las dinámicas de gobernanza no formal asociadas a los patrones culturales asociados al humedal y el 20% recomendó considerar al pulso de inundación desde su dinámica tanto hidrológica como de calidad del agua y ecológica.

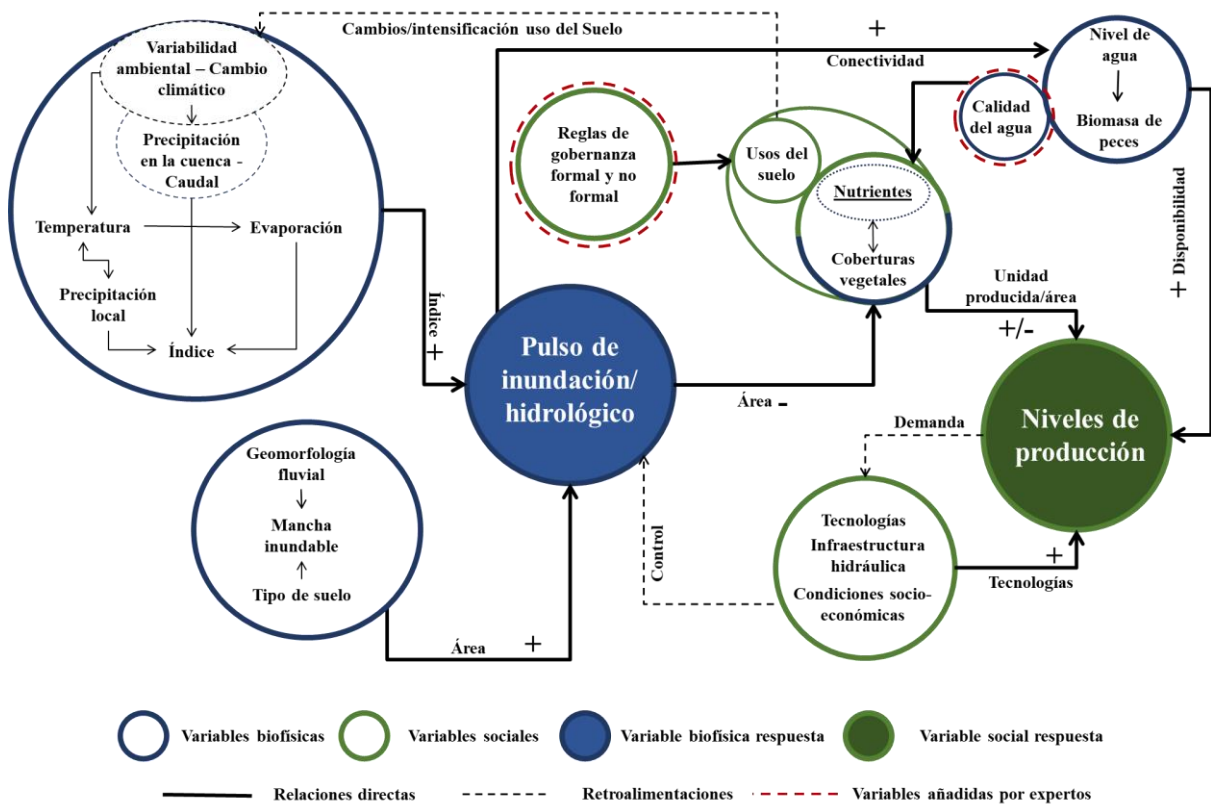


**Figura 1.4.** Valoración de 15 expertos en el funcionamiento hidrológico de humedales tropicales y enfoques socio-ecosistémicos sobre la importancia de las categorías Hidrología, Geomorfología, Conectividad hidrológica y biomasa de peces, usos del suelo y coberturas vegetales, tecnología hidráulica y gobernanza en el análisis de la co-evolución humano-ecosistema de humedal. La importancia se calificó asignando valores de cero a cinco, donde cero es nada importante y cinco muy importante.

Para la variable de hidrología el 80% de los expertos consideró que las variables y el indicador de relación seleccionados son adecuados para representar la humedad disponible en los humedales. El 73% de los expertos consideró que seleccionar al área potencialmente inundable como métrica de relación entre la categoría de geomorfología y pulso de inundación es adecuado, de igual modo, en la categoría de conectividad y biomasa de peces, el 67% de los expertos consideró adecuada la relación a través del análisis de la conectividad hidrológica, sin embargo, se recomendó hacer salvedad en el tipo de ictiología presente en el humedal analizado, dado que las dinámicas varían según la especie y según se tenga un ambiente salino o no salino y más variables asociadas a la calidad del agua. En cuanto a las relaciones entre los usos del suelo, las coberturas vegetales y la gobernanza, el 80% los expertos validaron como importante o muy importante las relaciones previamente definidas, sin embargo, el 27% de los expertos recomendaron incluir con mayor peso a variables provenientes de los procesos de gobernanza no formal y la inclusión de vegetación acuática al análisis de las coberturas vegetales.

A partir de la definición final de las variables respuesta, las categorías explicativas y los índices de relación entre categorías se creó una red causal definitiva (Figura 5), incluyendo las sugerencias aportadas por los expertos, como calidad del agua y reglas de gobernanza tanto formales como no formales. Así, se establecieron las relaciones entre variables a través flechas continuas y, se les asignó el signo “+” a las relaciones directamente proporcionales y el signo “-” a las inversamente proporcionales. En este sentido, el pulso de inundación está

determinado por los componentes de hidrología y geomorfología. Así, el pulso y la mancha de inundación determinan la distribución en área de las coberturas vegetales, entendiendo que a mayor extensión de la mancha de inundación menor será el área disponible para actividades agrícolas y ganaderas, las cuales a su vez estarán determinadas también por la incidencia de gobernanza formal y no formal. Además, la dinámica de expansión del pulso de inundación determinará la conectividad hidrológica y la calidad del agua entre cuerpos de agua permanentes y semipermanentes y, por ende, la disponibilidad en biomasa de peces. Los niveles de producción económica estarán determinados por el área disponible para realizar la actividad y la disponibilidad en biomasa de peces. El nivel de producción de actividades económicas se seleccionó como la variable respuesta de la variación del sistema social ante los procesos funcionales de las variables biofísicas.



**Figura 1.5.** Red causal para el análisis de la co-evolución humano-ecosistemas de humedal en contextos tropicales.

Para analizar la co-evolución entre el sistema hidrológico y social es necesario realizar un análisis bidireccional, por tanto, en la tabla 2 se presentan las retroalimentaciones que se dan a partir del sistema social sobre las dinámicas hidrológica de los humedales.



**Tabla 1.2.** Retroalimentaciones identificadas en la literatura para analizar las relaciones del componente social sobre el biofísico. Se establece una métrica de relación entre categorías. (Fuente: los autores).

Retroalimentaciones		Proceso Afectado	Métrica de relación	Referencia
Usos/coberturas del suelo	→ Hidrología	Reciclaje de precipitación, escorrentía y cambio en la distribución espacial y temporal de la lluvia.	Cambios/intensificación de usos del suelo	(Birhanu et al., 2019; Euliss and Mushet, 1996; Garg et al., 2019; Voldseth et al., 2007)
Niveles de producción	→ Tecnología hidráulica	Demanda en la implementación de control hidráulico del pulso de inundación.	Demanda de tecnología hidráulica	(Sultana et al., 2020)
Tecnología hidráulica	→ Pulso de inundación/hidrológico	Dinámica hidráulica del pulso de inundación	Nivel de control hidráulico	(Di Baldassarre et al., 2013; Kadykalo and Findlay, 2016)
Usos/coberturas vegetales del suelo	→ Pulso de inundación/hidrológico	Expansión y contracción de la mancha de inundación	Control de área potencial de inundación	(Davidson, 2014; Horel et al., 2015; Junk et al., 2013; McCauley et al., 2015)

En las relaciones explicadas, la definición de categorías evidenció como las coberturas vegetales de los humedales pueden cambiar a partir de la dinámica de expansión del pulso de inundación y de los diferentes usos del suelo dados sobre el territorio, sin embargo, los cambios en las coberturas vegetales y las intensificaciones en los usos del suelo también pueden modificar la dinámica hidrológica, esto a través de la afectación a procesos funcionales como el reciclaje de precipitación, la dinámica entre escorrentía/infiltración y las modificaciones a la distribución espacial y temporal de la lluvia (Birhanu et al., 2019; Garg et al., 2019; Voldseth et al., 2007). De igual modo, la construcción de tecnología hidráulica, dependiendo de su tamaño y ubicación, pueden modificar significativamente a través de un control hidráulico la expansión y distribución de las manchas de inundación de los humedales (Di Baldassarre et al., 2013). La construcción de tecnología hidráulica suele demandarse por parte del sistema social para aumentar las áreas disponibles de las actividades económicas y aumentar los niveles de producción asociadas a estas (Sultana et al., 2020). Esto, soportado con lo expresado por Ramsar-Convention, (2015), donde expresan como la pérdida mundial de área cubierta por los humedales está altamente relacionada con la recuperación de tierras para usos de productividad económica. Finalmente, al analizar ambas direcciones del modelo socio-hidrológico a través de las relaciones y métricas planteadas se pueden establecer modelos de simulación de la red causal en diferentes momentos históricos de un humedal, evaluando así sus dinámicas de co-evolución pasadas y estableciendo una línea base para la simulación a futuro del sistema socio-hidrológico bajo escenarios de cambio ambiental.

## 5. Discusión

El enfoque de co-evolución asociado a sistemas socio-hidrológicos busca centrarse en los análisis temporales de las dinámicas hidrológicas y como estas dinámicas modifican y son modificadas por las intervenciones antrópicas (Sivapalan and Blöschl, 2015). Los humedales son ecosistemas donde la hidrología juega un papel determinante en la funcionalidad socio-ecológica, por tanto, analizar la co-evolución entre las dinámicas hidrológicas y sociales pueden generar una línea base para la toma de decisiones en estos territorios (Junk et al., 2013; Ricaurte et al., 2019; Valente et al., 2013). Esta investigación propone al pulso de inundación como una de las principales variables que definen la funcionalidad biofísica de los humedales, esto en línea con lo planteado por Junk W.J. Wantzen, (2004), adicionalmente también expone a los niveles de producción como un indicador de las dinámicas de intervención del territorio del sistema social. Analizar la co-evolución entre el pulso de inundación y los niveles de producción explicarían, por ejemplo, cómo las dinámicas sociales han modificado la funcionalidad del ecosistema, los procesos de expansión, contracción y frecuencia de inundación a través de intervenciones asociadas a la implementación de tecnología hidráulica, cambios en las coberturas vegetales e intensificaciones en los usos del suelo. Así mismo, permitiría analizar cómo las inundaciones y/o sequías intensificadas por el cambio climático y la variabilidad ambiental derivan en impactos sobre la funcionalidad ecológica de los humedales que soportan servicios ecosistémicos de regulación, aprovisionamiento y culturales.

La dificultad operativa de este enfoque de co-evolución radica en la integración de escalas espaciotemporales. Asociado a las escalas espaciales hallamos que las categorías que determinan la funcionalidad del pulso de inundación son la hidrología y la geomorfología, las cuales se pueden analizar a nivel de cuenca hidrológica, sin embargo, las dinámicas sociales asociadas a los usos del suelo y la toma de decisiones de gestión y planificación del territorio, no siempre son posibles analizarlas a escala de cuenca debido a la heterogeneidad de escalas en la que ocurren los procesos sociales e hidrológicos. Si bien muchas dinámicas hidrológicas responden a una funcionalidad a nivel de cuenca, las tomas de decisiones suelen darse en un nivel espacial con límites administrativos. En este sentido, uno de los retos a la hora de implementar esta red causal será integrar las variables que responden a dinámicas a nivel cuenca y las variables que están determinadas por procesos más locales. Por otro lado, está el reto de integrar las diferentes escalas temporales en las que se dan cada una de las categorías seleccionadas, esto debido a que categorías como la hidrología pueden abordarse desde dinámicas interanuales, anuales, mensuales e inclusive, diarias y horarias, mientras los procesos geomorfológicos, asociados a una geología local, son descritos por procesos dados entre décadas o centenas de años. De igual modo, es un reto a futuro integrar variables que requieren un mayor criterio ecológico y biológico, debido, por ejemplo, a que las escalas de distribución y reproducción de la comunidad de peces y sus niveles productivos varían según la especie; así mismo, al hecho que la distribución de coberturas vegetales de las especies

acuáticas requieren una explicación más asociada con la calidad del agua que con respecto a la calidad y las dinámicas acuático-terrestres.

Una forma de acercarse a la integración de escalas en la aplicación de esta red causal es simular las interacciones socio-hidrológicas a través de metodologías que permitan relacionar las variables con enlaces de causalidad. En este sentido, métodos como la Dinámica de Sistemas, Redes Bayesianas o Análisis de Redes Neuronales, proporcionan unas ventajas significativas para la integración de escalas y aplicaciones en los planes de gestión ambiental con enfoques interdisciplinarios. Particularmente las Redes Bayesianas, permiten analizar las relaciones entre variables y categorías a través de relaciones causa/efecto definidas por probabilidades de ocurrencia, es decir, a través de probabilidades condicionales a partir de un conjunto de eventos independientes (Hoshino et al., 2016), lo cual supone unas ventajas en la integración de escalas, debido a la disminución en la incertidumbre de las relaciones dadas por probabilidades y no por ecuaciones estructurales. Las redes bayesianas, además, permiten trabajar bajo fenómenos ambientales condicionados por variables cualitativas, permiten integrar conocimiento empírico con datos estadísticos y trabajar con bases de datos incompletos, lo cual sugiere una ventaja en la construcción de modelos interdisciplinarios con la integración de actores (Forio et al., 2020; Jensen and Nielsen, 2001; McCann et al., 2006a; Pérez-Miñana, 2016; Rositano and Ferraro, 2014; Sun and Müller, 2013).

## **6. Conclusiones**

El enfoque de co-evolución permite analizar los sistemas hidrológicos y sociales asociados a los humedales tropicales desde una perspectiva teórica; sin embargo, realizar modelos de simulación de este tipo de sistemas es necesario para establecer las escalas espaciotemporales en las que se relacionan las variables. La red causal propuesta puede ser abordada desde diferentes escalas espaciales y temporales, permitiendo analizar, por ejemplo, cómo la implementación de tecnología hidráulica en un año específico puede repercutir en la funcionalidad hidrológica del pulso de inundación, no sólo en el corto plazo sino también en el mediano y largo plazo. Asimismo, la red propuesta permitiría analizar los efectos de los cambios o la intensificación de los usos del suelo en la distribución de la superficie de la cobertura del suelo y, al mismo tiempo, analizar cómo estos cambios en la superficie pueden generar cambios en la funcionalidad hidrológica del humedal. De este modo, analizar los ecosistemas de humedales desde una perspectiva co-evolutiva a través del modelo propuesto permite avanzar en el conocimiento de los humedales tropicales desde un punto de vista ecológico y de funcionalidad social, en cómo las intervenciones antrópicas pueden generar cambios en la funcionalidad hidrológica de los humedales y cómo estas alteraciones a largo o medio plazo pueden afectar a la dinámica productiva de los sistemas sociales.

La aplicación de la red causal propuesta en esta investigación permite analizar los ecosistemas de humedal desde un enfoque socio-hidrológico, donde las dinámicas sociales se consideran como un factor determinante en las dinámicas biofísicas del ecosistema y viceversa. Para alcanzar los objetivos de ecosistemas sostenibles y generar planes de gestión

y planificación del territorio, es necesario realizar un análisis histórico de la relación entre los pulsos de inundación y las actividades económicas/sociales asociadas a los humedales, la red causal propuesta puede generar información de línea base para la toma de decisiones, donde prevalezca la sostenibilidad de la funcionalidad de los humedales y los servicios ecosistémicos que estos proporcionan a la sociedad. Es necesario incluir a futuro variables que den mayor solidez al componente social de la red causal, en este sentido, se propone fortalecer la red causal con variables provenientes de la gobernanza no formal.

