

Modelos poblacionales como herramienta predictiva para evaluar el impacto de fenómenos climáticos en peces dulceacuícolas

Population models as a predictive tool to evaluate the impact of climate phenomena on freshwater fish

Modelos populacionais como ferramenta preditiva para avaliar o impacto dos fenômenos climáticos nos peixes de água doce

Erika J. Benito-Gonzalez¹ , Hernando Ramírez-Gil² 

Artículo de investigación

Recibido: 11 de junio de 2024

Aceptado: 20 de noviembre de 2024

Publicado: 16 de diciembre de 2024

RESUMEN

El aumento de las temperaturas, la sequías y las fluctuaciones en las precipitaciones, como consecuencia del cambio climático, ha ocasionado la evapotranspiración del agua, con la consiguiente disminución del caudal de los ríos y la alteración del régimen hidrológico de los cuerpos de agua. Este cambio tiene efectos directos en las especies que habitan y dependen de estos ecosistemas acuáticos. En este contexto, resulta esencial comprender la dinámica de las especies acuáticas y como estas se ven afectadas. Los modelos poblacionales se presentan como herramienta fundamental para investigar cómo factores biológicos, ecológicos y ambientales afectan la dinámica de una especie. De este modo, se pueden generar recomendaciones y realizar posibles predicciones sobre el futuro de estas poblaciones.

Palabras claves: Temperatura, dinámica de poblaciones, agua dulce, caudal, río

ABSTRACT

The increase in temperatures, droughts and fluctuations in precipitation, as a consequence of climate change, has caused

- 1 Biol, Grupo de Investigación Sistemas Dinámicos, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia, Grupo de Investigación Evaluación, Manejo y Conservación de Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros, Departamento de Biología y Química, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.
Email: erika.benito@unillanos.edu.co
- 2 Biol. Mar, MSc, PhD; Grupo de Investigación Evaluación, Manejo y Conservación de Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros, Departamento de Biología y Química, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.
Email: hernando.ramirez@unillanos.edu.co

Como Citar (Norma Vancouver): Benito-González EJ, Ramírez-Gil H. Modelos poblacionales como herramienta predictiva para evaluar el impacto de fenómenos climáticos en peces dulceacuícolas. Orinoquia, 2024;28(2):e-807. <https://doi.org/10.22579/20112629.807>

La Revista Orinoquia es una revista de acceso abierto revisada por pares. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se acredite el autor y la fuente originales.

Consulte <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>
OPEN ACCESS



the evapotranspiration of water, with the consequent decrease in the flow of rivers and the alteration of the hydrological regime of bodies of water. This change has direct effects on the species that inhabit and depend on these aquatic ecosystems. In this context, it is essential to understand the dynamics of aquatic species and how they are affected. Population models are presented as a fundamental tool to investigate how biological, ecological and environmental factors affect the dynamics of a species. In this way, recommendations can be generated and possible predictions made about the future of these populations.

Keywords: Temperature, population dynamics, fresh water, flow, river

RESUMO

O aumento das temperaturas, as secas e as oscilações nas precipitações, como consequência das alterações climáticas, têm provocado a evapotranspiração das águas, com a consequente diminuição do caudal dos rios e a alteração do regime hidrológico dos corpos de água. Esta mudança tem efeitos diretos nas espécies que habitam e dependem destes ecossistemas aquáticos. Neste contexto, é fundamental compreender a dinâmica das espécies aquáticas e como elas são afetadas. Os modelos populacionais apresentam-se como uma ferramenta fundamental para investigar como fatores biológicos, ecológicos e ambientais afetam a dinâmica de uma espécie. Desta forma, podem ser geradas recomendações e possíveis previsões sobre o futuro destas populações.

Palavras-chave: Temperatura, dinâmica populacional, água doce, vazão, rio

INTRODUCCIÓN

Debido al desarrollo económico, el crecimiento demográfico y el cambio en los estándares de consumo, el uso global del agua ha experimentado un aumento significativo, multiplicándose por seis en los últimos cien años, y se proyecta que si esta tendencia persiste el mundo podría entrar en un déficit hídrico global del 40% en 2030 (IPCC, 2022). Este escenario se ve agravado por las afectaciones al recurso hídrico debido al cambio climático, el cual genera riesgos crecientes de desastres asociados a fenómenos extremos como sequías e inundaciones, con consecuencias económicas, ambientales y sociales de gran magnitud (Melgarejo et al., 2021).

Los humedales desempeñan un papel fundamental en la regulación del ciclo del agua, el

almacenamiento carbono y la mitigación del cambio climático, además de actuar como barreras naturales frente a inundaciones (Corrales-Chaves, 2025). Estos ecosistemas constituyen verdaderas fuentes de vida, caracterizadas por una elevada riqueza biológica que sustenta el equilibrio ecológico y la estabilidad ambiental. En ellos habitan diversos organismos como plancton, peces, mariposas, aves y anfibios que dependen del agua y de las variaciones naturales en los niveles de inundación para su supervivencia (Jaramillo et al., 2015).

En Colombia, los humedales cubren aproximadamente el 26% del territorio nacional e insular, lo que equivale a 30.781.149 hectáreas. La región de la Orinoquia concentra cerca del 48% de los humedales continentales, con predominio de sistemas temporales y permanentes bajo dosel, lo que evidencia su notable relevancia ecológica (Jaramillo et al., 2015).