## 7. Referencias

- Acreman, M., Holden, J., 2013. How wetlands affect floods. *Wetlands* 33, 773–786. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0473-2>
- Al-Amin, S., Berglund, E.Z., Mahinthakumar, G., Larson, K.L., 2018. Assessing the effects of water restrictions on socio-hydrologic resilience for shared groundwater systems. *J. Hydrol.* 566, 872–885. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.045>
- Arias, M.E., Cochrane, T.A., Norton, D., Killeen, T.J., Khon, P., 2013. The flood pulse as the underlying driver of vegetation in the largest wetland and fishery of the mekong basin. *Ambio* 42, 864–876. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0424-4>
- Birhanu, A., Masih, I., van der Zaag, P., Nyssen, J., Cai, X., 2019. Impacts of land use and land cover changes on hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Phys. Chem. Earth.* <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.006>
- Bullock, A., Acreman, M., 2003. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-7-358-2003>
- Chang, H., Thiers, P., Netusil, N.R., Yeakley, J.A., Rollwagen-Bollens, G., Bollens, S.M., Singh, S., 2014. Relationships between environmental governance and water quality in a growing metropolitan area of the Pacific Northwest, USA. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 1383–1395. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1383-2014>
- Collins, S.L., Knapp, A.K., Smith, M.D., Magnuson, J.J., Melack, J.M., Harlan, S.L., Orenstein, D.E., Grove, J.M., Robertson, G.P., Grimm, N.B., Childers, D.L., Whitmer, A.C., Gragson, T.L., Kofinas, G.P., Carpenter, S.R., Ogden, L.A., McDowell, W.H., Swinton, S.M., Kaye, J.P., 2010. An integrated conceptual framework for long-term social–ecological research. *Front. Ecol. Environ.* 9, 351–357. <https://doi.org/10.1890/100068>
- Cumming, G.S., Buerkert, A., Hoffmann, E.M., Schlecht, E., Von Cramon-Taubadel, S., Tschardtke, T., 2014. Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services. *Nature* 515, 50–57. <https://doi.org/10.1038/nature13945>
- Daskin, J.H., Aires, F., Staver, A.C., 2019. Determinants of tree cover in tropical floodplains. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 286. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1755>
- Davidson, N.C., 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Mar. Freshw. Res.* 65, 934–941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>

- De-Campos, A.B., de Cedro, D.A.Ô.B., Tejerina-Garro, F.L., Bayer, M., Carneiro, G.T., 2013. Spatial distribution of tropical wetlands in Central Brazil as influenced by geological and geomorphological settings. *J. South Am. Earth Sci.* 46, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.12.001>
- de Groot, R., Stuij, M., Finlayson, M., Davidson, N., 2006. Valuing wetlands Guidance for valuing the benefits derived from wetland ecosystem services, Ramsar Technical Report N°3/CBD Technical Series No. 27. <https://doi.org/No. H039735>
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J.L., Blöschl, G., 2013. Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., Larigauderie, A., Adhikari, J.R., Arico, S., Báldi, A., Bartuska, A., Baste, I.A., Bilgin, A., Brondizio, E., Chan, K.M.A., Figueroa, V.E., Duraiappah, A., Fischer, M., Hill, R., Koetz, T., Leadley, P., Lyver, P., Mace, G.M., Martin-Lopez, B., Okumura, M., Pacheco, D., Pascual, U., Pérez, E.S., Reyers, B., Roth, E., Saito, O., Scholes, R.J., Sharma, N., Tallis, H., Thaman, R., Watson, R., Yahara, T., Hamid, Z.A., Akosim, C., Al-Hafedh, Y., Allahverdiyev, R., Amankwah, E., Asah, T.S., Asfaw, Z., Bartus, G., Brooks, A.L., Caillaux, J., Dalle, G., Darnaedi, D., Driver, A., Erpul, G., Escobar-Eyzaguirre, P., Failler, P., Fouda, A.M.M., Fu, B., Gundimeda, H., Hashimoto, S., Homer, F., Lavorel, S., Lichtenstein, G., Mala, W.A., Mandivenyi, W., Matczak, P., Mbizvo, C., Mehrdadi, M., Metzger, J.P., Mikissa, J.B., Moller, H., Mooney, H.A., Mumby, P., Nagendra, H., Nesshover, C., Oteng-Yeboah, A.A., Pataki, G., Roué, M., Rubis, J., Schultz, M., Smith, P., Sumaila, R., Takeuchi, K., Thomas, S., Verma, M., Yeo-Chang, Y., Zlatanova, D., 2015. The IPBES Conceptual Framework - connecting nature and people. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 14, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- Eppink, F. V., Van Den Bergh, J.C.J.M., Rietveld, P., 2004. Modelling biodiversity and land use: Urban growth, agriculture and nature in a wetland area. *Ecol. Econ.* 51, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.04.011>
- Euliss, N.H., Mushet, D.M., 1996. Water-level fluctuation in wetlands as a function of landscape condition in the prairie pothole region. *Wetlands* 16, 587–593. <https://doi.org/10.1007/BF03161350>
- Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., Rockstrom, J., 2010. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecol. Soc.* 15, 20. <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>
- Forio, M.A.E., Villa-Cox, G., Van Echelpoel, W., Ryckebusch, H., Lock, K., Spanoghe, P., Deknock, A., De Troyer, N., Nolivos-Alvarez, I., Dominguez-Granda, L., Speelman, S., Goethals, P.L.M., 2020. Bayesian Belief Network models as trade-off tools of ecosystem services in the Guayas River Basin in Ecuador. *Ecosyst. Serv.* 44, 101124. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101124>
- Frenkel, H., Goertzen, J.O., Rhoades, J.D., 1978. Effects of Clay Type and Content, Exchangeable Sodium Percentage, and Electrolyte Concentration on Clay Dispersion

- and Soil Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 32–39.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010008x>
- Gain, A.K., Hossain, M.S., Benson, D., Di Baldassarre, G., Giupponi, C., Huq, N., 2020. Social-ecological system approaches for water resources management. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1780647>
- Garcia Corrales, L.M., Avila Rangel, H., Gutierrez Llantoy, R., 2019. Land-use and socioeconomic changes related to armed conflicts: A Colombian regional case study. *Environ. Sci. Policy* 97, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.012>
- Garg, V., Nikam, B.R., Thakur, P.K., Aggarwal, S.P., Gupta, P.K., Srivastav, S.K., 2019. Human-induced land use land cover change and its impact on hydrology. *HydroResearch* 1, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.06.001>
- Han, S., Liu, Y., 2017. Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3619–3633. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3619-2017>
- Harbor, J.M., 1994. A Practical Method for Estimating the Impact of Land-Use Change on Surface Runoff, Groundwater Recharge and Wetland Hydrology. *J. Am. Plan. Assoc.* 60, 95–108. <https://doi.org/10.1080/01944369408975555>
- Heath, S.K., Plater, A.J., 2010. Records of pan (floodplain wetland) sedimentation as an approach for post-hoc investigation of the hydrological impacts of dam impoundment: The Pongolo river, KwaZulu-Natal. *Water Res.* 44, 4226–4240. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.05.026>
- Horel, Á., Tóth, E., Gelybó, G., Kása, I., Bakacsi, Z., Farkas, C., 2015. Effects of Land Use and Management on Soil Hydraulic Properties. *Open Geosci.* 7, 1442–1454. <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0053>
- Hoshino, E., Vanputten, I., Girsang, W., Resosudarmo, B.P., Yamazaki, S., 2016. A Bayesian belief network model for community-based coastal resource management in the Kei Islands, Indonesia. *Ecol. Soc.* 21. <https://doi.org/10.5751/ES-08285-210216>
- IDEAM, The Nature Conservancy, 2019. Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca.
- Ivory, S.J., McGlue, M.M., Spera, S., Silva, A., Bergier, I., 2019. Vegetation, rainfall, and pulsing hydrology in the Pantanal, the world’s largest tropical wetland. *Environ. Res. Lett.* 14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4ffe>
- Janse, J.H., van Dam, A.A., Hes, E.M.A., de Klein, J.J.M., Finlayson, C.M., Janssen, A.B.G., van Wijk, D., Mooij, W.M., Verhoeven, J.T.A., 2019. Towards a global model for wetlands ecosystem services. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 36, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.09.002>
- Jaramillo, F., Desormeaux, A., Hedlund, J., Jawitz, J.W., Clerici, N., Piemontese, L., Rodríguez-Rodríguez, J.A., Anaya, J.A., Blanco-Libreros, J.F., Borja, S., Celi, J., Chalov, S., Chun, K.P., Cresso, M., Destouni, G., Dessu, S.B., Di Baldassarre, G., Downing, A., Espinosa, L., Ghajarnia, N., Girard, P., Gutiérrez, Á.G., Hansen, A., Hu,

- T., Jarsjö, J., Kalantary, Z., Labbaci, A., Licero-Villanueva, L., Livsey, J., Machotka, E., McCurley, K., Palomino-ángel, S., Pietron, J., Price, R., Ramchunder, S.J., Ricaurte-Villota, C., Ricaurte, L.F., Dahir, L., Rodríguez, E., Salgado, J., Sannel, A.B.K., Santos, A.C., Seifollahi-Aghmiuni, S., Sjöberg, Y., Sun, L., Thorslund, J., Vigouroux, G., Wang-Erlandsson, L., Xu, D., Zamora, D., Ziegler, A.D., Åhlén, I., 2019. Priorities and interactions of Sustainable Development Goals (SDGs) with focus on wetlands. *Water (Switzerland)* 11, 1–21. <https://doi.org/10.3390/w11030619>
- Jensen, F. V., Nielsen, T.D., 2001. *Bayesian networks and decision graphs*, 1st ed. Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3502-4>
- Jeong, H., Adamowski, J., 2016. A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale. *Agric. Water Manag.* 171, 89–107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.019>
- Junk, W.J., An, S., Finlayson, C.M., Gopal, B., Květ, J., Mitchell, S.A., Mitsch, W.J., Robarts, R.D., 2013. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: A synthesis. *Aquat. Sci.* 75, 151–167. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>
- Junk, W.J., Bayley, P.B., Sparks, R.E., 1989. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028909>
- Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Lourival, R., Wittmann, F., Kandus, P., Lacerda, L.D., Bozelli, R.L., Esteves, F.A., Nunes da Cunha, C., Maltchik, L., Schöngart, J., Schaeffer-Novelli, Y., Agostinho, A.A., 2014. Brazilian wetlands: Their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 24, 5–22. <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>
- Junk, W.J., Wantzen, K.M., 2004. The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications-an update, in: *Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*. Food and Agriculture Organization and Mekong River Commission, FAO Regional Office for Asia and the Pacific., pp. 117–149.
- Kadykalo, A.N., Findlay, C.S., 2016. The flow regulation services of wetlands. *Ecosyst. Serv.* 20, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.06.005>
- Kramer, D.B., Hartter, J., Boag, A.E., Jain, M., Stevens, K., Nicholas, K.A., McConnell, W.J., Liu, J., 2017. Top 40 questions in coupled human and natural systems (CHANS) research. *Ecol. Soc.* 22. <https://doi.org/10.5751/ES-09429-220244>
- Kumar, P., Geneletti, D., Nagendra, H., 2016. Spatial assessment of climate change vulnerability at city scale: A study in Bangalore, India. *Land use policy* 58, 514–532. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.018>
- Langan, C., Farmer, J., Rivington, M., Smith, J.U., 2018. Tropical wetland ecosystem service assessments in East Africa; A review of approaches and challenges. *Environ. Model. Softw.* 102, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.022>
- Laterra, P., Nahuelhual, L., Vallejos, M., Berrouet, L., Arroyo Pérez, E., Enrico, L.,

- Jiménez-Sierra, C., Mejía, K., Meli, P., Rincón-Ruiz, A., Salas, D., Špirić, J., Villegas, J.C., Villegas-Palacio, C., 2019. Linking inequalities and ecosystem services in Latin America. *Ecosyst. Serv.* 36, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.001>
- Lathuilière, M.J., Coe, M.T., Johnson, M.S., 2016. A review of green-and blue-water resources and their trade-offs for future agricultural production in the Amazon Basin: What could irrigated agriculture mean for Amazonia? *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 2179–2194. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2179-2016>
- Lerner, A.M., Eakin, H.C., Tellman, E., Bausch, J.C., Hernández Aguilar, B., 2018. Governing the gaps in water governance and land-use planning in a megacity: The example of hydrological risk in Mexico City. *Cities* 83, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.06.009>
- Lisenby, P.E., Tooth, S., Ralph, T.J., 2019. Product vs. process? The role of geomorphology in wetland characterization. *Sci. Total Environ.* 663, 980–991. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.399>
- Liu, D., Tian, F., Lin, M., Sivapalan, M., 2015. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water: Case study of the Tarim River basin, western China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 1035–1054. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1035-2015>
- McCann, R.K., Marcot, B.G., Ellis, R., 2006. Bayesian belief networks : applications in ecology and natural resource. *Can. J. For. Res.* 36, 3053–3062. <https://doi.org/10.1139/x06-238>
- McCauley, L.A., Anteau, M.J., Van Der Burg, M.P., Wiltermuth, M.T., 2015. Land use and wetland drainage affect water levels and dynamics of remaining wetlands. *Ecosphere* 6, 1–22. <https://doi.org/10.1890/ES14-00494.1>
- McCoskey, J.T., Lilieholm, R.J., Cronan, C., 2011. Using Bayesian belief networks to identify potential compatibilities and conflicts between development and landscape conservation. *Landsc. Urban Plan.* 101, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.011>
- Melsen, L.A., Vos, J., Boelens, R., 2018. What is the role of the model in socio-hydrology? Discussion of “Prediction in a socio-hydrological world.” *Hydrol. Sci. J.* 63, 1435–1443. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1499025>
- Ogilvie, A., Riaux, J., Massuel, S., Mulligan, M., Belaud, G., Le Goulven, P., Calvez, R., 2019. Socio-hydrological drivers of agricultural water use in small reservoirs. *Agric. Water Manag.* 218, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.001>
- Pande, S., Savenije, H.H.G., 2016. A sociohydrological model for smallholder farmers in Maharashtra, India. *Water Resour. Res.* 52, 1923–1947. <https://doi.org/10.1002/2015WR017841>
- Pérez-Miñana, E., 2016. Improving ecosystem services modelling: Insights from a Bayesian network tools review. *Environ. Model. Softw.* 85, 184–201. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.007>



- Ramsar-Convention, 2015. Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. *State World's Wetl. their Serv. to People A Compil. Recent Anal.* 20.
- Ricaurte, L.F., Max Finlayson, C., 2017. Future impacts of drivers of change on wetland ecosystem services in Colombia. *Glob. Environ. Chang.* 44, 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.001>
- Ricaurte, L.F., Patiño, J.E., Zambrano, D.F.R., Arias-G, J.C., Acevedo, O., Aponte, C., Medina, R., González, M., Rojas, S., Flórez, C., Estupinan-Suarez, L.M., Jaramillo, Ú., Santos, A.C., Lasso, C.A., Nivia, A.A.D., Calle, S.R., Vélez, J.I., Acosta, J.H.C., Duque, S.R., Núñez-Avellaneda, M., Correa, I.D., Rodríguez-Rodríguez, J.A., Vilarity Q, S.P., Prieto-C, A., Rudas-Ll, A., Cleef, A.M., Finlayson, C.M., Junk, W.J., 2019. A Classification System for Colombian Wetlands: an Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. *Soc. Wetl. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01149-8>
- Rositano, F., Ferraro, D.O., 2014. Ecosystem services provided by agroecosystems: A qualitative and quantitative assessment of this relationship in the Pampa Region, Argentina. *Environ. Manage.* 53, 606–619. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0211-9>
- Schallenberg, M., De Winton, M.D., Verburg, P., Kelly, D.J., Hamill, K.D., Hamilton, D.P., 2013. *Ecosystem Services of Lakes. Ecosyst. Serv. New Zeal. Cond. trends. Manaaki Whenua Press. Lincoln* 203–225.
- Sivapalan, M., Blöschl, G., 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resour. Res.* 6988–7022. <https://doi.org/10.1002/2015WR017896>.Received
- Sivapalan, M., Konar, M., Srinivasan, V., Chhatre, A., Wutich, A., Scott, C.A., Wescoat, J.L., 2014. Socio-hydrology: Use-inspired water sustainability science for the Anthropocene. *Earth's Futur.* 2, 225–230. <https://doi.org/10.1002/2013EF000164>.Received
- Sivapalan, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol. Process.* 26, 1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- Song, J., Tang, B., Zhang, J., Dou, X., Liu, Q., Shen, W., 2018. System dynamics simulation for optimal stream flow regulations under consideration of coordinated development of ecology and socio-economy in the Weihe River Basin, China. *Ecol. Eng.* 124, 51–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.024>
- Srinivasan, V., Lambin, E.F., Gorelick, S.M., Thompson, B.H., Rozelle, S., 2012. The nature and causes of the global water crisis: Syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies. *Water Resour. Res.* 48, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011WR011087>
- Sultana, P., Thompson, P.M., Wesselink, A., 2020. Coping and resilience in riverine Bangladesh. *Environ. Hazards* 19, 70–89. <https://doi.org/10.1080/17477891.2019.1665981>