Entre los humedales se incluyen los ríos, ecosistemas lóticos multifuncionales y heterogéneos que desempeñan un papel esencial en la dinámica ambiental, al interactuar con factores biológicos, climáticos, geomorfológicos y con los sistemas de aguas superficiales y subterráneas (Briceño y Gallego, 2023). A pesar de que Colombia posee un potencial hídrico que triplica el promedio de los países suramericanos (IDEAM et al., 2017), enfrenta graves problemas de calidad y disponibilidad de agua en diversas regiones, debido a la contaminación, la deforestación, las sequías, la explotación descontrolada de los recursos y la limitada protección legal de estos ecosistemas que apenas alcanza el 3,9% de su extensión total. Estas problemáticas impactan negativamente la biodiversidad y la funcionalidad ecológica de los sistemas acuáticos (Samboni et al., 2007; Betancur-Vargas et al., 2017; Mogane et al., 2023).

El cambio climático, al elevar la temperatura e intensificar la frecuencia y duración de las sequías, ha provocado la disminución o desaparición del caudal de numerosos ríos en distintas regiones del país (Kubiak-Wójcicka y Bąk, 2018). Esta situación es especialmente preocupante, dado que los ríos constituyen hábitats esenciales para una gran diversidad de organismos acuáticos y resultan vitales para el cumplimiento de sus ciclos de vida (Watson-Hernández et al., 2021).

Por ello, comprender los aspectos biológicos, ecológicos y ambientales de las especies dulceacuícolas adquiere una importancia fundamental. En este contexto, los modelos poblacionales emergen como herramientas analíticas de gran valor, al permitir simular escenarios temporales y evaluar el impacto de distintos factores ambientales y antrópicos sobre las poblaciones. Dichos modelos facilitan, además, la formulación de estrategias de manejo y conservación orientadas a mitigar los efectos del cambio climático sobre las especies y sus ecosistemas.

En este marco, el objetivo de la presente revisión es analizar cómo los fenómenos y cambios

climáticos influyen en la dinámica de las especies dulceacuícolas y de qué manera los modelos poblacionales pueden contribuir al entendimiento y la conservación de estos sistemas biológicos.

CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático se refiere a las alteraciones o el clima a lo largo del tiempo, abarcando cambios en la temperatura y la precipitación, originados tanto por actividades humanas como por factores naturales (Bernauer, 2013). Estas modificaciones se manifiestan a través de variaciones en la temperatura y las precipitaciones, previéndose que tendrán un impacto directo en las reservas de agua debido al aumento de la evaporación de la superficie terrestre (Schewe et al., 2014). A pesar del incremento en las precipitaciones, que podría contrarrestar las evaporaciones, en algunas regiones se espera una disminución en el volumen de lluvias, lo que resultará en una reducción de los caudales fluviales y la disponibilidad de agua (Hoegh-Guldberg et al., 2018).

Estas disminuciones tendrán un impacto directo en la disponibilidad de agua destinada para la agricultura, el suministro doméstico y la industria, así como el uso de cuerpos de agua para la navegación, generación de energía, pesca y el ocio (IPCC, 2022). El aumento de la temperatura derivado del cambio climático conlleva una reducción global de la nieve y de la capa de hielo, siendo este declive más pronunciado en las regiones montañosas tropicales, que se perfilan como las más vulnerables. Sin embargo, es importante señalar que, aunque el deshielo de los glaciares puede aumentar el flujo fluvial, la variabilidad del caudal de los ríos también experimentará un incremento significativo (Huss et al., 2017; Buytaert et al., 2017).

Otra consecuencia del aumento de la temperatura es la proliferación de algas nocivas (FAN), cianobacterias tóxicas que alteran la red alimentaria y generan hipoxia. Esto afecta a numerosos lagos y estuarios que desempeñan funciones ecosistémicas, como el suministro de agua potable a millones

de personas. Además, el incremento de la eutrofización, impulsado por prácticas deficientes e incluso ausentes de tratamientos de agua en diversas partes del mundo, impacta negativamente las reservas de agua disponibles, la pesca y actividades recreativas (UNESCO y UN-Water, 2020).

Estudios recientes han demostrado que el cambio climático genera impactos no solo ambientales, sino también en el ámbito socioeconómico. Las elevadas temperaturas, por ejemplo, pueden incidir negativamente en las inversiones individuales y en los resultados educativos de los niños en los distritos escolares más desfavorecidos, contribuyendo a ampliar las disparidades en el rendimiento académico en los logros educativos (Colmer, 2021; Park et al., 2020). Además, la escasez del agua, pone en riesgo la seguridad alimentaria, intensificando la desigualdad social y de salud, ya que se reduce su capacidad de adaptación a un entorno en constante cambio (Sheng et al., 2023).

Colombia no escapa a los desafíos del cambio climático, ya que las alteraciones en los patrones climatológicos, han resultado en un aumento en el nivel del mar, una disminución en la productividad agropecuaria y forestal, la pérdida de fuentes y cursos de agua, así como un aumento en los procesos de desertificación, entre otros impactos (IDEAM et al., 2017). Como consecuencia directa de estos cambios, no sólo se ha observado una desaceleración en el crecimiento de la productividad agrícola en las últimas cinco décadas, sino que también el calentamiento y acidificación de los océanos han tenido repercusiones adversas en la producción de acuicultura y pesca (IPCC, 2022).

Así mismo, la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera ha dado lugar a un incremento los eventos meteorológicos extremos a nivel mundial. En el caso de Colombia, esta realidad se manifiesta en la mayor frecuencia e intensidad de períodos de sequía y precipitaciones, con repercusiones económicas significativas en las diferentes regiones del país, especialmente en aquellas que dependen en gran medida del sector

primario, que abarca la agricultura, ganadería, pesca, silvicultura y caza (Cai et al., 2020; Taconet et al., 2020).

FENÓMENO ENSO

La Oscilación del Sur El Niño (ENSO) emerge como uno de los fenómenos climáticos más destacados a nivel global, manifestándose mediante un calentamiento anómalo de las aguas superficiales en el pacífico tropical central y oriental, especialmente frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Este fenómeno se caracteriza por variaciones cíclicas en las temperaturas de la superficie del océano y la atmósfera (Bejarano-Salcedo et al., 2020). ENSO presenta dos fases contrastantes que se alternan: El Niño, marcado por un calentamiento anormal de las aguas, y La Niña, caracterizada por temperaturas más frías de lo habitual. Ambas fases conllevan cambios significativos en los patrones de precipitación y presión atmosférica, generando impactos notables (Chen et al., 2023).

El fenómeno de El Niño, en muchas ocasiones, conlleva a una disminución significativa de la precipitación en determinadas regiones, provocando sequías severas. Además, la variación en la temperatura del agua puede generar desplazamientos en las poblaciones de las especies acuáticas, afectando la biodiversidad en áreas específicas y teniendo un impacto negativo tanto en la pesca comercial como en la cadena alimentaria de los ecosistemas acuáticos (Cai et al., 2020; Chen et al., 2023).

En Colombia, las dos fases de este fenómeno se presentan, siendo responsables principales de sequías y precipitaciones extremas que impactan diferentes regiones del país, con consecuencias negativas a nivel social y económico (Pabón-Caicedo y Montealegre-Bocanegra, 2017).

Desde 1950 la intensidad y frecuencia de estos fenómenos han experimentado un aumento evidente, manifestándose en cambios de

temperatura cada vez más pronunciados. Esta tendencia se destaca en el sexto informe del IPCC, que sostiene que el aumento de emisiones intermedias y altas de gases efecto invernadero podría causar que fenómeno del Niño y de la Niña sean cada vez más extremos (IPCC, 2022). Asimismo, entre el período comprendido entre 1971 y 2015, la temperatura promedio del país ha experimentado un incremento de 0,8°C, lo que ha contribuido de manera significativa al aumento de las sequías y precipitaciones extremas en las últimas tres décadas (IDEAM et al., 2017).

En los años 2014 y 2015, la región de la Orinoquia, específicamente el departamento de Casanare, experimentó sequías extremas que impactaron severamente las sábanas inundables. Estos eventos provocaron las pérdidas significativas de fauna silvestre como los chigüiros y de producción ganadera, particularmente al ganado vacuno (Chaparro et al., 2019).

ECOSISTEMAS DE AGUA DULCE

Los recursos de agua dulce desempeñan un papel vital en el sustento de la vida y satisfacción de diversas necesidades domésticas, agrícolas, económicas e industriales (Mogane et al., 2023). Existen dos tipos principales de ecosistemas acuáticos: los lenticos donde el agua no fluye como los lagos y loticos donde el agua siempre está en movimiento, siendo los ríos un ejemplo de esta categoría, caracterizados por un flujo de agua continuo, aunque con caudal relativamente bajo (Briceño y Gallego, 2023).

Un río se caracteriza por su alta heterogeneidad, exhibiendo contrastes notables en términos de profundidad, forma, sustrato y velocidad, dando lugar a una diversidad significativa de especies acuáticas a lo largo de su curso (Briceño y Gallego, 2023). Según Rivera et al. (2017) y Rodríguez-Olarte et al. (2019), incluso pequeñas variaciones en los patrones de precipitación en una región, puede desencadenar desequilibrios en el balance hídrico del río, reduciendo así su capacidad como

proveedor de servicios ecosistémicos para las poblaciones humanas que dependen de él en las cuencas cercanas.

En su investigación, Zhang et al. (2019), señala que los ríos cobrado mayor relevancia actualmente debido a la diversidad de servicios ecosistémicos, como suministro de agua que ofrecen, como el suministro de agua, transporte, generación hidroeléctrica, funciones de apoyo ecológico, así como servicios estéticos y culturales, entre otros. A pesar de su importancia, los ríos continúan experimentando una degradación ecológica a nivel global.

Además de la degradación ecológica ocasionada por las actividades antropogénicas, los cuerpos de agua enfrentan desafíos adicionales debido a las sequías y cambio en las precipitaciones vinculados al cambio climático, generando variaciones en el régimen hidrológico, dada la estrecha relación entre estos fenómenos (Rodríguez-Olarte et al., 2018). Esta interconexión plantea la posibilidad que en el futuro se experimenten caudales inferiores a los actuales como resultado de disminución en las precipitaciones, lo que podría poner en riesgo el funcionamiento e integridad de los ecosistemas. Esto a su vez, amenazaría a las poblaciones humanas que dependen de los diversos servicios ecosistémicos que proveen estos ecosistemas acuáticos (Rodríguez-Olarte et al., 2019).

CAUDAL

Aunque el agua es un recurso esencial para el mantenimiento de la vida, los ecosistemas acuáticos están siendo sometidos a transformaciones, degradación y sobreexplotación. Este proceso está llevando a una disminución en el caudal necesario para preservar la biodiversidad y los servicios esenciales que ofrecen a las comunidades (Watson-Hernández et al., 2021).

Los períodos de caudal más bajo en los ríos, los cuales depende principalmente de las condiciones climáticas, constituyen una parte integral del régimen hidrológico de muchos cursos

de agua (Watson-Hernández et al., 2021). Estos momentos son de gran importancia para el funcionamiento de diversos procesos en los ecosistemas fluviales (Kubiak-Wójcicka et al., 2021). Sin embargo, el cambio climático al aumentar la intensidad y frecuencia de las sequías en muchas regiones, está generando un mayor riesgo de escasez de agua (Marx et al., 2018), ya que algunas de estas sequías prolongadas pueden llevar a la desaparición del caudal de los ríos (Kubiak-Wójcicka y Bąk, 2018).