- Sun, Z., Müller, D., 2013. A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models. *Environ. Model. Softw.* 45, 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.06.007>
- Trenberth, K.E., 2011. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* 47, 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Shepherd, T.G., 2015. Attribution of climate extreme events. *Nat. Clim. Chang.* 5, 725–730. <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>
- Troy, T.J., Srinivasan, V., Thompson, S., 2015. Moving sociohydrology forward: A synthesis across studies. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 3667–3679. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3667-2015>
- Turner II, B.L., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Hovelsrud-Broda, G.K., Kasperson, J.X., Kasperson, R.E., Luers, A., Martello, M.L., Mathiesen, S., Naylor, R., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., Selin, H., Tyler, N., 2003. Science and Technology for Sustainable Development Special Feature: Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: Three case studies. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 100, 8080–8085. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231334100>
- Valente, C.R., Latrubesse, E.M., Ferreira, L.G., 2013. Relationships among vegetation, geomorphology and hydrology in the Bananal Island tropical wetlands, Araguaia River basin, Central Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 46, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.12.003>
- Van Dam, A.A., Kipkemboi, J., Rahman, M.M., Gettel, G.M., 2013. Linking hydrology, ecosystem function, and livelihood outcomes in African papyrus wetlands using a bayesian network model. *Wetlands* 33, 381–397. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0395-z>
- Van Emmerik, T.H.M., Li, Z., Sivapalan, M., Pande, S., Kandasamy, J., Savenije, H.H.G., Chanan, A., Vigneswaran, S., 2014. Socio-hydrologic modeling to understand and mediate the competition for water between agriculture development and environmental health: Murrumbidgee River basin, Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 4239–4259. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4239-2014>
- Voldseth, R.A., Johnson, W.C., Gilmanov, T., Guntenspergen, G.R., Millett, B. V., 2007. Model estimation of land-use effects on water levels of northern Prairie wetlands. *Ecol. Appl.* 17, 527–540. <https://doi.org/10.1890/05-1195>
- Wittmann, F., Householder, E., de Oliveira Wittmann, A., Lopes, A., Junk, W.J., Piedade, M.T.F., 2015. Implementation of the Ramsar convention on South American wetlands: an update. *Res. Reports Biodivers. Stud.* 4, 47–58. <https://doi.org/10.2147/RRBS.S64502>
- Zhang, L., Nan, Z., Xu, Y., Li, S., 2016. Hydrological impacts of land use change and climate variability in the headwater region of the Heihe River Basin, northwest China. *PLoS One* 11, 1–25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158394>

## ARTÍCULO DOS

### ENLACE ENTRE EL PULSO DE INUNDACIÓN Y VARIABLES DE PRODUCCIÓN ECONÓMICA EN LOS HUMEDALES TROPICALES MEDIANTE REDES BAYESIANAS.

Sergio Herazo<sup>1</sup> – Lina Berrouët<sup>2</sup> – Diana María Agudelo Echavarría<sup>3</sup> – Esnedy Hernández<sup>4</sup>

#### Resumen

Los enfoques de sistemas socio-ecológicos y socio-hidrológicos tienen el objetivo de contribuir a la comprensión de las interacciones entre las dinámicas sociales y ecosistémicas, sin embargo, presentan retos en incorporar – a la modelación de dichos sistemas - aspectos como la causalidad (o interdependencia), la retroalimentación, la no-linealidad y el acoplamiento de escalas espaciotemporales. Métodos estadísticos como las redes bayesianas se han propuesto para la modelación de estos sistemas con el objetivo de disminuir la incertidumbre asociada a los aspectos mencionados. Este estudio en particular presenta un modelo de red bayesiana creado para un humedal tropical colombiano a partir del análisis de las interacciones entre dos variables respuesta: el pulso de inundación para el sistema hidrológico y los niveles de producción ganadera, agrícola y pesquera como para el sistema social. La red bayesiana se creó a partir del análisis de frecuencias del pulso de inundación y el establecimiento de los estados extremos de las variables hidrológicas y el comportamiento en el tiempo de variables geomorfológicas, de cobertura vegetal, niveles de producción e implementación de tecnología hidráulica. Los principales resultados muestran cómo el pulso de inundación en sus dinámicas de cobertura permanente y estacional afecta al área disponible para la expansión de actividades económicas como la ganadería, la agricultura y la pesca. Cuando el área cubierta por el humedal está dominada por una dinámica estacional se favoreció el aumento en la producción agrícola y ganadera, sin embargo, cuando está dominada por una dinámica de inundación permanente se favorece la producción pesquera. La metodología empleada permitió analizar cómo las presiones antrópicas pueden modificar las dinámicas biofísicas y cómo las dinámicas hidrológicas modifican la producción económica. Lo anterior significó un avance en el entendimiento de la causalidad, acoplamiento de escalas y no linealidad de los sistemas socio-hidrológicos.

## 1. Introducción

Los enfoques de sistemas socio-ecológicos (SSE) y sistemas socio-hidrológicos (SSH) se han propuesto desde las ciencias de la sostenibilidad y la hidrología como enfoques que aportan al entendimiento de las interacciones entre sistemas sociales y sistemas biofísicos. Ambos enfoques se centran en el análisis de las contribuciones que la naturaleza hace al bienestar humano (Díaz et al., 2015; Kumar et al., 2020; Pande and Sivapalan, 2017) y en cómo los sistemas sociales al capturar dichos beneficios a través de aspiraciones, patrones de uso, reglas formales y no formales pueden transformar las propiedades y atributos de los ecosistemas (Collins et al., 2010), afectando así la capacidad de estos para mantener las contribuciones a la sociedad.

Uno de los desafíos actuales que enfrentan los SSE y SSH se asocia al factor de acoplamiento de escalas espaciales y temporales, esto dado que las interacciones entre los sistemas biofísicos y sociales cambian continuamente a causa de factores externos (e.g. variabilidad climática, cambio climático, globalización, etc.) y factores internos (e.g. reglas formales o no formales de usos del suelo) que tienen lugar a través de escalas globales, regionales y/o locales (Kramer et al., 2017; Polhill et al., 2016). Esta complejidad entre escalas ha limitado la operatividad de este tipo de enfoques en los procesos de toma de decisiones (i.e. ordenamiento y/o planificación del territorio) (Turner II et al., 2003). Por ejemplo, el clima en una escala global (temperatura de la superficie del mar en los océanos, la temperatura del aire de la superficie terrestre y los patrones de precipitación continental) es afectado por dinámicas regionales como el fenómeno ENSO (Lin and Qian, 2019). A su vez, este fenómeno genera procesos de sequías o intensificación en las precipitaciones a escalas locales y regionales (Cai et al., 2020), generando toma de decisiones a escala local con el objetivo de aumentar, por ejemplo, la seguridad ante el riesgo por inundación a través de la implementación de tecnología hidráulica (Serna-López and Cañón-Barriga, 2020; Xu and Li, 2019). Por tanto, la articulación de las escalas espacio-temporales y la posibilidad de entender de manera acoplada los cambios o transformaciones en el tiempo de los SSE frente a presiones y pulsos como la intensificación del uso del suelo, nuevos requerimientos de mercado o procesos de variación climática extrema (Collins et al., 2010; Larterra et al., 2019), constituyen uno de los principales retos para el área de investigación en SSE y SSH (Kramer et al., 2017; Kumar et al., 2016). En este contexto hay una emergencia reciente de estudios, que buscan analizar la trayectoria de cambio de SSE y SSH en el tiempo y su evolución bajo el análisis de diferentes escenarios futuros.

Particularmente, el enfoque de SSH ha adaptado el concepto de co-evolución para afrontar el vacío conceptual de la integración de escalas. Autores como Sivapalan et al., (2012) proponen abordar a la sociedad humana como parte endógena del SSH y analizar las interacciones entre el sistema social e hidrológico como un mismo sistema, donde las dinámicas económicas, políticas y de gobernanza del sistema social se analicen como transformadoras de las dinámicas hidrológicas y viceversa (e.g. Di Baldassarre et al., 2013;

Liu et al., 2014; Troy et al., 2015). La evolución temporal de las interacciones entre los sistemas sociales y sistemas hidrológicos, también llamada co-evolución, se analiza a partir de la definición de variables representativas, donde se analiza cada variable según su dinámica en una escala espacial corta, una escala espacial larga y su relación con otras variables con escalas transversales (Sivapalan and Blöschl, 2015). Así, para los procesos de modelación y planteamiento de escenarios en el análisis de SSH el primer paso consiste en establecer las diferentes relaciones y escalas en las que operan las diferentes variables de interés. En los procesos de modelación de los SSH y los SSE además del vacío en el acoplamiento de escalas espaciotemporales, se deben aumentar los estudios enfocados a abordar vacíos en aspectos que describen la dinámica de los SSE como la no linealidad y la causalidad, esto a través de la incorporación de métodos innovadores cualitativos y cuantitativos como los juegos de roles, el análisis multicriterio y los enfoques bayesianos (Gain et al., 2020).

Para el caso puntual de los ecosistemas de humedales tropicales en Herazo et al., ( n.d.) (Artículo 1 en este documento) se planteó un modelo conceptual que permite analizar la evolución en el tiempo de los pulsos de inundación y los niveles de producción ganadera, agrícola y pesquera en los humedales tropicales. Los humedales son escenarios en los que se hace necesario el fortalecimiento de la planificación a partir del entendimiento socio-hidrológico, dado que son sistemas altamente perturbados que aportan una alta gama de servicios ecosistémicos (Davidson et al., 2019). Estos ecosistemas han perdido gran parte de su funcionalidad ecológica durante el último siglo debido a intervenciones provenientes desde sistema social (Davidson, 2014; Junk et al., 2013) y la pérdida de dicha funcionalidad puede conllevar a pérdidas en los servicios ecosistémicos provistos.

Esta investigación buscó contribuir a los vacíos asociados a la integración de escalas la no-linealidad y causalidad de los SSE a través de la simulación de una red causal socio-hidrológica creada para el análisis de la co-evolución humano – ecosistemas de humedal. El método estadístico usado para tratar de abordar la incertidumbre asociada a estos aspectos de heterogeneidad de escalas espacio temporales y causalidad fue la metodología de redes bayesianas. La aplicación de este método permitió analizar relaciones causa-efecto a través de tablas de probabilidad condicionada, además, como un método que describe las relaciones causa-efecto, permite analizar el efecto de variables que operan a escalas espaciales globales o regionales sobre escalas locales. La red bayesiana propuesta en este trabajo, al no hacer uso de variables latentes (variables que no se observan directamente, sino que son inferidas), generó un modelo probabilístico que relaciona la dinámica temporal de los últimos 25 años (1995-2019) del humedal estudiado. La simulación permitió observar el comportamiento de las variables biofísicas en respuesta a las variables sociales (cómo cambian los niveles de producción ganadera, agrícola y pesquera en respuesta a diferentes escenarios de inundación) y viceversa (cómo cambian las dinámicas de inundación debido a posibles decisiones provenientes del sistema social). Este ejercicio se realizó para el humedal de Ayapel, Córdoba (Colombia).

Los humedales tropicales son ecosistemas con una alta intervención antrópica y ecosistemas que a través de los procesos de inundaciones/sequías generan transformaciones en las dinámicas sociales, por ende, las interacciones en ambas vías y las retroalimentaciones generadas en estas promueven a los humedales como ecosistemas de interés para los enfoques de co-evolución en SSH.

Particularmente, en Colombia, se estima que el 27% de la extensión territorial está cubierta por humedales y aunque existen varios estudios regionales, la información sobre la diversidad de los humedales a nivel nacional es escasa (Ricaurte et al., 2019). Dentro de los humedales de Colombia más destacados se encuentran aquellos ubicados en la región Caribe, norte de Colombia, sobre la Depresión Momposina, en esta zona es posible hallar grandes humedales formados en la confluencia de los ríos San Jorge, Cauca y Magdalena, ocupando una extensión aproximada de 600,000 hectáreas (Herrera et al., 2001). En la Depresión Momposina los complejos humedales más importantes son los de Zapatosa, Ayapel y San Marcos. El humedal de Ayapel cuenta con una comunidad que ha evidenciado y evolucionado de manera conjunta con un ecosistema de humedal en el cual, sus actividades económicas y culturales dependen en gran medida de la estacionalidad hidrológica (Aguilera Díaz, 2011). El humedal de Ayapel es afectado por cambios hidrológicos extremos en el aumento y disminución de las precipitaciones afectadas por el ENSO (Serna-López and Cañón-Barriga, 2020), por ejemplo, el fenómeno presentado en el 2010, donde la ola invernal dejó cerca de 20 pérdidas humanas y millonarias pérdidas económicas (BID et al., 2012). La cultura anfibia, la dinámica hidrológica y la ocurrencia de eventos extremos hacen que este sistema sea un sitio de especial interés para el desarrollo de estudios de temáticas socio-hidrológicas en ecosistemas de humedal.

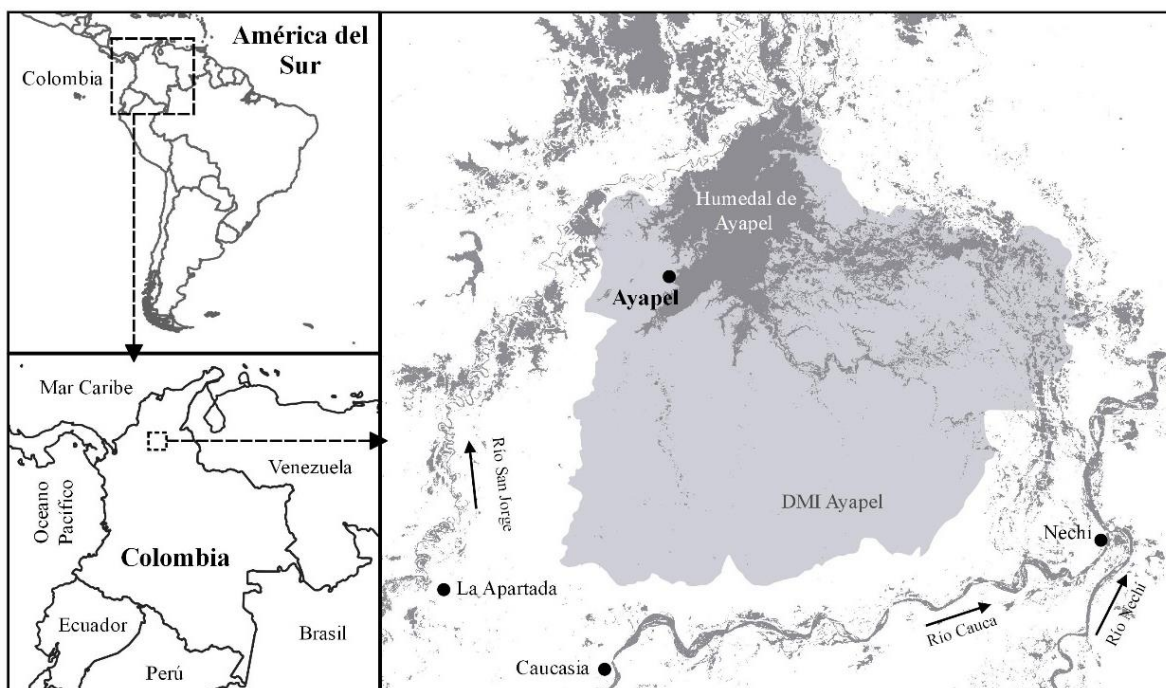
La red supone un avance en el entendimiento de estos SSH bajo la mirada de co-evolución al analizar las relaciones causa-efecto de diferentes variables que definen la funcionalidad socio-hidrológica de los humedales tropicales. Además, genera avances en el entendimiento de la funcionalidad ecológica de los humedales tropicales frente a escenarios hidrológicos extremos y en el entendimiento de las variaciones de las dinámicas económicas que se modifican a partir de inundaciones y sequías. Así, la aplicación de la red permitiría el fortalecimiento de estrategias de adaptación ante cambio climático o eventos ENSO, el fortalecimiento de planes de gestión del riesgo y planes orientados a la toma de decisiones en el uso del suelo.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1. Área de estudio**

El humedal de Ayapel (Figura 1) incluyó a partir del año 2018 54,000 hectáreas bajo la convención internacional RAMSAR, lo cual implica un cambio en la gestión del ecosistema con el objetivo de avanzar en su sostenibilidad e implementación de planes de gestión

ambiental que fortalezcan la conservación del ecosistema y las especies que lo habitan. Este proceso viene soportado desde el año 2011 cuando el humedal de Ayapel se definió como un Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales (DMI) según la normatividad ambiental colombiana, esto le otorga una figura de interés para la conservación, pero bajo un sistema de aprovechamiento racional de los recursos naturales. El área DMI se propuso como el límite de la unidad de análisis, proceso de modelación dado que abarca los principales cuerpos de agua del humedal y es la zona sobre la que se tomarán muchas decisiones de planificación a nivel local. La cuenca de la ciénaga tiene una extensión de 1,504 km<sup>2</sup> y una topografía que varía entre los 20 y los 150 m.s.n.m. Se encuentra localizada en la jurisdicción del municipio de Ayapel, departamento de Córdoba, Colombia. La ciénaga es considerada un importante acuífero y reservorio íctico de la llanura aluvial del río San Jorge (Hernandez-Atilano et al., 2008).



**Figura 2.1.** Ubicación zona de estudio del caso aplicado. Ciénaga de Ayapel. (Fuente: propia)

La comunidad de Ayapel desde el punto de vista social, ha sido caracterizada como parte de una cultura anfibia (Jaramillo et al., 2015; Puerta et al., 2016), que como lo indica Fals Borda, (2002) se destaca por combinar estacionalmente la explotación agrícola, pecuaria y selvática con la fluvial y pesquera en el mismo hábitat o territorio. Según el Plan de Ordenamiento Básico del municipio, Ayapel en sus usos del suelo destina cerca de 65% del territorio para actividades ganaderas, donde La Asociación de Ganaderos del San Jorge ASOGAN reporta 134,000 cabezas de ganado anuales en promedio. La agricultura representa cerca del 20% de los usos del suelo del municipio reportando cerca de 17,738 toneladas producidas por año, donde destaca principalmente el cultivo de arroz. El área destinada para usos pesqueros representa cerca del 9% del territorio del municipio y los usos del suelo destinados a

extracción forestal representan cerca de un 3%. Por otro lado, las dinámicas sociales de Ayapel han estado condicionadas por eventos hidrológicos extremos asociados a eventos ENSO, por ejemplo, la inundación generada en el 2010 como consecuencia de las altas precipitaciones causadas por La Niña llevó al humedal de Ayapel a sufrir un gran deterioro en su funcionalidad ecológica y social.

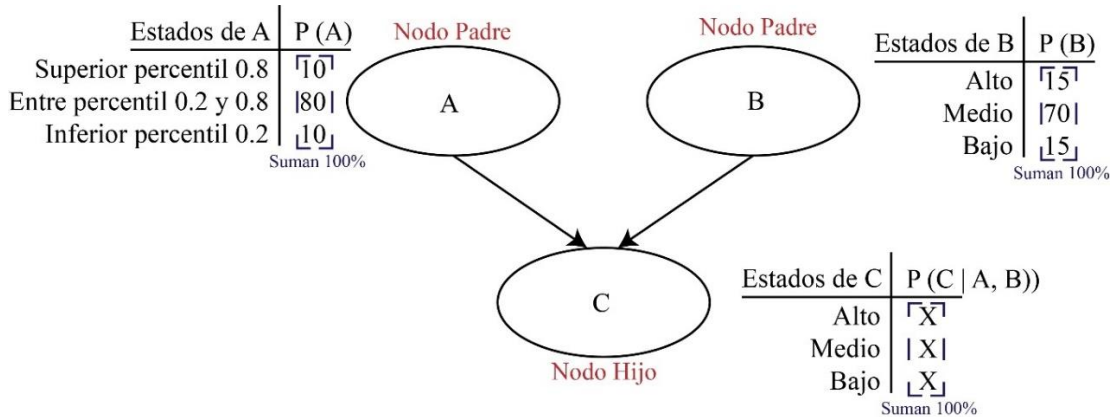
## **2.2. Red bayesiana para el análisis de la co-evolución socio-hidrológica en humedales tropicales**

En los procesos de modelación de los SSH y los SSE se han implementado diferentes metodologías como los juegos de rol, los análisis multicriterio, los análisis a través de dinámica de sistemas complejos, los análisis de red, métodos basados en agentes y aproximaciones bayesianas con el objetivo de aportar a vacíos existentes asociados a la ambigüedad de las relaciones causa-efecto, la no linealidad y el análisis de retroalimentaciones. Particularmente en el análisis de SSH se ha contado con un amplio uso de los análisis de dinámica de sistemas complejos, enfatizando en el rol de las retroalimentaciones y la causalidad (o interdependencias) entre los sistemas humanos y acuáticos (Gain et al., 2020). Sin embargo, se ha propuesto acercarse a otro tipo de métodos que permitan disminuir la incertidumbre asociada al acoplamiento de variables en sus dinámicas de causalidad y heterogeneidad de escalas espaciotemporales propia de los SSE (Stritih et al., 2020). Avanzar en estos vacíos permite configurar un marco de evaluación de los SSH bajo impulsores de cambio, para apoyar la toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos a través de enfoques de evaluación que integren datos empíricos, simulaciones numéricas y conocimientos expertos que faciliten la selección de opciones de gestión ambiental (Phan et al., 2019).

Particularmente, las redes bayesianas (RB) como modelos gráficos probabilísticos que denotan dependencias e independencias entre variables a través de probabilidades condicionales, son una de las técnicas disponibles para integrar datos, conocimiento e información de diferentes fuentes, disciplinas y escalas. Las RBs se pueden configurar como herramientas de apoyo a la toma de decisiones que utilizan la inferencia de probabilidad para generar análisis de "¿qué pasaría si?" y "¿cuál es el mejor?" de las posibles opciones de adaptación para la gestión de los SSH (Barton et al., 2012). Se consideran uno de los enfoques integradores más simplistas, donde cada proceso en un sistema complejo no necesita representarse explícitamente (Ticehurst et al., 2011). Además, estos modelos proporcionan un marco para representar gráficamente la relación lógica entre variables y para cuantificar la fuerza de esta relación utilizando probabilidades condicionales (probabilidad de que ocurra un evento C, sabiendo que también ocurren otros eventos A y B. Ver Figura 2) (Castelletti and Soncini-Sessa, 2007). En estos modelos cada variable se define como un nodo y está definido por un conjunto de estados. En la Figura 2, se establecen dos nodos padres A y B, y un nodo hijo C. Las probabilidades de cada uno de los estados de los nodos padres dependen de sí mismos y la suma entre ellos debe ser del 100%, sin embargo, las probabilidades de los estados de los nodos hijos dependen de las probabilidades de los nodos padres y deben sumar 100%, es decir, la probabilidad de C está condicionada por A y B, siendo la combinación

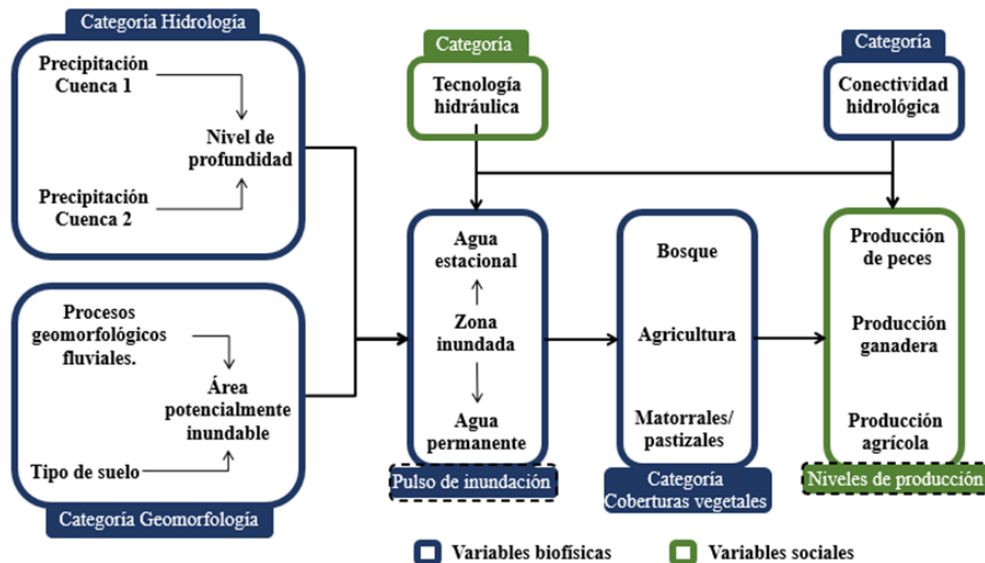


entre los estados de A y B las que definen C. A las probabilidades de los estados de cada nodo se les conoce como tablas de probabilidad condicional.



**Figura 2.2.** Elementos que conforman una red bayesiana. Nodos padres, nodo hijo y tablas de probabilidad condicional. Fuente: elaboración propia.

La construcción de la estructura de la red bayesiana, que es el primer paso en la elaboración de una RB (Pitchforth and Mengersen, 2013), se realizó a partir del modelo conceptual propuesto en Herazo et al., (n.d.) (Artículo 1 en este documento). La red causal socio-hidrológica, relaciona al pulso de inundación del sistema hidrológico con las dinámicas de producción de actividades económicas (ganadería, agricultura y pesca) del sistema social. El modelo propuesto – en el artículo 1– se modificó para las características presentes en la zona de estudio del humedal de Ayapel, Colombia, y se adecuó para modelarse a través de la metodología de redes bayesianas (ver Figura 3).



**Figura 2.3.** Red causal propuesta en Herazo y Berrouet modificada para el humedal de Ayapel. (Fuente: propia)

Para el caso de estudio, se describió la categoría Hidrología a través de la precipitación promedio de las dos cuencas aportantes (Cuencas de los ríos San Jorge y Cauca) y el nivel

de inundación del cuerpo permanente del humedal. Siendo ambas precipitaciones nodos padres del nivel de inundación. Así mismo, para la categoría de Geomorfología se tomaron variables asociadas al proceso geomorfológico dominante y tipo de suelo como nodos padres que definen el Área Potencialmente Inundable como nodo hijo. Las variables de la categoría geomorfología se tomaron en su dimensión espacial como el área que cubren los estados de cada variable dentro del área DMI. Las categorías de geomorfología e hidrología describen al pulso de inundación del humedal. Para el caso de estudio aplicado el pulso de inundación se definió a través del área que cubren las zonas de inundación permanente (12 meses del año) y estacional (i.e. zonas inundadas entre 1 y 11 meses al año) dentro del área DMI del humedal.

Dentro del área DMI, el pulso de inundación se relaciona con las coberturas vegetales a través de la competencia por área disponible. Para el caso de estudio aplicado se clasificaron las coberturas vegetales a partir de las recomendaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) presentadas en el “Product User Guide and Specification ICDDR Land Cover” del proyecto Copernicus de la Unión Europea (Disponible en: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover?tab=doc>) : cobertura de Bosque, Agricultura y Arbustales/Pastizales. A partir de la disposición de áreas cubiertas por agua o vegetación, se observó la dinámica en producción de ganadería, agricultura y pesca, así mismo, cómo cambia la dinámica de la relación pulso de inundación versus niveles de producción a partir de la modificación de conectividad hidrológica que surja como resultado de la implementación de tecnología hidráulica, que para el caso de estudio aplicado se define a partir de la implementación de diques.

El modelo propuesto en Herazo et al., (n.d.) propone variables biofísicas asociadas a la calidad del agua y los nutrientes del suelo, sin embargo, esta investigación se centra en el análisis de como las dinámicas de elasticidad (expansión y contracción) del pulso de inundación afectan las dinámicas productivas anuales de los últimos 25 años de un humedal tropical y no se tuvo en cuenta las variables de calidad del agua y nutrientes del suelo. Además, incluir estas variables requeriría aumentar o modificar la resolución temporal y espacial del análisis, lo cual aumentaría la dificultad de análisis debido a la calidad de información disponible para la zona de estudio. En implementaciones futuras de la red bayesiana, es necesario incluir variables asociadas a estos procesos debido, por ejemplo, a que la dinámica de nutrientes puede ser una variable relevante en las dinámicas de los usos del suelo y a que la calidad del agua puede ser determinante en la disponibilidad en biomasa de peces, y, por ende, podría afectar la producción pesquera.

### **2.3. Análisis de datos para la definición de estados y probabilidades de la red bayesiana**

#### **2.3.1. Categoría hidrología**

Las bases de datos utilizadas para el análisis de cada variable se presentan en la Tabla 1. Las variables de precipitación para cada una de las cuencas se tomaron a partir de la base de datos CHIRPS (disponibles en <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>, consultada en

enero del 2021), esta base de datos presentó ventajas a la hora de espacializar la variable y su coeficiente de determinación con bases de datos in situ fue de  $R^2 = 0.9218$ . Para los niveles de profundidad de lámina de agua del cuerpo principal del humedal se tomó la estación Beirut del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Disponible en <http://dhime.ideam.gov.co/>).

**Tabla 2.1.** Fuente de datos utilizados para el modelo RB.

Variable	Base de datos	Institución/Programa	Periodo de tiempo	Resolución espacial
Precipitación Cauca	CHIRPS	Universidad de California	1981 - 2019	0.05°
Precipitación San Jorge				
Nivel Inundación	BEIRUT [25027760]	IDEAM	1995-2019	NA
Proceso Geomorfológico	MM (72-73-82-83)	SGC	2012	1:100000
Tipo Suelo	Mapa Digital de Suelos del Departamento de Córdoba	IGAC	2009	1:100000
Mancha Estacionaria	Global Surface Water - Data Access	European Commission - Copernicus	1984-2019	30 metros
Mancha permanente				
Cobertura Bosque	Land cover classification	European Commission - Copernicus	1992 - 2019	300 metros
Cobertura Agricultura				
Cobertura Pasto/Arbusto				
Producción Ganadería	Inventario bovino	ASOGAN	1997-2019	A nivel municipal
Producción Agricultura	Evaluaciones agropecuarias municipales	EVA	2000, 2001, 2006-2018	
Producción Pesca	Desembarco por sitio	Entrevistas SEPEC*	1995-2020	

### 2.3.2. Categoría geomorfología

Los procesos geomorfológicos se analizaron a partir de información provista por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Disponibles en <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/advanced.aspx>) y el mapa de suelos del Instituto Colombiano Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Para la variable de Tipo de Suelo se analizó un mapa provisto por el IGAC con ocho tipos de suelos diferentes los cuales se agruparon en tres tipos de suelo según sus características litológicas, de drenaje y fertilidad. Siendo los suelos tipo 1: finos, profundos, bien drenados y de baja a media fertilidad. Los suelos tipo 2: gruesos, superficiales a profundos, con baja fertilidad y bien drenados, finalmente, los suelos tipo 3: finos, superficiales con drenaje pobre y de alta fertilidad. Los suelos tipo 3 promoverán una mayor retención de agua en superficie mientras que los tipos 1 y 2 son bien drenados, pero con diferentes características de textura.

### 2.3.3. Categoría Pulso de inundación

El pulso de inundación se analizó en su dinámica de expansión en área (km<sup>2</sup>), para lograr detectar los cambios anuales de la expansión del humedal se procesaron las áreas en que el

humedal estuvo cubierto por agua de forma permanente durante un año y las áreas cubiertas estacionalmente (entre 1 y 11 meses del año) por la cobertura de agua. Este análisis se logró a partir de la información provista por el Global Surface Water y su clasificación “Yearly History” la cual provee información sobre el comportamiento interanual de las superficies de agua para cada año, muestra el agua permanente, estacional y el número de meses en que el agua estuvo presente por píxel (Disponible en <https://global-surface-water.appspot.com/download>).