Así, en el futuro, el cambio climático podría desencadenar procesos más intensos en el ciclo hidrológico, como resultado del aumento de la temperatura del aire y una mayor variabilidad en las precipitaciones. Esto a su vez podría intensificando la tasa de evapotranspiración aumentando el riesgo de sequías y caudales extremadamente bajos (Kubiak-Wójcicka y Machula 2020). Este escenario plantea una problemática significativa, ya que la creciente demanda de agua dulce para el consumo, la industria y la agricultura ha provocado cambios en las funciones de los ríos y amenaza la resiliencia de los ecosistemas acuáticos (Sharma y Dutta 2020).

La reducción de los caudales y la consiguiente reducción de los niveles de agua amenaza el tráfico fluvial y el suministro de agua para uso comunitario y el desarrollo de recursos. Esto conlleva a que procesos cruciales, como el transporte de sedimentos, la contaminación y la distribución de nutrientes fundamentales para el buen estado ecológico del agua, no se lleve a cabo (Gierszewski et al., 2020; Szatten y Habel, 2020).

En los últimos años, se ha evaluado exhaustivamente el impacto del Cambio Climático en cuencas hidrológicas, especialmente en lo que respecta a la planificación y prevención de inundaciones. Este análisis se basa en el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, que incide en la temperatura y las precipitaciones, y, consecuentemente, los flujos de los ríos y los recursos hídricos (Orozco et al., 2018).

Caudal ambiental

Ante los desafíos que enfrentan los ecosistemas acuáticos, las entidades gubernamentales de Colombia han implementado diversas estrategias dirigidas al rescate, protección y conservación del recurso hídrico. Entre estas iniciativas destaca el Decreto 1076 de 2015.

En el artículo 2.2.3.3.1.3 del Decreto 1076 de 2015, se define el caudal ambiental como el "Volumen de agua por unidad de tiempo, en términos de régimen y calidad, requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos".

No obstante, esta definición solo englobaba los servicios de aprovisionamiento dejando fuera los servicios de soporte, regulación y culturales. Con el propósito de abarcar estos servicios, el ministerio ajustó la definición de caudal ambiental través del Decreto 050 de 2018.

Teniendo esto en cuenta, el caudal ambiental no se concibe como un valor mínimo constante en el tiempo ni como un régimen de caudales mínimos. Más bien, se comprende como el mantenimiento del funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y de los servicios ecosistémicos que proporcionan. Estos servicios son fundamentales para el bienestar social y económico de los seres humanos, según los establece el Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible en 2018.

En este sentido, el Ministerio elaboró un documento denominado "Metodología para la estimación de caudales ambientales en Colombia" entre el 2017 y 2018. Actualmente, esta metodología se está implementando en el río Bogotá, conforme a lo dispuesto en la resolución 2130 de 2019, en cumplimiento de las directrices establecidas en el marco de la Sentencia relacionada con dicho río.

A nivel global, los caudales ambientales se utilizan como herramienta de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos, destinada a abordar la problemática generalizada del uso excesivo del agua

y el deterioro de los ecosistemas acuáticos. Esto cobra especial relevancia dado que, en los últimos años, importantes cuerpos de agua en algunos países han llegado a desaparecer, como el Lago Poopó en Bolivia, el Mar Aral en Kasajistán y el Lago Mead y Badwater en Estados Unidos (Watson-Hernández et al., 2021).

RELACIÓN DE LA ICTIOFAUNA CON EL CAUDAL

El caudal los ríos desempeña un papel crucial en el establecimiento de organismos acuáticos, ya que influye en la composición del sustrato, el transporte de nutrientes y partículas orgánicas, las propiedades químicas del agua, y la disponibilidad y adecuación del hábitat (Burrows et al., 2020). Es por ello esencial, conocer las necesidades específicas de caudal para garantizar un flujo que favorezca su supervivencia (Watson-Hernández et al., 2021).

En este contexto, un estudio de Dongkyun et al. (2018), abordó las preferencias de hábitat de cinco especies de peces, con forma de torpedo y tamaños similares. Los resultados indicaron que estas especies son capaces de utilizar velocidades nulas y de corriente moderada a fuerte, siempre que estas últimas no superen 1 m/s. No obstante, la elección del hábitat no solo depende de la morfología de la especie, sino también de sus hábitos alimenticios. Las especies tienden a habitar donde encuentran mayor presencia de sus presas preferidas (Seung y Sung, 2018).

En una investigación posterior, Watson-Hernández et al. (2021) llevaron a cabo una evaluación de tres especies de peces (*Gobiesox nudus*, *Rhamdia laticauda* y *Astyanax aeneus*) en el río Pejibaye (Costa Rica). Observaron que, a medida que aumenta la profundidad y velocidad del agua, también aumentaba la cantidad de organismos. El incremento del caudal también conllevó a un aumento en el porcentaje de hábitat utilizable. Sin embargo, se identificó un punto crítico en el cual tanto la abundancia de organismos como la disponibilidad de hábitat comenzaron a disminuir. Este

fenómeno fue atribuido a las adaptaciones morfológicas y a los hábitos alimenticios de los organismos (Quesada-Alvarado y Campos, 2019), los cuales les permiten establecerse en uno o varios tipos de microhábitats, evitando lugares donde estas condiciones sean extremas para evitar pérdidas energéticas superiores a las ganancias obtenidas por la alimentación.

Por otro lado, las especies con rangos más estrechos en velocidad y profundidad, se presentan como indicadores más idóneos del caudal ambiental. Las variaciones con una tendencia a la disminución en sus rangos pueden señalar la reducción de sus hábitats preferidos, lo que pone en peligro a las especies adaptadas a caudales altos (Watson-Hernández et al., 2021).