#### **2.3.4. Categoría cobertura vegetal**

De la base datos Land Cover Classification se realizó una reclasificación de las 23 clases de coberturas vegetales iniciales en las nueve clases recomendadas por el IPCC para la detección de cambios en la cobertura vegetal (Disponibles en <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover?tab=form>). Se analizó el área cubierta por bosque, agricultura y pastizales/arbustales desde el año 1992 hasta el 2019, se tomó el promedio anual de cada cobertura dentro del DMI de Ayapel. Este análisis permitió observar la variación de cada cobertura en la serie de tiempo y su relación con las dinámicas de elasticidad del pulso de inundación. De este modo, dentro del área de estudio del DMI Ayapel se encontraron en total cuatro coberturas predominantes: Bosque (10% del área DMI en promedio desde 1995 hasta el 2019), Cobertura asociada a agricultura (45%), pastizales y arbustales (31%).

#### **2.3.5. Categoría producción**

La producción agrícola se analizó a partir de los datos suministrados por las Evaluaciones Agropecuarias Municipales de Colombia (Disponibles en <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4#>). La producción ganadera se analizó a partir de la información suministrada por la Asociación de Ganaderos del San Jorge (ASOGAN) que contenía el número de cabezas de ganado anual desde 1997 hasta 2019. Para el análisis de la producción pesquera se analizaron bases de datos provistas el Servicio Estadístico Pesquero Colombiano (SEPEC) (Disponible en <http://sepec.aunap.gov.co/>), sin embargo, esta base de datos solo cuenta con datos municipales cuantificados a partir del 2012 y distribuidos en puntos de desembarco que no logran mostrar la dinámica pesquera para toda el área de interés. Debido a este vacío, se realizó una encuesta a pescadores que tuvieran más de 20 años dedicados a la pesca en el humedal de Ayapel (Anexo 3), se les preguntó su percepción sobre la producción (Cantidad de peces desembarcados, esfuerzo de pesca y precios) por bloques de cinco años a partir de 1995. En total se realizaron 33 encuestas donde los pescadores definieron si la pesca en el periodo de tiempo analizado era en promedio alta (más de 200 pescados al día en promedio), media (entre 200 y 40 pescados al día) y baja (menos de 40 pescados al día). Esto supone una ventaja en los modelos que tienen variables con baja calidad de datos y abre puertas a la articulación de datos derivados de procesos participativos en la socio-hidrología (Barton et al., 2012; Gain et al., 2020; McCann et al., 2006b).

A partir del periodo cubierto por las bases de datos, se definió un periodo de tiempo de análisis de 1995 a 2019, dado que para este rango de tiempo se contó con información de la mayoría de las variables, así mismo, este periodo de tiempo permite analizar fenómenos ENSO categorizados como fuertes según la NOAA<sup>1</sup> y el IDEAM<sup>2</sup>. Los fenómenos El Niño categorizados como fuertes ocurrieron en 1997-1998 y 2014-2015; los fenómenos La Niña categorizadas como fuertes sucedieron en 1999-2000 y 2011-2012. Siguiendo las recomendaciones de Barton et al., (2012) para la disminución incertidumbre en los procesos de creación de redes bayesianas con enfoques en SSE, se establecieron máximo tres estados para cada una de las variables (nodos en RB). Los nodos provenientes de variables continuas se discretizaron en tres estados de acuerdo con sus valores extremos. Se analizaron tres definiciones de estados extremos a partir del análisis de percentiles para cada variable continua: *i*) Percentiles 0.9 y 0.1; *ii*) Percentiles 0.85 y 0.15 y *iii*) Percentiles 0.8 y 0.2. En la tabla 2 se presentan los estados para la distribución de cada combinación de percentiles.

**Tabla 2.2.** Indicadores, unidades y estados de los nodos del modelo RB para el humedal de Ayapel.

Variable	Indicador	Unidad	Estados		
			Percentil 0.8-0.2	Percentil 0.85-0.15	Percentil 0.9-0.1
Precipitación Cauca	Precipitación anual en la cuenca del río Cauca	mm año <sup>-1</sup>	0 a 2039.99	0 a 2036.82	0 a 2017.81
			2039.99 a 2391.74 ≥ 2391.74	2036.82 a 2491.36 ≥ 2491.36	2017.81 a 2638.59 ≥ 2638.59
Precipitación San Jorge	Precipitación anual en la cuenca del río San Jorge	mm año <sup>-1</sup>	0 a 2781.02	0 a 2682.39	0 a 2657.67
			2781.02 a 3228.16 ≥ 3228.16	2682.39 a 3275.38 ≥ 3275.38	2657.67 a 3331.06 ≥ 3331.06
Nivel Agua Humedal	Nivel medio anual del agua (profundidad) en el humedal de Ayapel	cm año <sup>-1</sup>	0 a 404.96	0 a 399.98	0 a 395.61
			404.96 a 503.63 ≥ 503.63	399.98 a 506.38 ≥ 506.38	395.61 a 535.33 ≥ 535.33
Proceso Geomorfológico	Proceso geomorfológico predominante en la zona DMI	Cualitativa	Erosión, transporte y meteorización		
			Acumulación y sedimentación		
Tipo de suelo	Tipo de suelo predominante en la zona DMI	Cualitativa	Tipo 1		
			Tipo 2		
			Tipo 3		
Área Inundable	Superficie máxima inundable	Cualitativa	Bajo		
			Alta		
Tecnología Hidráulica Dique	Influencia del dique marginal del río Cauca	Cualitativa	Si		
			No		
Área Estacional	Área en la que el suelo está estacional/temporalmente cubierto de agua	km <sup>2</sup>	0 a 168.74	0 a 157.39	0 a 137.71
			168.74 a 218.26 ≥ 218.26	158.39 a 224.68 ≥ 224.68	137.71 a 245.37 ≥ 245.37
Área Permanente	Zona permanentemente inundada durante todo el año	km <sup>2</sup>	0 a 74.73	0 a 70.81	0 a 57.07
			74.73 a 114.26 ≥ 114.26	70.81 a 119.35 ≥ 119.35	57.07 a 144.81 ≥ 144.81
Cobertura Bosque	Superficie cubierta de bosque en la zona DMI	km <sup>2</sup>	0 a 118.86	0 a 117.54	0 a 117.31
			118.86 a 177.84 ≥ 177.84	117.54 a 177.84 ≥ 177.84	117.31 a 179.08 ≥ 179.08
Cobertura Agricultura	Área cubierta por tierras de cultivo y mosaicos	km <sup>2</sup>	0 a 626.57	0 a 626.35	0 a 626.35

<sup>1</sup> Consultar en: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)

<sup>2</sup> Consultar en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-de-seguimiento-fenomeno-el-nino-y-la-nina>.

	con vegetación natural (cubierta arbórea, arbustiva) y tierras de cultivo en la zona DMI		626.57 a 665.49	626.35 a 672.26	626.35 a 678.35
			≥ 665.49	≥ 672.26	≥ 678.35
Cobertura Pasto	Superficie cubierta por matorrales y/o pastizales en la zona DMI	km <sup>2</sup>	0 a 431.41	0 a 431.0	0 a 430.38
			431.41 a 461.93	431.0 a 466.94	430.38 a 474.38
			≥ 461.93	≥ 466.94	≥ 474.38
Producción Ganadera	Número de cabezas de ganado que pastan en el humedal por año en el municipio de Ayapel	Cabezas de ganado anuales	0 a 122097	0 a 12074.65	0 a 103905
			122097 a 146998.3	112074.65 a 151891.60	103905.3 a 160191.1
			≥ 146998.3	≥ 151891.6	≥ 160191.1
Producción Agricultura	Toneladas de producción agrícola en el municipio de Ayapel al año.	Toneladas	0 a 10367.6	0 a 10233.35	0 a 8769.87
			10367.6 a 22633.6	10233.35 a 24861.57	8769.87 a 31065.94
			≥ 22633.6	≥ 24861.57	≥ 31065.94
Producción Pesca	Cantidad de producción pesquera en el municipio de Ayapel por año.	Cualitativa		Bajo	
				Medio	
				Alta	

De acuerdo con la elección de los estados de cada variable y las bases de datos, se creó una red bayesiana utilizando la versión 6.05 de Netica (Norsys Software Corp.). Netica permite realizar el aprendizaje de una red bayesiana a través de estimaciones estructurales o estimaciones paramétricas (Cain, 2001). Para este estudio se definieron las probabilidades de ocurrencia de cada una de las variables a partir de una estimación paramétrica basada en la frecuencia relativa de cada variable, este procedimiento es el más recomendable en casos en los que no se presuponen variables latentes (que no se observan directamente sino que son inferidas a partir de otras variables) y no hay una alta presencia de casos perdidos (López Puga, 2012; Pitchforth and Mengersen, 2013). La base de datos utilizada para entrenar y validar el modelo contó con únicamente 25 pasos debido a la información disponible para la zona de estudio (un paso equivale a un año), lo cual genera pocas combinaciones entre los estados de los nodos padres sobre los nodos hijos y sus frecuencias. Para equilibrar la base de datos con el objetivo de tener mayor número de combinaciones posibles, tanto para el entrenamiento como para la validación, se empleó la técnica SMOTE (técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas). La técnica SMOTE es una técnica estadística para aumentar el número de casos en su conjunto de datos de forma equilibrada. Esta técnica de sobre muestreo buscó duplicar las muestras para alcanzar así un equilibrio en los procesos de entrenamiento y validación del modelo (Chawla et al., 2002; Monroy-de-Jesús et al., 2018). Así, la base de datos inicial tenía un total de 25 pasos y la base de datos final 150 pasos.

Para la validación del modelo, Netica permite estimar tres estadísticos que evalúan el grado de ajuste del modelo en comparación con un conjunto de datos nuevos: la pérdida logarítmica, la pérdida cuadrática y la compensación esférica (Koski and Noble, 2009; López Puga, 2012), los cuales analizan el grado de inconsistencia entre el valor predicho por el modelo y el valor verdadero. La pérdida logarítmica oscila entre cero e infinito donde un valor cercano a cero indica mejor bondad de ajuste del modelo. Por su parte, la pérdida cuadrática (o brier score) oscila entre cero y dos, donde cero correspondería con una mejor

ejecución del modelo. Por último, la compensación esférica está acotada entre cero y uno, este último valor supone un ajuste perfecto entre el modelo y los datos. El entrenamiento de la red se realizó con el 80% de pasos de la base de datos (120) mientras que el proceso de validación con el 20% (30) seleccionados aleatoriamente, esta validación se realiza con el objetivo de obtener un modelo robusto en sus soluciones para así tomar decisiones basadas en estimaciones adecuadas.

### **3. Resultados**

#### **3.1. Modelo de red bayesiana para humedales tropicales**

Para la elección de los valores extremos y los estados de cada nodo en la RB se identificaron los valores asociados a percentiles 10-90, 15-85 y 20-80, es decir, que se analizaron los valores extremos inferiores agrupados en el 10%, 15% y 20% de los datos, y los valores extremos superiores agrupados en el 80%, 85% y 90% de los datos de cada nodo. Se establecieron tres modelos de RB donde los nodos cambian el valor de sus estados a partir de cada combinación de percentiles (10-90, 15-85 y 20-80) y se analizaron las distribuciones de probabilidad para los principales nodos de las RBs (Tabla 3). Como es lógico, las probabilidades más altas de cada nodo se establecieron en los valores medios, sin embargo, dado que la cantidad de años son relativamente pocos, la probabilidad de los datos más extremos disminuye considerablemente a medida que se toman percentiles más extremos.

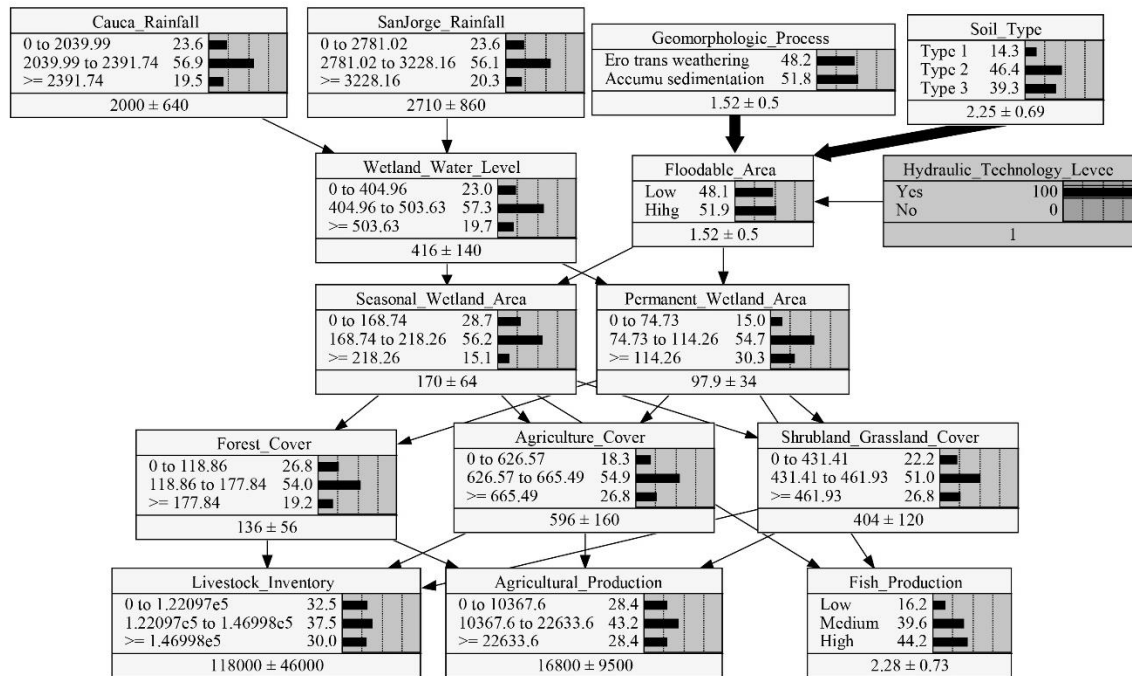
La distribución de probabilidad de los estados con percentiles 20-80, permitió una mayor cantidad de relaciones entre los estados de los nodos padres e hijos, por ende, se definió como la distribución a usar para los análisis de co-evolución. Esta discretización permitió, por ejemplo, establecer estados para los nodos hidrológicos de precipitación y nivel de inundación, donde los datos por encima del percentil 0.8 están asociados a los años más lluviosos y por debajo de 0.2 los años más secos del rango de tiempo seleccionado. La elección de este modelo tuvo como resultado que en variables como la precipitación del río Cauca los valores por encima de 0.8 (2491.4 mm/año), correspondieran a los años que fueron reportados por la NOAA como años bajo el efecto del fenómeno de La Niña (1999, 2008, 2010 y 2011), los cuales para la región generaron un aumento en las precipitaciones (Salas et al., 2020).

Definidos los nodos a partir de la distribución 20-80, se observó como la probabilidad de que las cuencas del río San Jorge y Cauca excedan el percentil 0.8 de precipitación (3228.16 mm.año<sup>-1</sup> para el río San Jorge y 2391.4 mm.año<sup>-1</sup> para el río Cauca) fue de 20.3% y 19.5% respectivamente, como se muestra en la Figura 4. Ambas variables tuvieron una probabilidad de no exceder el percentil 0.2 (2039.99 mm.año<sup>-1</sup> para el río Cauca y 2781.02 mm.año<sup>-1</sup> para el río San Jorge) de 23.6%. Los dos nodos son padres del nivel en profundidad del cuerpo permanente del humedal, el cual tuvo una probabilidad de superar su valor extremo superior de 19.7%. El nivel de inundación superó los 503.63 cm de profundidad en los años 2008, 2010, 2011, 2012 y 2013, lo que coincide con tres años bajo el efecto de La Niña (2010, 2011 y 2012) en Colombia.

**Tabla 2.3.** Distribuciones de probabilidad para las principales variables de la RB en tres modelos evaluados.

Percentiles	Estacional	P (Estacional)	Permanente	P (Permanente)	Ganadería	P (Ganadería)	Agricultura	P (Agricultura)	Pesca	P (Pesca)
<b>10 y 90</b>	0 a 137.71	14.9	0 a 57.07	13	0 a 103905.3	24	0 a 8769.87	26.6	Bajo	17.5
	137.71 a 245.37	72.1	57.07 a 144.81	72.1	103905.3 a 160191.1	52.4	8769.87 a 31065.9	46.9	Medio	41.4
	≥ 245.37	13	≥ 144.81	14.9	≥ 160191.1	23.6	≥ 31065.9	26.6	Alto	41.1
<b>15 y 85</b>	0 a 158.39	18	0 a 70.81	16	0 a 112075	26.4	0 a 10233.4	27.9	Bajo	18.4
	158.39 a 224.68	66	70.81 a 119.35	66	112075 a 151892	48	10233.4 a 24861.6	44.3	Medio	39.8
	≥ 224.68	16	≥ 119.35	18	≥ 151892	25.5	≥ 24861.6	27.7	Alto	41.8
<b>20 y 80</b>	0 a 168.75	18.3	0 a 74.73	20.7	0 a 122097	31.4	0 a 10367.6	28.8	Bajo	19.5
	168.74 a 218.26	61	74.73 a 114.26	59.4	122097 a 146998	37.4	10367.6 a 22633.6	42.4	Medio	40.7
	≥ 218.26	20.7	≥ 114.26	19.9	≥ 146998	31.3	≥ 22633.6	28.7	Alto	39.8





**Figura 2.4.** Modelo de Red Bayesiana del humedal de Ayapel. Las probabilidades se obtuvieron a través del método de frecuencias relativas. Las flechas gruesas indican que los nodos padres definieron la probabilidad del nodo hijo, pero no entran en la dinámica de la red. Las flechas delgadas indican relaciones dinámicas entre nodo padre y nodo hijo.

Se definió la variable de área inundable a partir de los procesos geomorfológicos y tipo de suelo predominantes en el humedal, sin embargo, estas variables no cuentan con una variabilidad temporal tan corta como la hidrología y sus probabilidades se evaluaron a partir de la ocupación de cada proceso geomorfológico o tipo de suelo dentro del área DMI. Es decir que, dentro del área total del DMI se tuvo una probabilidad de 48.2% de encontrarse en un área bajo dominancia de los procesos de erosión, transporte y/o acumulación fluvial, y de 51.8% de encontrarse bajo dominancia de los procesos de acumulación y sedimentación (Ver Figura 4). Así mismo para cada tipo de suelo se obtuvo una probabilidad de 14.3% de encontrar un área dominada por los suelos tipo 1 dentro del DMI, 46.4% del suelo tipo 2 y 39.9% del suelo tipo 3. Así, se definió el área inundable con una probabilidad de ser alta cuando se tienen zonas que combinan los procesos de acumulación y sedimentación con suelos tipo 3, mientras que, las zonas con baja probabilidad de inundación serán aquellas que combinan procesos geomorfológicos fluviales de erosión, transporte y meteorización con suelos de tipo 1 y 2. Dado que las variables de geomorfología y tipo de suelo se tomaron espacialmente y no en su dinámica temporal, se usaron como nodos padres del área inundable y se mantuvieron constantes durante los pasos evaluados en la red bayesiana (esta relación se ilustra con flechas gruesas de la Figura 4). Poder acoplar estas variables de dinámicas temporales largas con variables hidrológicas cortas es una ventaja de la metodología de redes bayesianas (Gain et al., 2020; McCann et al., 2006b; Strith et al., 2020) que aportan a uno de los vacíos existentes en los SSH (Sivapalan and Blöschl, 2015).

El área inundable es dinámica en la red dado que está bajo el efecto de la variable de tecnología hidráulica, la cual se analizó únicamente para el año 2010. En este año debido a las fuertes precipitaciones y caudales en la cuenca del río Cauca, se sufrió el rompimiento del dique. La pérdida en la funcionalidad de control hidráulico del dique debido al rompimiento del 2010 causó un aumento de cerca del 20% de zonas de inundación en los años 2010 al 2013, es decir, se inundaron cerca de un 20% de áreas del DMI que en años pasados fueron secas.

Para el pulso de inundación se eligió el área cubierta permanente y estacionalmente por el humedal, ambas variables son nodos hijos del nivel de inundación de la ciénaga y el área inundable. La probabilidad de que el área inundada estacionalmente supere los 218.26 km<sup>2</sup> (percentil 0.8) fue de 15.1%, mientras de que esté por debajo de los 168.74 km<sup>2</sup> (percentil 0.1) fue de 28.7%. La probabilidad de que el área inundada permanentemente supere los 114.26 km<sup>2</sup> fue de 30.3%, mientras la probabilidad de no superar los 74.73 km<sup>2</sup> fue de 15%. Ambas variables de inundación (permanente y estacional) son los nodos padres de las variables de cobertura vegetal (Bosque, agricultura y arbustal/pasto), además, de ambas variables dependió el resultado de la producción pesquera, la cual tuvo una probabilidad de superar su estado “Alto” de 44.2%, 39.6% de su estado “Medio” y 16.2% en su valor inferior “Bajo”. Las probabilidades de las producciones ganaderas y agrícolas dependen del área disponible de las coberturas vegetales y el pulso de inundación, así, la producción de ganadería tuvo una probabilidad de 32.5% de presentarse en su estado mínimo (Estar por debajo del percentil 0.2, es decir, menor a 122.097 cabezas de ganado), de 37.5% en su estado medio (Entre 122.097 y 146.998 cabezas de ganado) y 30% de probabilidad de superar su estado máximo (Mayor a 146.998 cabezas de ganado).

El resultado de la validación de la RB se presenta en la Tabla 4, se analizaron los estadísticos suministrados por Netica para este proceso. Las variables de humedal permanente y estacional representaron un mejor ajuste a través de los estadísticos de pérdida logarítmica, pérdida cuadrática y compensación esférica. Las producciones de ganadería, agricultura y pesca tuvieron un ajuste aceptado pero menor a las variables de inundación, esto debido a los datos faltantes de cada variable, la cantidad de vínculos y a su posición gráfica en la red, las cuales dependen de una mayor cantidad de nodos padres. A partir del proceso de validación es posible concluir que la RB creada cumple con los objetivos de modelar adecuadamente las dinámicas socio-hidrológicas del humedal de estudio.

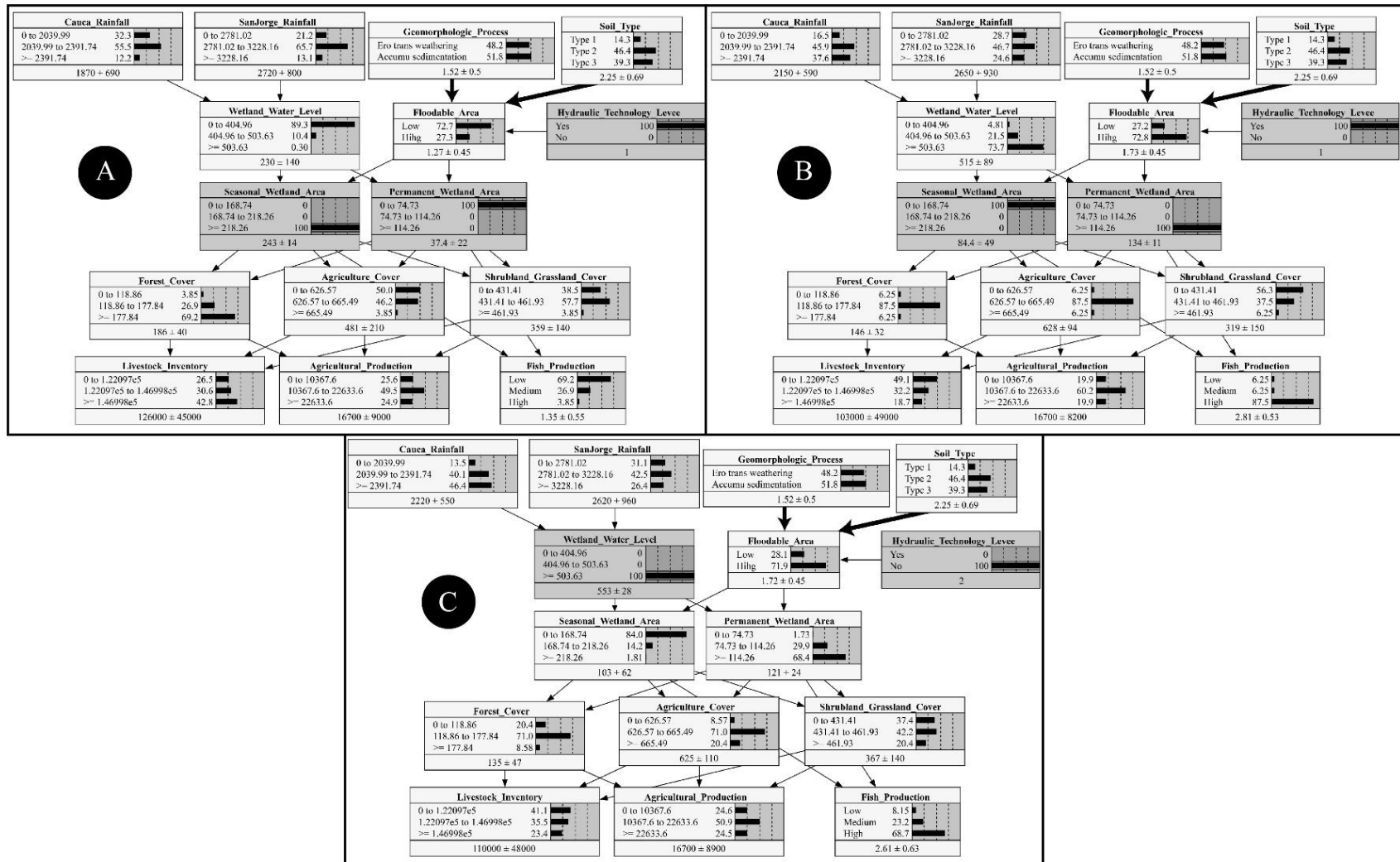
**Tabla 2.4.** Estadísticos de validación para los principales nodos de la red bayesiana. La pérdida logarítmica varía entre 0 e infinito, siendo 0 el mejor ajuste. La pérdida cuadrática varía entre 0 y 2, siendo 0 el mejor ajuste. La recompensa esférica varía entre 0 y 1, siendo 1 el ajuste perfecto.

Variable	Pérdida logarítmica	Pérdida cuadrática	Recompensa esférica
Estacional	0.3558	0.2092	0.883
Permanente	0.3655	0.1977	0.8946
Ganadería	0.7544	0.4432	0.7303
Agricultura	0.8012	0.4944	0.6937
Pesca	0.6295	0.3709	0.7876

### **3.2. Efectos en la producción ganadera, agrícola y pesquera debido a cambios hidrológicos en el humedal.**

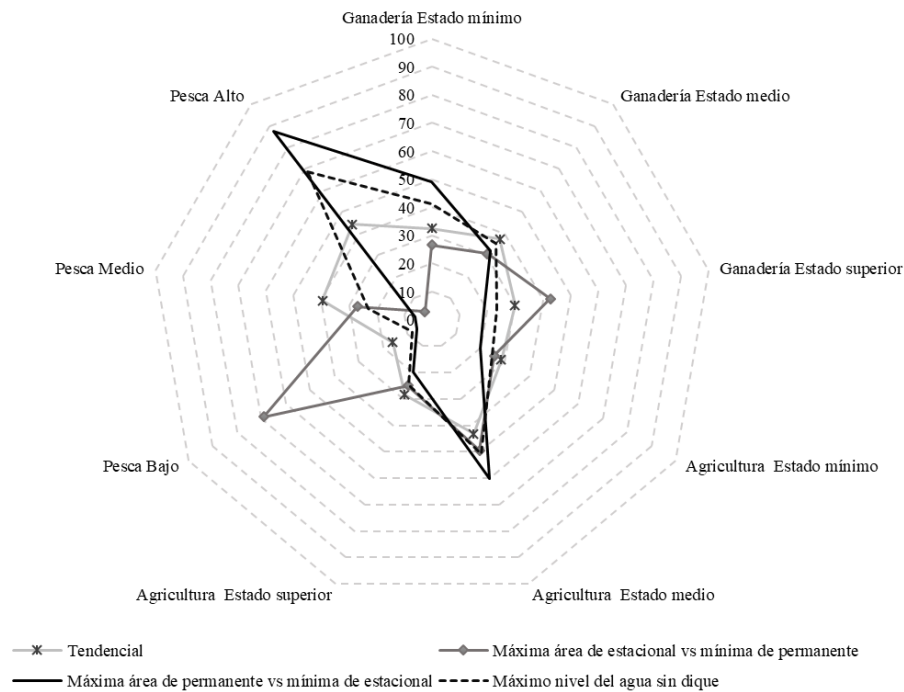
Las redes bayesianas permiten analizar relaciones causa-efecto y sus variaciones a partir de análisis tipo “que pasaría sí”. Este estudio se basa en el pulso de inundación y los niveles de producción ganadera, agrícola y ganadera como variables respuesta de las dinámicas de SSH de los humedales tropicales. Para el caso de estudio del humedal de Ayapel se analizó “que pasaría sí” aumentan o disminuyen las probabilidades de las inundaciones. Sin embargo, las inundaciones pueden presentar diferentes configuraciones y causas, por lo tanto, se definieron tres escenarios (Ver Figura 5): 1) Escenario A: el área de inundación permanente es máximo y el estacional es mínimo, que puede darse bajo condiciones muy húmedas en la zona sin control hidráulico, 2) Escenario B: el área de inundación estacional es máximo y el permanente es mínimo, el cual puede ser un escenario común en condiciones secas y de baja precipitación de la zona. 3) Escenario C: nivel máximo de inundación del humedal sin influencia del dique marginal (tecnología hidráulica), lo cual puede suceder si se remueve el dique marginal del río cauca y se tiene condiciones de altas precipitaciones.

En el escenario A las variables que más varían son la producción ganadera y la producción agrícola (Ver Figura 6). La ganadería que en el modelo del escenario tendencial (Modelo tendencial representado en línea gris continua con asteriscos en la Figura 6) tenía una probabilidad de 30% de permanecer en su estado superior ( $\geq 146,998$  cabezas de ganado), pasó a tener una probabilidad del 18.7% en este bajo las condiciones que definen este escenario A. Además, la probabilidad de hallarse en su estado mínimo pasó de 32.5% a 49.1% (i.e. 49.1% de probabilidad de tener menos de 122,097 cabezas de ganado al año) (Ver Figura 7). Por otra parte, la pesca en el escenario A pasa de una probabilidad de 44.2% en su estado “alto” a 87.5% de superar este estado, lo que supone una mayor probabilidad en una producción pesquera buena. Esto se ve respaldado por el escenario B, donde una cobertura de agua estacional genera una menor conectividad hidrológica entre cuerpos de agua y reduce las zonas disponibles para pesca. En este escenario B, la probabilidad de tener una producción pesquera “alta” bajaría de 44.2% hasta un 3.85% (Ver figura 6 y 7) respecto al escenario tendencial que se presentó en la Figura 4.

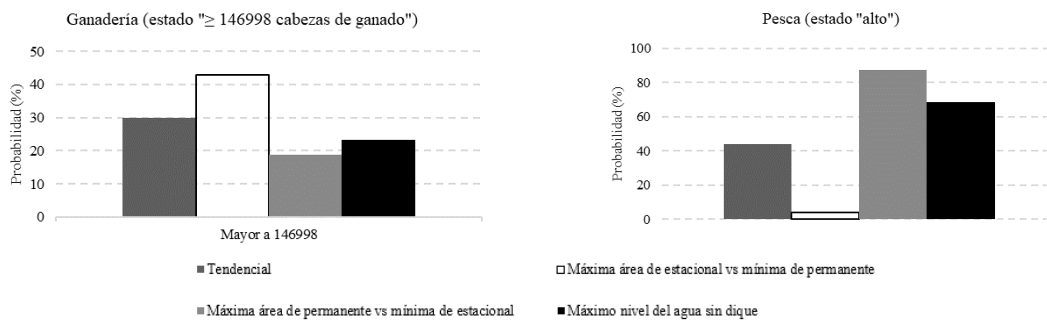


**Figura 2.5.** Escenarios de análisis: afectaciones de las variables hidrológicas sobre los niveles de producción. Escenario A: el área de inundación permanente es máximo y el estacional es mínimo. Escenario B: el área de inundación estacional es máxima y el permanente es mínima, Escenario C: nivel máximo de inundación del humedal sin influencia del dique marginal.