Debido a la relevancia del caudal en la vida de las especies acuáticas, se han desarrollado modelos para cuantificar el porcentaje de hábitat idóneo. Estos modelos permiten determinar bajo qué volúmenes de agua se pueden mantener las condiciones requeridas por una o varias especies en ríos donde se han otorgado permisos de extracción de agua (Watson-Hernández et al., 2021).

DINÁMICA DE SISTEMAS

La dinámica de sistemas es una metodología que analiza el comportamiento de sistemas a través de la construcción de modelos de simulación informática, los cuales revelan las relaciones fundamentales entre el comportamiento y la estructura del sistema (Aracil y Gordillo, 1997). En el sistema que se va a modelar, diversas variables experimentan cambios a lo largo del tiempo, y la combinación de estos cambios refleja el comportamiento del sistema durante un periodo determinado, proporcionando así una imagen gráfica de la evolución del sistema (Aracil y Gordillo, 1997).

Según Sterman (2000), la dinámica del sistema se define como un método de modelación que facilita la creación de simulaciones computacionales de sistemas complejos. Por otro lado, Izquierdo et

al. (2008), subraya aspectos esenciales para comprender la dinámica de sistemas, señalando que la variación del comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo constituye su dinámica, por lo tanto, el tiempo siempre será la variable de la cual depende el sistema. Otro aspecto crucial que resalta es que el sistema es cambiante, lo que significa que las condiciones pueden variar de un momento a otro en poco tiempo.

La dinámica de sistemas, como método de modelación computacional, requiere de software específico para la creación de simulaciones, y uno de los programas destacados para este propósito es VENSIM® PLE. Este software ofrece la posibilidad de elaborar diagramas causales y modelos con una variedad de variables, permitiendo la visualización de diversos escenarios para cualquier sistema (García, 2017).

Aunque la dinámica de sistemas fue concebida principalmente para abordar problemas industriales, con el tiempo su aplicación se ha extendido a diversos campos, incluyendo ámbitos urbanos, socioeconómicos, regionales, sociológicos y globales. Un área de particular relevancia ha sido la biológica, donde ha demostrado ser una herramienta valiosa para aplicaciones en sistemas ecológicos y ambientales (Aracil y Gordillo, 1997).

DINÁMICA DE POBLACIONES

Por otro lado, la dinámica de poblaciones, una rama de la biología, se dedica al estudio de las variaciones que experimentan las comunidades biológicas, así como a los factores y mecanismos que las regulan. La investigación de las oscilaciones en el tamaño y/o densidad de las poblaciones naturales se fundamenta en tres principios esenciales: en primer lugar, en unas bases teóricas generales que subyacen al cambio poblacional; en segundo lugar, en la formalización e interpretación de estas bases mediante modelos matemáticos; y, por último, en la interpretación de estas bases y modelos en términos de mecanismos biológicos (Vargas y Rodríguez, 2008).

Esta rama de la biología se encuentra interrelacionada con diversas ciencias, en especial con las matemáticas, con el fin de describir y cuantificar de manera precisa los cambios que ocurren continuamente en una población. Comprender la dinámica poblacional de los peces implica no solo tener el conocimiento del tamaño y estructura de la población, sino también la forma e intensidad con que esta cambia y se renueva (Csirke, 1980).

Russel (1931) se destacó como uno de los pioneros en describir, mediante un modelo matemático la dinámica de una población de peces en explotación, identificando los factores que rigen esta dinámica. Aunque se modelo era principalmente descriptivo y solo consideraba factores intrínsecos (excepto la captura), representó un avance significativo para su época, sentando las bases para el desarrollo de modelos analíticos más complejos (Csirke, 1980).

A pesar de que el modelo de Russel no involucraba interacciones entre especies, a medida que ha avanzado el tiempo, la mayoría de estudios actuales están basados en entender la interacción entre especies marinas, como es el caso de la investigación de Freedman et al. (2001). En esa investigación, se propuso un sistema de ecuaciones diferenciales para representar la interacción de depredadores mutualistas, es decir, depredadores que cooperan en la caza de presas. Los resultados indicaron que, en caso de que el mutualismo sea facultativo en al menos una de las poblaciones de depredadores, éstas pueden persistir en una sola población de presas.

Por otro lado, Krkošek et al. (2009), desarrollaron un modelo matemático para ilustrar la conexión entre un proceso ecológico. En este caso, la migración de peces juveniles, y un proceso epidemiológico que aborda el período de exposición a parásitos. Este enfoque es esencial para comprender la amenaza de los piojos de mar (*Lepeophtheirus salmonis*) que se propagan del salmón cultivado al salmón salvaje. El modelo reveló que a medida que aumenta la exposición del salmón, los piojos se

acumulan a niveles que pueden elevar la mortalidad y afectar las poblaciones naturales de salmón.

A pesar de estos avances, hay una escasez de modelos matemáticos que incorporen factores externos, especialmente aquellos de naturaleza biótica, como los ambientales, en el estudio de la dinámica de poblaciones. Esta carencia representa una necesidad urgente para comprender la dinámica de los sistemas biológicos mediante modelos más realista. Además, Ofrecería alternativas de solución a situaciones ambientales actuales, como el cambio climático que afecta a las especies de manera significativa.