Por otra parte, al tener un humedal más estacional en el escenario B, se aumenta el área seca disponible para la expansión de la ganadería y se aumenta la probabilidad de tener una producción “alta” que pasa de 30% a 42.8% (es decir, se aumenta un 12.8% de probabilidad de tener más de 146,998 cabezas de ganado). Bajo el escenario C se da un mayor equilibrio entre las zonas inundadas permanentemente y estacionalmente comparado con los otros escenarios, sin embargo, los altos niveles de inundación del humedal conllevarían a un mejoramiento de la producción pesquera, mejorando la probabilidad de una pesca “alta” en cerca de un 25%, además, el no control hidráulico del dique marginal generó una expansión del área cubierta por el humedal, lo que afecta directamente el área disponible y producción de ganadería y agricultura.



**Figura 2.6.** Diagrama araña de los efectos de diferentes combinaciones del pulso de inundación sobre las variables de producción ganadera, agrícola y pesquera. Cambios de las probabilidades de ocurrencia de cada estado bajo diferentes escenarios.

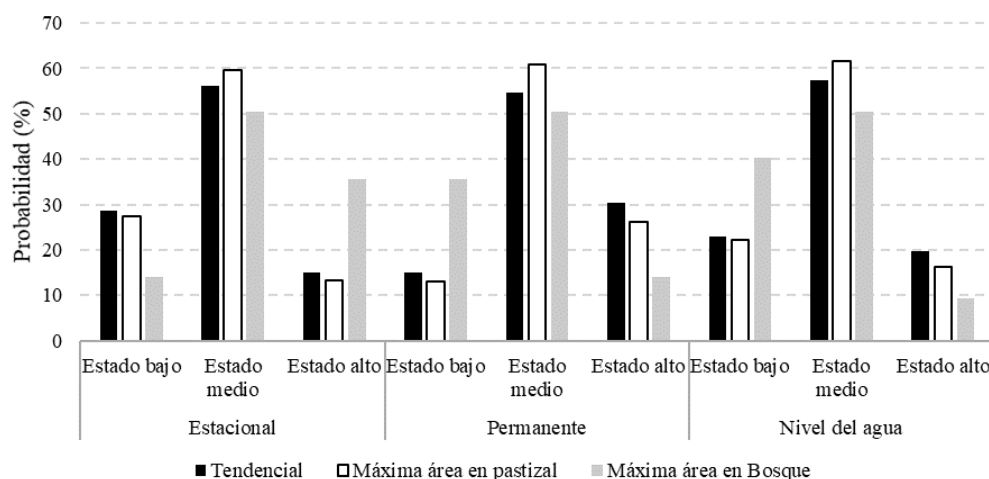


**Figura 2.7.** Variación en los estados altos (> percentil 0.8) en la producción ganadera y pesquera bajo diferentes escenarios evaluados. Ganadería: estado  $\geq 146.998$  cabezas de ganado.

### 3.3. Presiones del sistema social sobre aspectos de la dinámica hidrológica

A través del análisis “Top-Down” que permitió generar la RB , se analizó como los diferentes momentos hidrológicos y condiciones del pulso de inundación alteran los niveles de producción económica del humedal, sin embargo, la metodología de redes bayesianas también permite observar cuál fue la causa más probable en la disposición de las coberturas vegetales y su efecto sobre las dinámicas de inundación del pulso a partir del análisis “Botton-up” (Castelletti and Soncini-Sessa, 2007).

Esta herramienta es útil para abordar, por ejemplo, escenarios donde se analice cual fue la causa más probable para el aumento de cobertura en bosque y pastizales del DMI. Si el área en bosque o pastizales tuviera una probabilidad del 100% de estar en su estado superior (i.e. mayor a 177.84 km<sup>2</sup> en bosque y 461.93 km<sup>2</sup> en pasto) es posible que una de las causas esté asociada a la disminución de nivel en la columna de agua del humedal, la disminución de área cubierta permanentemente y el aumento de una dinámica más estacional del humedal (Ver figura 8). Esto puede deberse a la disminución de escorrentía proveniente de las cuencas aportantes o por cambios en los procesos geomorfológicos e hidráulicos de los suelos del humedal, proveniente quizá del aumento en la demanda de control hidráulico para la ampliación de la frontera agrícola y/o económica o variaciones climáticas afectadas, por ejemplo, por el cambio climático, lo que promovería un crecimiento vegetal en las zonas secas y/o el aprovechamiento de las zonas secas para actividades de producción forestal y/o pastos para actividades ganaderas.



**Figura 2.8.** Posibles causas del aumento en área de la cobertura bosque y pasto. Cambios en las probabilidades de ocurrencia de las variables hidrológicas. Cobertura estacional: estado bajo: 0 a 168.74 km<sup>2</sup>, estado medio: 168.74 a 218.26 km<sup>2</sup> y estado alto: ≥ 218.26 km<sup>2</sup>. Cobertura permanente: estado bajo: 0 a 74.73 km<sup>2</sup>, estado medio: 74.73 a 114.26 km<sup>2</sup> y estado alto: ≥ 114.26 km<sup>2</sup>. Nivel del agua: Estado bajo: 0 a 404.96 cm, estado medio: 404.96 a 503.63 cm y estado alto: ≥ 503.63 cm.

Un aumento en las coberturas vegetales de pastos y bosques estaría asociado a un posible cambio en las reglas de usos del suelo del DMI de Ayapel. Como nuevo sitio Ramsar, las futuras tomas de decisiones del humedal de Ayapel tendrán un componente de conservación

importante, sin embargo, estudios como los realizados por Campuzano et al., (2020) analizan como al potenciar las áreas de ganadería y agricultura para conservación a través de procesos de restauración ecológica conllevarían a un deterioro socioeconómico de la comunidad de Ayapel. Así, bajo la mirada de este estudio, si se aumentan las áreas para conservación de la cobertura bosque, por ejemplo, se tendrían dos efectos probables: la disminución en área disponible para expansión de la lámina de agua del humedal (ejemplo representado en la red bayesiana que generaría una disminución en la funcionalidad ecológica del humedal) o la disminución de área disponible para actividades económicas (ejemplo representado en el estudio de Campuzano et al., (2020)). Estos dos efectos generarían un conflicto en el acceso a las áreas del humedal, donde las zonas destinadas a conservación o uso sostenible (de acuerdo a la categoría que se establezca en el DMI) podrían entrar en conflicto con las áreas cubiertas por inundaciones extremas, así, es importante contemplar que las especies pioneras para procesos de restauración sean especies que soporten las dinámicas de inundación y que los usos del suelo sostenibles dentro del DMI se realicen entendiendo la dinámica geomorfológica del humedal. Lo anterior teniendo en cuenta que las decisiones de gestión del sistema social deben de ir orientadas hacia procesos que permitan un desarrollo económico sostenible, que conserven la funcionalidad ecológica del humedal y permitan un desarrollo económico de la población.

#### **4. Discusión**

La dinámica hidrológica de los humedales tropicales está determinada por las épocas de lluvia y el pulso de inundación (Daskin et al., 2019; Junk et al., 2014; Ricaurte et al., 2019) lo cual genera que en épocas secas las zonas libres dispuestas por la contracción del pulso de inundación sean aprovechadas para ampliar la frontera agrícola y/o ganadera (Junk et al., 2013). Así, bajo las condiciones del escenario A, donde el área cubierta por el humedal es permanente durante todo el año, se disminuirán las zonas secas disponibles para aprovechamiento del sistema social para actividades económicas y se verían afectados los niveles de producción de ganadería y agricultura, lo cual generaría una disminución en el bienestar social (Pande and Sivapalan, 2017; Van Dam et al., 2013). Lo anterior se ve soportado por estudios como los realizados por Sultana et al., (2020), donde se presentan como para una comunidad de Bangladesh se disminuyó el bienestar de la población al disminuirse las áreas disponibles para pastoreo y aumentarse los costos para la realización de la actividad.

Por otro lado, el Escenario B evidenció como las condiciones de permanencia de inundación durante todo un año aumentan la conectividad entre cuerpos de agua del humedal, lo cual representa mejores condiciones para la reproducción y distribución de los peces y mejora la producción pesquera (McCauley et al., 2015; Van Dam et al., 2013). Tanto en el Escenario B como en el Escenario C, los altos niveles de inundación mejoran la producción de pesca y disminuyen la producción ganadera y agrícola, sin embargo, en el Escenario C podrían aumentarse los perjuicios ocasionados por la inundación debido al “The failed-levee effect”. Esta teoría debatida por Di Baldassarre et al., (2013) y Ferdous et al., (2019) muestra como en situaciones donde se implementan diques se disminuye la capacidad de adaptación social

ante el riesgo por inundación y se aumenten las pérdidas económicas frente a un posible fallo de la tecnología hidráulica. Este escenario se ve reflejado en lo sucedido en la zona de estudio durante el 2010, cuando el rompimiento del dique marginal de río Cauca causó pérdidas humanas y pérdidas económicas millonarias en actividades arroceras, ganaderas y de vivienda en la comunidad de Ayapel (BID et al., 2012).

Finalmente, analizar las relaciones socio-hidrológicas que se han generado en la zona de estudio a partir de los eventos ENSO, las presiones sobre el sistema biofísico generadas por el sistema social a través de la implementación de tecnología hidráulica o las posibles tomas de decisiones de conservación suponen un avance en el análisis de los sistemas de humedal bajo el enfoque de co-evolución. Sin embargo, bajo el escenario “Botton-up” se debe de hacer un análisis futuro con mayor énfasis en cómo los cambios y/o patrones de uso del suelo pueden modificar las dinámicas hidrológicas y cuál sería la probabilidad de estos cambios de generar un aumento en la demanda de tecnología hidráulica con objetivos de expandir la frontera ganadera o agrícola. Esto se puede cumplir realizando iteraciones de la red a través del tiempo para incorporar retroalimentaciones y nodos que varían con el tiempo (e.g. reglas de uso del suelo), lo que permitiría observar cómo los diferentes estados que toma la red puede conllevar a un cambio en la toma de decisiones en escenarios futuros (Stritih et al., 2020).

## **5. Conclusiones**

La RB presentada en este estudio permitió el acercamiento a operativizar el análisis de la co-evolución en un humedal tropical, como lo es el humedal de Ayapel, desde un enfoque socio-hidrológico. Este análisis permitió entender cómo las dinámicas hidrológicas del humedal afectan las dinámicas de producción económica vinculadas al humedal y, además, permitió conocer cuáles son las variaciones en la implementación de tecnología hidráulica y presiones del sistema social que generarían cambios en las coberturas vegetales. Ambos análisis bajo la mirada de las dinámicas geomorfológicas y de implementación de tecnología hidráulica. Si bien el acercamiento bayesiano se da en términos de probabilidad de ocurrencia, ambos análisis permiten observar cómo han sido las dinámicas co-evolutivas del caso de estudio. Se observó cómo ante el posible aumento en área del cuerpo de agua del humedal, las producciones económicas terrestres disminuirían y la producción pesquera aumentaría. Además, se observó cómo bajo escenarios de aumento en cobertura de bosque y pastos, se aumenta la probabilidad de estar bajo un humedal con menor nivel de agua, debido quizá, a las presiones y amenazas derivadas de las intervenciones antrópicas como cambios e intensificaciones en los usos del suelo, donde normalmente para ganar esos espacios a los humedales se recurre a la instauración tecnologías hidráulicas modificando las dinámicas de inundación (Di Baldassarre et al., 2013; Junk et al., 2013). Al analizar cómo el sistema hidrológico modificó las probabilidades del sistema productivo (social) y cómo las presiones y amenazas del sistema social podrían estar relacionadas con la disminución en área cubierta por el humedal, se estableció una relación socio-hidrológica en ambos sentidos, lo que supone un avance en el análisis de estos sistemas bajo el enfoque de co-evolución a través en la integración de escalas.



Por otro lado, las redes bayesianas se perfilan como una herramienta que permite avanzar en los vacíos conceptuales de los SSH y los SSE como la no-linealidad y la causalidad presente en estos enfoques. Sin embargo, dado que son gráficos acíclicos dirigidos dificultan el análisis explícito de las retroalimentaciones generadas en los sistemas. Estudios como los realizados por Stritih et al., (2020) generan una ventana de oportunidades para dinamizar la red bayesiana (realizar una red con múltiples redes) y espacializar cada una de las variables. En línea con estos autores, se propone para futuros análisis de los humedales tropicales modelados a través de redes bayesianas que incluyan variables asociadas a la calidad de vida del sistema social analizado desde perspectivas socioeconómicas, así mismo, introducir variables asociadas a las dinámicas de gobernanza formal y no formal. Esto generaría un modelo más robusto como herramienta para la toma de decisiones en la planificación y gestión de los humedales tropicales, analizando las posibles consecuencias en la funcionalidad del pulso de inundación debido al aumento en la implementación de control hidráulico, y las afectaciones en el bienestar del sistema social asociado al humedal. El uso de redes bayesianas y el fortalecimiento de la red presentada en este trabajo permitiría ventajas en analizar sistemas socio-hidrológicos con una baja calidad de datos, el acoplamiento de conocimiento de pescadores, ganaderos y agricultores, además, permitiría entender cómo las dinámicas de inundación modifican las dinámicas económicas de la población, y cómo estas dinámicas pueden conllevar a un cambio en la toma de decisiones de uso del suelo e implementación de tecnología hidráulica.

## 6. Referencias

- Aguilera Díaz, M., 2011. La economía de las ciénagas del Caribe colombiano. Colección de Economía Regional de Colombia, Bogotá.
- Barton, D.N., Kuikka, S., Varis, O., Uusitalo, L., Henriksen, H.J., Borsuk, M., Hera, A.D. La, Farmani, R., Johnson, S., Linnell, J.D.C., 2012. Bayesian networks in environmental and resource management. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 8, 418–429. <https://doi.org/10.1002/ieam.1327>
- BID, CEPAL, DNP, 2012. Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010-2011 240.
- Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M., Rodrigues, R.R., Taschetto, A.S., Garreaud, R.D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.S., Marengo, J.A., Alves, L.M., Osman, M., Li, S., Wu, L., Karamperidou, C., Takahashi, K., Vera, C., 2020. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Cain, J., 2001. Planning improvements in natural resources management: Guidelines for using Bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond. *Cent. Ecol. Hydrol.*
- Campuzano, J., Hernández, E., Vélez, F.D.J., 2020. Trabajo de investigación en maestría: Áreas y estrategias prioritarias para restauración ecológica en el sistema de humedales

de Ayapel, Córdoba, Colombia. Univ. Antioquia.