Una investigación relevante que examinó la influencia de eventos climáticos fue la desarrollada por Lehodey et al. (2003). En este estudio, se construyó un modelo de interacción físico-biológica para una población de atún que experimenta la variabilidad de componentes ambientales debido a fenómenos climáticos, como la temperatura de la superficie del mar y las corrientes oceánicas, así como factores espaciales que limitan el movimiento y el reclutamiento de esta especie. Los resultados de este modelo mostraron que la dinámica espacial de la temperatura de la superficie del océano y las corrientes, entre otros factores, afecta significativamente el reclutamiento de la población de atún. De manera específica, el modelo reveló que la especie de atún blanco subtropical (*Thunnus alalunga*) experimenta un reclutamiento bajo durante el fenómeno del Niño (sequía) y un reclutamiento alto durante el fenómeno de La Niña (inundación).

En Colombia, y particularmente en la región de la Orinoquia, existe una notable carencia de investigaciones enfocadas en la dinámica poblacional de especies dulceacuícolas bajo el contexto del cambio climático. Los escasos estudios realizados hasta la fecha han abordado la dinámica de estas especies desde una perspectiva biológica o pesquera, pero sin incorporar variables climáticas dentro de sus modelos analíticos. Sin embargo, dichos trabajos constituyen un punto de partida fundamental para el desarrollo de investigaciones

futuras que integren factores ambientales en la comprensión de la estructura y sostenibilidad de las poblaciones ícticas.

Un ejemplo relevante es el estudio desarrollado por Ladino y Valverde (2013), quienes propusieron un modelo matemático orientado al análisis de la dinámica cualitativa de *Prochilodus mariae*, una especie emblemática del río Meta, considerando dos etapas poblacionales y el factor de reclutamiento. Este trabajo permitió establecer una base teórica sólida para la modelación poblacional de especies migratorias en sistemas fluviales de la Orinoquia.

Posteriormente, Benito et al. (2023) avanzaron en esta línea de investigación al formular un modelo matemático más complejo sobre la dinámica poblacional de *Prochilodus mariae*, integrando factores ecológicos y ambientales, como el caudal del río, junto con parámetros biológicos tales como la longitud y la biomasa. Para ello, emplearon ecuaciones clásicas de crecimiento como las de Von Bertalanffy (1934) y Pauly (1980), las cuales, junto con modelos derivados de Beverton y Holt (1957) y estudios sobre tasas de crecimiento (Hutchings et al., 1993; Reznick et al., 1993), permiten evaluar el efecto de la pesca sobre procesos críticos como el reclutamiento y la estructura etaria de las poblaciones (Yunne-Jai et al., 2005).

Como parte de sus conclusiones, los autores recomendaron restringir las actividades de pesca durante los meses de abril y mayo, dado que un incremento del esfuerzo pesquero en ese período podría afectar significativamente el reclutamiento de la especie, particularmente en años caracterizados por eventos de sequía intensa. Estas recomendaciones resaltan la necesidad de incorporar variables hidrológicas y climáticas en la planificación del manejo pesquero, para garantizar la sostenibilidad de los recursos ícticos frente a escenarios de variabilidad climática.

PERSPECTIVA

El cambio climático se manifiesta con creciente intensidad, generando sequías e inundaciones cada

vez más prolongadas y severas. Estos fenómenos alteran el equilibrio de los ecosistemas terrestres y acuáticos, comprometiendo los servicios ecosistémicos que sustentan la vida y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria y el bienestar de las comunidades humanas.

En los ecosistemas acuáticos, los eventos extremos asociados al cambio climático, como la disminución de los caudales, la alteración de los regímenes de precipitación y el aumento de la temperatura, repercuten directamente en la biología y ecología de las especies. En Colombia, las sequías se han intensificado durante las últimas décadas, provocando una reducción significativa en los niveles hídricos de los ríos y humedales. Estas alteraciones afectan la fisiología, el hábitat, la alimentación y los patrones reproductivos de numerosos organismos acuáticos, especialmente de aquellas especies con ciclos de vida estrechamente ligados a las variaciones estacionales del agua.

En este contexto, la construcción y aplicación de modelos poblacionales adquiere una importancia estratégica. Estas herramientas permiten analizar de manera integral los procesos biológicos y ecológicos de las especies, evaluar la influencia de variables ambientales y proyectar posibles escenarios futuros ante diferentes condiciones climáticas. De esta forma, los modelos poblacionales se consolidan como instrumentos esenciales para la formulación de estrategias de conservación, manejo pesquero y planificación ambiental.

No obstante, a pesar de los avances en la incorporación de factores climáticos dentro de los modelos de dinámica poblacional, persiste un déficit considerable de información sobre las especies de agua dulce. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en ecosistemas marinos, dejando rezagado el estudio de los ambientes continentales. Reducir esta brecha de conocimiento es fundamental, dado que muchas especies dulceacuícolas cumplen funciones ecológicas clave y representan una fuente primaria de sustento y

seguridad alimentaria para las comunidades locales que dependen directamente de ellas.

REFERENCIAS

- Aracil J, Gordillo F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Madrid: Alianza Editorial. p. 20.
- Bejarano-Salcedo V, Caicedo-García E, Lizarazo-Bonilla FN, Julio-Román JM, Cárdenas-Cárdenas JA. (2020). Hechos estilizados de la relación entre El Niño, La Niña y la inflación en Colombia. Banco de la República, Bogotá. Borradores de Economía; No. 1105.
- Benito EJ, Ladino LM, Ramírez-Gil H. Modelling the population dynamics of an exploited, tropical fish species playing a fundamental role in aquatic ecosystems. *Ecology of Freshwater Fish*, 2023;32:477-487.
- Bernauer, T. (2013). Climate change politics. *Annual Review of Political Science*.
- Betancur-Vargas T, García-Giraldo DA, Vélez-Duque AJ, Gómez AM, Flórez-Ayala C, Patiño JE, Ortiz-Tamayo JA. Aguas subterráneas, humedales y servicios ecosistémicos en Colombia. *Biota Colombiana*, 2017;18(1):1-28.
- Beverton RJH, Holt SJ. On the Dynamics of Exploited Fish Populations: Fish and Fisheries Series. 1957;11:.
- Briceño VG, Gallego HJ. Heterogeneidad espacial y oferta de hábitats en tres ecosistemas lóticos de la Serranía de La Lindosa, Amazonía colombiana. *Revista Geográfica Digital*, 2023;20(39):20-33.
- Burrows RM, Beesley L, Douglas MM, Pusey BJ, Kennard MJ. La velocidad del agua y el afloramiento del agua subterránea influyen en la biomasa de algas bentónicas en un río tropical arenoso: implicaciones para el desarrollo de los recursos hídricos. *Hidrobiología*, 2020;847:1207-1219.