- Castelletti, A., Soncini-Sessa, R., 2007. Bayesian Networks and participatory modelling in water resource management. *Environ. Model. Softw.* 22, 1075–1088.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.003>
- Chawla, N. V., Bowyer, K.W., Hall, L.O., Kegelmeyer, W.P., 2002. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *J. Artif. Intell. Res.* 16, 321–357.  
<https://doi.org/10.1002/eap.2043>
- Collins, S.L., Knapp, A.K., Smith, M.D., Magnuson, J.J., Melack, J.M., Harlan, S.L., Orenstein, D.E., Grove, J.M., Robertson, G.P., Grimm, N.B., Childers, D.L., Whitmer, A.C., Gragson, T.L., Kofinas, G.P., Carpenter, S.R., Ogden, L.A., McDowell, W.H., Swinton, S.M., Kaye, J.P., 2010. An integrated conceptual framework for long-term social–ecological research. *Front. Ecol. Environ.* 9, 351–357.  
<https://doi.org/10.1890/100068>
- Daskin, J.H., Aires, F., Staver, A.C., 2019. Determinants of tree cover in tropical floodplains. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 286. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1755>
- Davidson, N.C., 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Mar. Freshw. Res.* 65, 934–941.  
<https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Davidson, N.C., Van Dam, A.A., Finlayson, C.M., McInnes, R.J., 2019. Worth of wetlands: Revised global monetary values of coastal and inland wetland ecosystem services. *Mar. Freshw. Res.* 70, 1189–1194. <https://doi.org/10.1071/MF18391>
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J.L., Blöschl, G., 2013. Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., Larigauderie, A., Adhikari, J.R., Arico, S., Báldi, A., Bartuska, A., Baste, I.A., Bilgin, A., Brondizio, E., Chan, K.M.A., Figueroa, V.E., Duraiappah, A., Fischer, M., Hill, R., Koetz, T., Leadley, P., Lyver, P., Mace, G.M., Martin-Lopez, B., Okumura, M., Pacheco, D., Pascual, U., Pérez, E.S., Reyers, B., Roth, E., Saito, O., Scholes, R.J., Sharma, N., Tallis, H., Thaman, R., Watson, R., Yahara, T., Hamid, Z.A., Akosim, C., Al-Hafedh, Y., Allahverdiyev, R., Amankwah, E., Asah, T.S., Asfaw, Z., Bartus, G., Brooks, A.L., Caillaux, J., Dalle, G., Darnaedi, D., Driver, A., Erpul, G., Escobar-Eyzaguirre, P., Failler, P., Fouda, A.M.M., Fu, B., Gundimeda, H., Hashimoto, S., Homer, F., Lavorel, S., Lichtenstein, G., Mala, W.A., Mandivenyi, W., Matczak, P., Mbizvo, C., Mehrdadi, M., Metzger, J.P., Mikissa, J.B., Moller, H., Mooney, H.A., Mumby, P., Nagendra, H., Nesshover, C., Oteng-Yeboah, A.A., Pataki, G., Roué, M., Rubis, J., Schultz, M., Smith, P., Sumaila, R., Takeuchi, K., Thomas, S., Verma, M., Yeo-Chang, Y., Zlatanova, D., 2015. The IPBES Conceptual Framework - connecting nature and people. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 14, 1–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- Fals Borda, O., 2002. Historia doble de la Costa. Resistencia en el San Jorge, Segunda Ed.

ed. Bogotá D.C., Colombia.

- Ferdous, M.R., Wesselink, A., Brandimarte, L., Di Baldassarre, G., Rahman, M.M., 2019. The levee effect along the Jamuna River in Bangladesh. *Water Int.* 44, 496–519. <https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1619048>
- Gain, A.K., Hossain, M.S., Benson, D., Di Baldassarre, G., Giupponi, C., Huq, N., 2020. Social-ecological system approaches for water resources management. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1780647>
- Herazo, S., Berrouët, L., Hernández, E., n.d. Causal network for the analysis of socio-hydrological interactions in tropical wetlands from a coevolution approach. Scientific paper submitted.
- Hernandez-Atilano, E., Aguirre, N.J., Palacio, J.A., Ramirez, J.J., 2008. Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. *Actual Biol* 30, 67–81.
- Herrera, L.F., Sarmiento, G., Romero, F., Botero, P.J., Berrio, J.C., 2001. Evolución Ambiental de la Depresión Momposina ( Colombia ) desde el Pleistoceno Tardío a los Paisajes Actuales.
- Jaramillo, U., Cortés-Duque, J., Flórez, C., 2015. Colombia Anfibia, un país de humedales Vol. I, Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Junk, W.J., An, S., Finlayson, C.M., Gopal, B., Květ, J., Mitchell, S.A., Mitsch, W.J., Robarts, R.D., 2013. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: A synthesis. *Aquat. Sci.* 75, 151–167. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>
- Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Lourival, R., Wittmann, F., Kandus, P., Lacerda, L.D., Bozelli, R.L., Esteves, F.A., Nunes da Cunha, C., Maltchik, L., Schöngart, J., Schaeffer-Novelli, Y., Agostinho, A.A., 2014. Brazilian wetlands: Their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 24, 5–22. <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>
- Koski, T., Noble, J.M., 2009. *Bayesian Networks An Introduction*, First Edit. ed. John Wiley & Sons, Ltd Registered.
- Kramer, D.B., Hartter, J., Boag, A.E., Jain, M., Stevens, K., Nicholas, K.A., McConnell, W.J., Liu, J., 2017. Top 40 questions in coupled human and natural systems (CHANS) research. *Ecol. Soc.* 22. <https://doi.org/10.5751/ES-09429-220244>
- Kumar, P., Avtar, R., Dasgupta, R., Johnson, B.A., Mukherjee, A., Ahsan, M.N., Nguyen, D.C.H., Nguyen, H.Q., Shaw, R., Mishra, B.K., 2020. Socio-hydrology: A key approach for adaptation to water scarcity and achieving human well-being in large riverine islands. *Prog. Disaster Sci.* 8, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100134>
- Kumar, P., Geneletti, D., Nagendra, H., 2016. Spatial assessment of climate change vulnerability at city scale: A study in Bangalore, India. *Land use policy* 58, 514–532.

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.018>

- Laterra, P., Nahuelhual, L., Vallejos, M., Berrouet, L., Arroyo Pérez, E., Enrico, L., Jiménez-Sierra, C., Mejía, K., Meli, P., Rincón-Ruiz, A., Salas, D., Špirić, J., Villegas, J.C., Villegas-Palacio, C., 2019. Linking inequalities and ecosystem services in Latin America. *Ecosyst. Serv.* 36, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.001>
- Lin, J., Qian, T., 2019. A New Picture of the Global Impacts of El Nino-Southern Oscillation. *Sci. Rep.* 9, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54090-5>
- Liu, Y., Tian, F., Hu, H., Sivapalan, M., 2014. Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: The Taiji-Tire model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 1289–1303. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1289-2014>
- López Puga, J., 2012. Cómo construir y validar redes bayesianas con Netica. *Rema* 17, 1–17. <https://doi.org/10.17811/rema.17.1.2012.1-17>
- McCann, R.K., Marcot, B.G., Ellis, R., 2006. Bayesian belief networks: applications in ecology and natural resource management. *Can. J. For. Res.* 36, 3053–3062.
- McCauley, L.A., Anteau, M.J., Van Der Burg, M.P., Wiltermuth, M.T., 2015. Land use and wetland drainage affect water levels and dynamics of remaining wetlands. *Ecosphere* 6, 1–22. <https://doi.org/10.1890/ES14-00494.1>
- Monroy-de-Jesús, J., Guadalupe-Ramírez, A., Ambriz-Polo, J.C., López-González, E., 2018. Algoritmo de aprendizaje eficiente para tratar el problema del desbalance de múltiples clases. *Res. Comput. Sci.* 147, 143–157. <https://doi.org/10.13053/rcs-147-5-11>
- Pande, S., Sivapalan, M., 2017. Progress in socio-hydrology: a meta-analysis of challenges and opportunities. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 4, e1193. <https://doi.org/10.1002/wat2.1193>
- Phan, T.D., Smart, J.C.R., Stewart-Koster, B., Sahin, O., Hadwen, W.L., Dinh, L.T., Tahmasbian, I., Capon, S.J., 2019. Applications of bayesian networks as decision support tools for water resource management under climate change and socio-economic stressors: A critical appraisal. *Water (Switzerland)* 11, 2642. <https://doi.org/10.3390/W11122642>
- Pitchforth, J., Mengersen, K., 2013. A proposed validation framework for expert elicited Bayesian Networks. *Expert Syst. Appl.* 40, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.026>
- Polhill, J.G., Filatova, T., Schlüter, M., Voinov, A., 2016. Modelling systemic change in coupled socio-environmental systems. *Environ. Model. Softw.* 75, 318–332. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.017>
- Puerta, T., Aguirre, N., Vélez, F., 2016. Sistema cenagoso de ayapel como posible sitio Ramsar en Colombia. *Gestión y Ambient.* 19, 110–122.
- Ricaurte, L.F., Patiño, J.E., Zambrano, D.F.R., Arias-G, J.C., Acevedo, O., Aponte, C.,

- Medina, R., González, M., Rojas, S., Flórez, C., Estupinan-Suarez, L.M., Jaramillo, Ú., Santos, A.C., Lasso, C.A., Nivia, A.A.D., Calle, S.R., Vélez, J.I., Acosta, J.H.C., Duque, S.R., Núñez-Avellaneda, M., Correa, I.D., Rodríguez-Rodríguez, J.A., Vilardy Q, S.P., Prieto-C, A., Rudas-Ll, A., Cleef, A.M., Finlayson, C.M., Junk, W.J., 2019. A Classification System for Colombian Wetlands: an Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. *Soc. Wetl. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01149-8>
- Salas, H.D., Poveda, G., Mesa, Ó.J., Marwan, N., 2020. Generalized Synchronization Between ENSO and Hydrological Variables in Colombia: A Recurrence Quantification Approach. *Front. Appl. Math. Stat.* 6, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fams.2020.00003>
- Serna-López, J.P., Cañón-Barriga, J.E., 2020. Projecting the future of ayapel cienaga: A hydroecologic analysis under climate change scenarios. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* 73–87. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20190940>
- Sivapalan, M., Blöschl, G., 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resour. Res.* 6988–7022. <https://doi.org/10.1002/2015WR017896>.Received
- Sivapalan, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol. Process.* 26, 1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- Stritih, A., Rabe, S., Robaina, O., Gr, A., Celio, E., 2020. An online platform for spatial and iterative modelling with Bayesian Networks. *Environ. Model. Softw.* 127, 104658. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104658>
- Sultana, P., Thompson, P.M., Wesseling, A., 2020. Coping and resilience in riverine Bangladesh. *Environ. Hazards* 19, 70–89. <https://doi.org/10.1080/17477891.2019.1665981>
- Ticehurst, J.L., Curtis, A., Merritt, W.S., 2011. Using Bayesian Networks to complement conventional analyses to explore landholder management of native vegetation. *Environ. Model. Softw.* 26, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.032>
- Troy, T.J., Srinivasan, V., Thompson, S., 2015. Moving sociohydrology forward: A synthesis across studies. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 3667–3679. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3667-2015>
- Turner II, B.L., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Hovelsrud-Broda, G.K., Kasperson, J.X., Kasperson, R.E., Luers, A., Martello, M.L., Mathiesen, S., Naylor, R., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., Selin, H., Tyler, N., 2003. Science and Technology for Sustainable Development Special Feature: Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: Three case studies. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 100, 8080–8085. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231334100>
- Van Dam, A.A., Kipkemboi, J., Rahman, M.M., Gettel, G.M., 2013. Linking hydrology, ecosystem function, and livelihood outcomes in African papyrus wetlands using a bayesian network model. *Wetlands* 33, 381–397. <https://doi.org/10.1007/s13157-013->

Xu, J., Li, F., 2019. Response of lower Yellow River bank breachings to La Niña events since 924 CE. *Catena* 176, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.012>

## II. Conclusiones generales

El enfoque de co-evolución propuesto desde la socio-hidrología permite entender al sistema social como parte determinante de las dinámicas socio-ecológicas de los humedales tropicales. Este enfoque permite entender las interacciones entre los sistemas biofísicos y sociales como un sistema conjunto que evoluciona, comúnmente este enfoque se ha centrado en el análisis explícito de las interacciones y sus retroalimentaciones, y acercamientos implícitos de atributos como la heterogeneidad de escalas espaciotemporales y causalidad, siendo este el acercamiento con mayor margen de mejora en los sistemas socio-hidrologicos. La red causal propuesta en el Artículo 1 permitió analizar las interacciones causales entre los niveles de producción y el pulso de inundación de los humedales tropicales y cómo esta interacción depende de la funcionalidad de variables provenientes de las dinámicas geomorfológicas, hidrológicas, socioeconómicas y de gobernanza. La red causal permite analizar, por ejemplo, cómo la implementación de tecnología hidráulica en un año específico puede repercutir en la funcionalidad hidrológica del pulso de inundación, no sólo en el corto plazo sino también en el mediano y largo plazo. Asimismo, permite analizar los efectos de los cambios o la intensificación de los usos del suelo en la distribución de la superficie de la cobertura del suelo. Además, esta red causal propone acercarse a las retroalimentaciones que las decisiones de gestión del territorio puedan generar sobre la funcionalidad hidrológica de los humedales, lo que avanza en el entendimiento de los humedales como ecosistemas que evolucionan con un sistema social.

Para la modelación de la red causal se buscó una herramienta que facilitara la integración de escalas espaciotemporales y el análisis de la causalidad entre las variables. Las redes bayesianas como método probabilístico, permitió realizar las relaciones causa-efecto a través del establecimiento de tablas de probabilidad condicional y adicionalmente, posibilitó la integración de variables provenientes de la percepción del sistema social y el análisis de bases de datos incompletas. La red adaptada para el caso de estudio en el humedal de Ayapel analizó las dinámicas de las principales actividades económicas del municipio en respuesta a diferentes escenarios hidrológicos y las posibles causas del deterioro de la funcionalidad hidrológica del humedal. No se tuvo en cuenta en el proceso de modelación variables provenientes de la gobernanza, las dinámicas de nutrientes en la zona de transición acuático-terrestre y la calidad del agua, dado que estas variables representan en análisis de una funcionalidad ecológica que tiene lugar en escalas espaciales más complejas.

Por otro lado, las redes bayesianas se perfilan como una herramienta que permite avanzar en los vacíos conceptuales de los SSH y los SSE como la no-linealidad y la causalidad presente en estos enfoques. Sin embargo, dado que son gráficos acíclicos dirigidos dificultan el análisis explícito de las retroalimentaciones generadas, esto podría solucionarse a futuro con

la dinamización de las tablas de probabilidad condicionada y los estados de las redes bayesianas, es decir, con la creación de una red que incluya diferentes configuraciones de redes bayesianas. Este tipo de avances, como los propuestos por Stritih et al., (2020), que proponen una plataforma en línea para la dinamización de las redes bayesianas a través de la iteración de redes y su espacialización, permiten avanzar en la incorporación de variables asociadas a la dinámica de nutrientes, los procesos de toma de decisiones y la calidad de agua. Estos avances permitirían integrar procesos funcionales dados en escalas temporales y espaciales diferentes al fenómeno de co-evolución analizado en este estudio (Pulso de inundación – producción), por ejemplo, la integración de variables que requieren resoluciones detalladas tanto espacial como temporalmente (e.g. la dinámica de nutrientes y la toma de decisiones en las reglas de usos del suelo a nivel de parcelas) que para el caso de estudio no fueron integradas debido a la poca instrumentación y disponibilidad de información, las cuales limitaron el ejercicio a un periodo de análisis de 1995 a 2019 y resoluciones espaciales a nivel municipal.

La aplicación de la red causal propuesta en esta investigación permitió analizar los ecosistemas de humedal desde un enfoque socio-hidrológico, donde las dinámicas sociales se consideran como un factor determinante en las dinámicas biofísicas del ecosistema y viceversa. Además, genera avances en el entendimiento de la funcionalidad ecológica de los humedales tropicales frente a escenarios hidrológicos extremos y en el entendimiento de las variaciones de las dinámicas económicas que se modifican a partir de inundaciones y sequías. Además, su aplicación permitiría el fortalecimiento de estrategias de adaptación ante cambio climático o eventos ENSO, el fortalecimiento de planes de gestión del riesgo y planes orientados a la toma de decisiones en el uso del suelo. Para alcanzar los objetivos de ecosistemas sostenibles y generar planes de gestión y planificación del territorio, es necesario realizar un análisis histórico de la relación entre los pulsos de inundación y las actividades económicas/sociales asociadas a los humedales, el modelo propuesto en este documento puede generar información de línea base para la toma de decisiones, donde prevalezca la sostenibilidad de la funcionalidad de los humedales y los servicios ecosistémicos que estos proporcionan a la sociedad.

### **Referencias usadas en introducción y conclusiones generales**

- Sivapalan, M., Blöschl, G., 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resour. Res.* 6988–7022. <https://doi.org/10.1002/2015WR017896>. Received
- Sivapalan, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol. Process.* 26, 1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- Stritih, A., Rabe, S., Robaina, O., Gr, A., Celio, E., 2020. An online platform for spatial and iterative modelling with Bayesian Networks. *Environ. Model. Softw.* 127, 104658. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104658>