- Cai W, McPhaden M, Grimm A, Rodrigues R, Taschetto A, Garreaud R, Dewitte B, Poveda G, Ham Y, Santoso A, Ng B, Anderson W, Wang G, Geng T, Jo H, Marengo J, Alves L, Osman M, Li S, Wu L, Karamperidou C, Takahashi K, Vera C. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth and Environment*. Springer Nature, 2020;1:215–23.
- Chaparro H, Mariño J, Fonseca H. Valores de permeabilidad en sabanas susceptibles a sequía en Paz de Ariporo, Casanare (Colombia). *Revista Orinoquia Ciencia y Sociedad*, 2019;3(29):9–13.
- Chen Y, Huang X, Luo JJ, Lin Y, Wright JS, Lu Y, Chen X, Jiang H, Lin P. Prediction of ENSO using multivariable deep learning. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2023;16(4).
- Colmer J. "Temperature, Labor Reallocation, and Industrial Production: Evidence from India." *American Economic Journal: Applied Economics*, 2021;13(4):101–24.
- Corrales-Chaves L. ¿Estamos perdiendo los humedales más rápido de lo que podemos restaurarlos? *Revista de Ciencias Ambientales*, 2025;59(1).
- Csirke B. Introducción a la dinámica de poblaciones de peces. Food & Agriculture Org. 1980;192:2–3.
- Dongkyun I, Sung-Uk C, Byungwoong C. "Physical habitat simulation for a fish community using the ANFIS method." *Ecological Informatics*, 2018;43:73–83.
- Earls J. «Manejo de cuencas y cambio climático» En: Araujo, H. (Ed.). *Los andes y las poblaciones altoandinas en la agenda de la regionalización y la descentralización*. Lima: CONCYTEC, 2008.
- Freedman HI, Kumar R, Easton AK, Singh M. Mathematical models of predator mutualists. *Canadian Applied Mathematics Quarterly*. 2001;9:99–111.
- García JM. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas: Dinámica de Sistemas con VENSIMPLE. España, 2017.
- Gierszewski P, Habel M, Szmanda J, Luc M. Evaluating effects of dam operation on flow regimes and riverbed adaptation to those changes. *Science of the Total Environment*, 2020;710:136202.
- Guevara G. Evaluación ambiental estratégica para cuencas prioritarias de los Andes Colombianos: Dilemas, Desafíos y Necesidades. *Acta Biológica Colombiana*, 2014; 19(1):11–24
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K. L., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijikata, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S. I., Thomas, A., Warren, R. F., Zhou, G., & Tschakert, P. (2018). Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty IPCC*. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>
- Huss M, Bookhagen B, Huggel C, Jacobsen D, Bradley RS, Clague JJ, Vuille M, Buytaert W, Cayan DR, Greenwood G, Mark BG, Milner AM, Weingartner R, Winder M. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 2017; 5:418–435.
- Hutchings JA, Stokes TK, McGlade JM, Law R. Reaction norms of reproductive traits in brook trout and their influence on life history evolution affected by size-selective harvesting. *The Exploitation of Evolving Resources*. Berlin Springer. 1993;99:107–125.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA. (2017). *Resumen ejecutivo Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio*

- Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.
- IPCC. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022; 3-33. doi:10.1017/9781009325844.001.
- Izquierdo LR, Galán JM, Santos JJ, Del Olmo R. Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. EMPIRIA. Revista de Metodología de las Ciencias Sociales, 2008;(16):85-112.
- Jaramillo U, Cortés-Duque J, Flórez C (eds.). (2015). Colombia Anfibia. Un país de humedales. Volumen 1. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C., Colombia, 140 p.
- Krkošek M, Morton A, Volpe JP, Lewis MA. Sea lice and salmon population dynamics: effects of exposure time for migratory fish. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009;276(1668):2819-2828.
- Kubiak-Wójcicka K, Bał B. Monitoring of meteorological and hydrological droughts in the Vistula basin (Poland). Environmental Monitoring and Assessment. 2018;190: 691.
- Kubiak-Wójcicka K, Machula S. Influence of climate changes on the state of water resources in Poland and their usage. Geosciences. 2020;10(8):312.
- Kubiak-Wójcicka K, Zeleňáková M, Blišťan P, Simonová D, Pilarska A. Influence of climate change on low flow conditions. Case study: Laborec River, eastern Slovakia. Ecohydrology and Hydrobiology, 2021;21(4):570-583.
- Ladino LM, Valverde JC. Population dynamics of a two-stage species with recruitment. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2013;36(6):722-729.
- Lehodey P, Chai F, Hampton J. Modelling climate-related variability of tuna populations from a coupled ocean-biogeochemical-populations dynamics model. Fisheries Oceanography, 2003;12(4-5):483-494.
- Marx A, Kumar R, Thober S, Rakovec O, Wanders N, Zink M, Wood EF, Pan M, Sheffield J, Samaniego L. Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3°C. Hydrology and Earth System Sciences. 2018;22:1017-1032.
- Melgarejo MJ, López OI, Fernández AP (eds.). (2021). Inundaciones y sequías. Análisis multidisciplinar para mitigar el impacto de los fenómenos climáticos extremos. Alacant: Universitat d'Alacant. 1351 p.
- Meyer JL, Strayer DL, Wallace JB, Eggert SL, Helfman GS, Leonard NE. The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks. Journal of The American Water Resources Association, 2007;47(1).
- Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuenca (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones. Colombia, 2018.
- Mogane LK, Masebe T, Msagati TAM y Ncube E. A comprehensive review of water quality indices for lotic and lentic ecosystems. Environmental Monitoring and Assessment. 2023;195:126.

- Orozco I, Ramírez AI, Francés F. Modeling of the impacts of climate change on flows and storage in a high mountain basin. *Ingeniería del agua*, 2018;22(3):125-139.
- Pabón-Caicedo JD, Montealegre-Bocanegra JE. Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Jorge Álvarez Lleras No. 43*. Bogotá D.C., 2017; 168 p.
- Park RJ, Behrer AP, Goodman J. Learning is inhibited by heat exposure, both internationally and within the United States. *Nature Human Behaviour*. 2021;5:19-27.
- Pauly, D. (1984). Fish population dynamics in tropical waters: a manual for use with programmable calculators. *ICLARM Stud. Rev.* (8):325p
- Quesada-Alvarado F. Campos F. "Morphometry and burst swimming in six continental fish species from Costa Rica". *Cuadernos de investigación*, 2019;11(3): 395-402.
- Reznick D, Stokes TK, McGlade JM, Law R. Norms of reaction in fishes, *The Exploitation of Evolving Resources*. Lecture Notes in Biomathematics. BerlinSpringer. 1993; 264:72-90.
- Rivera J, Penalba O, Villalba R, Araneo D. Spatio-temporal patterns of the 2010-2015 extreme hydrological drought across the Central Andes, Argentina. *Water*. 2017;9(9):652
- Rodríguez A. Cambio climático, precipitaciones, sociedad y desastres en América Latina: relaciones y necesidades. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 2011; 28(1):165166.
- Rodríguez-Olarte D, Araujo A, Bianchi G, Boher S, Castillo O, Cordero Y, Escudero J, Fernández A, García JE, Lasso-Alcalá O, Martínez M, Marrero C, Mendoza M, Morón-Zambrano V, Rodríguez P, Segnini S, Seijas AE, Velásquez J. Los ríos en riesgo de Venezuela y la ruta para su conservación. *Ecotrópicos*. 2019; 31: 1-8.
- Rodríguez-Olarte D, Marrero C, Taphorn D. (2018). Ríos en riesgo al Mar Caribe y al Golfo de Venezuela. En D. Rodríguez-Olarte (Ed.), *Ríos en riesgo de Venezuela* (Vol. 2, pp. 71-102). Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado (UCLA).
- Russel FS. Some thoretical considerations on the overfishingproblem. *J.Cons. CIEM*, 1931;6:3-27.
- Samboni NE, Carvajal EY, Escobar JC. Revisión de parámetros físicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 2007; 27(3):172-181.
- Schewe J, Heinke J, Gerten D, Haddeland I, Arnell NW, Clark DB, Dankersf R, Eisnerg S, Fekete BM, Colón-González FJ, Gosling SN, Kim H, Liu X, Masaki Y, Portmann FT, Satoh Y, Stacke T, Tang Q, Wada Y, Wisser D, Albrecht T, Frieler K, Piontek F, Warszawski L, Kabat P. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014; 111(9):3245-3250.
- Seung K, Sung C. "Prediction of suitable feeding habitat for fishes in a stream using physical habitat simulations". *Ecological Modelling*, 2018; 385(1):65-77.
- Sharma U, Dutta V. Establishing environmental flows for intermittent tropical rivers: Why hydrological methods are not adequate? *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020; 17:2949-2966.
- Sheng X, Chisadza C, Gupta R, Pierdzioch C. Climate shocks and wealth inequality in the UK: evidence from monthly data. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023; 30(31):7771-77783.
- Sterman J. *Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill. 2000.
- Szatten D, Habel M. Effects of land cover changes on sedimentand nutrient balance in the catchment with cascade-dammed waters. *Remote Sensing*. 2020; 12(20): 3414.

- Taconet N, Méjean A, Guivarch C. Influence of climate change impacts and mitigation costs on inequality between countries. *Climatic Change*, 2020; 160(1): 15-34.
- UNESCO, UN-Water. United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO.2020.
- Vargas R, Rodríguez S. Dinámica de poblaciones. Manejo de plagas en paltos y cítricos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Colección Libros INIA, 2008; 23(200):99-105.
- von Bertalanffy L. Untersuchungen über die Gesetzlichkeit des Wachstums. *Wilhelm Roux Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen*, 1934; 131(4):613-652.
- Watson-Hernández F, Chavarría-Pizarro L, Quesada-Alvarado F, Guzmán-Arias I. Determinación del caudal ambiental mediante una metodología hidrobiológica, considerando variables de cambio climático en el río Pejibaye, Cartago, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 2021; 34(4):118-129.
- Yunne-Jai S, Marie-Joëlle R, Simon JG, Field HG. Using size-based indicators to evaluate the ecosystem effects of fishing. *ICES Journal of Marine Science*, 2005; 62(3):384-396.
- Zhang L, Yuan B, Yin X, Zhao Y. The Influence of Channel Morphological Changes on Environmental Flow Requirements in Urban Rivers. *Agua*, 2019;11(9):1800.