

Un “mapa químico” revela los viajes secretos de los peces del Bermejo

Felipe Alonso¹, Esteban Avigliano², Alejo Irigoyen³, Gastón Trobbiani³, Juan José Rosso⁴, Gastón Aguilera⁵, Guillermo Terán⁵, Ming-Tsung Chung⁶, Mathieu Leisen⁷, Camille Duquenoy⁷, Ai-Lin Chen⁸, Kuo-Fang Huang⁸, Baltazar Bugeau⁵

¹Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO, UNSa - CONICET), Salta, Argentina. e-mail: felipealonso@gmail.com

²Instituto de Investigaciones en Producción Animal (INPA, UBA - CONICET), Buenos Aires, Argentina.

³Centro para el Estudio de Sistemas Marinos (CESIMAR-CONICET), Puerto Madryn, Argentina.

⁴Grupo de Biotaxonomía Morfológica y Molecular de Peces, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC, UNMDP - CONICET), Buenos Aires, Argentina.

⁵Unidad Ejecutora Lillo (CONICET)-Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

⁶National Taiwan University, Taipei, Taiwán.

⁷Géosciences Environnement Toulouse, CNRS-IRD-Université de Toulouse, Francia.

⁸Academia Sinica, Taipei, Taiwán.

La conservación y el manejo sostenible de los recursos pesqueros dependen de conocer con precisión cómo viven las especies en sus ambientes naturales (Figura 1). Cada especie de pez posee un ciclo vital complejo, con fases diferenciadas de alimentación, crecimiento y reproducción que muchas veces ocurren en ambientes distintos, a veces separados por cientos de kilómetros. Entender dónde se desarrollan esas etapas, cómo se conectan los hábitats y qué factores alteran esas conexiones es esencial para proteger las poblaciones y asegurar la sustentabilidad de las pesquerías.

Los peces migratorios añaden una dificultad particular: se desplazan entre regiones y países, cruzando límites políticos y ecológicos. En el sistema fluvial del Plata, estos movimientos sostienen tanto la biodiversidad como las economías regionales. Sin embargo, la expansión agrícola, la fragmentación por represas, el dragado de cauces, la contaminación y el cambio climático están modificando los flujos hídricos, el régimen térmico y las rutas de dispersión natural. La pérdida de conectividad entre montañas, llanuras y humedales representa hoy una de las mayores amenazas para los grandes peces migratorios sudamericanos.

Entre los protagonistas de estas migraciones se destacan el dorado (*Salminus brasiliensis*), predador tope carismático y símbolo de los ríos del Plata, y el sábalo (*Prochilodus lineatus*), detritívoro, es decir, que se alimenta de los restos orgánicos depositados en el fondo del río —como fragmentos de plantas, algas y materia en descomposición— clave en la cadena trófica y base económica de múltiples pesquerías. Ambas especies realizan desplazamientos que pueden superar los 1.000 km, sincronizados con los pulsos de crecida e inundación. En esos viajes, cada tramo del río cumple una función ecológica específica: las cabeceras y afluentes son sitios de refugio y reproducción, las

llanuras aluviales y bañados funcionan como guarderías naturales, y los grandes ríos principales son corredores donde los adultos se alimentan y dispersan.



Figura 1: El río Popayán serpentea en el bosque chaqueño de las sierras subandinas dentro del Parque Nacional El Rey, en la provincia de Salta. Sus aguas transparentes y frías descienden entre piedras y raíces, un refugio vital para los peces migratorios que remontan los ríos del noroeste argentino.

La cuenca del Plata: un sistema interconectado

La cuenca del Plata abarca más de tres millones de km² y atraviesa cinco países: Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay. Nace en las montañas andinas y en el Planalto brasileño, fluye a través de extensas planicies y desemboca en el Río de la Plata, un estuario de mezcla fluvial y marina. Su heterogeneidad geológica y climática genera una enorme diversidad de ambientes: torrentes serranos, ríos meandriformes, esteros, lagunas, pantanos, y humedales temporarios que funcionan como reservorios de biodiversidad y reguladores del ciclo hidrológico.

El dorado y el sábalo están distribuidos en casi toda la red hidrográfica de la cuenca del Plata, pero su biología migratoria se conoce principalmente a partir de estudios realizados en los grandes ríos Paraná y Paraguay. Hasta hace poco, se sabía muy poco sobre sus movimientos en los ríos del noroeste, donde las cabeceras nacen en los Andes y descienden atravesando las selvas de Yungas hasta alcanzar las planicies chaqueñas. En ese recorrido, los ríos atraviesan ambientes muy

contrastantes: desde cursos de montaña, con fondos rocosos, aguas claras, frías y bien oxigenadas, hasta llanuras de aguas turbias y fondos de sedimentos finos. En esta región, la marcada variación estacional del caudal genera pulsos de conectividad entre los ambientes de cabecera y los de llanura, a través de una red de ríos intermitentes.

El río Bermejo y sus afluentes

El río Bermejo, uno de los grandes tributarios del río Paraguay, nace en la vertiente oriental de los Andes y fluye hacia el este atravesando las provincias de Jujuy, Salta, Formosa y Chaco. Su régimen es marcadamente estacional: las lluvias veraniegas aumentan el caudal y generan extensas inundaciones; durante la estación seca, entre el otoño y la primavera, los caudales bajan drásticamente y numerosos brazos quedan aislados. Este pulso natural crea un mosaico de ambientes acuáticos temporales —lagunas, esteros y bañados— de enorme productividad biológica.

En el sector medio y bajo del Bermejo, el sistema **Río del Valle-Bermejito** (Figura 2) es un ejemplo de esa dinámica. Allí, el **Bañado del Quirquincho**, un humedal que puede alcanzar medio millón de hectáreas en años húmedos, actúa como sitio de desove y desarrollo larval de sábalos y otras especies migratorias. Durante las crecidas, las aguas del Bermejo y del Bermejito se conectan, permitiendo el ingreso y salida de peces. En la estación seca, el bañado se aísla y muchos individuos quedan atrapados, generando un ciclo natural de renovación y mortalidad.



Figura 2: Vista del río Dorado (afluyente del río Bermejito) bajo el puente de la Ruta Nacional 34, que atraviesa la planicie del Chaco semiárido donde sus aguas se tornan turbias.

Conectividad ecológica y amenazas

La conectividad entre estos ambientes —cabeceras, tramos medios y llanuras— sostiene el ciclo de vida de los peces. Pero esta conectividad se encuentra en riesgo. La deforestación y el cambio en el uso del suelo, la construcción de canales de drenaje, el represamiento de afluentes y la extracción intensiva de agua alteran la dinámica natural de las crecidas. A ello se suma la aridificación progresiva registrada en las últimas décadas: la precipitación anual promedio en esta zona se redujo de picos de más de 1.400 mm hace 30 años a menos de 700 mm en los últimos años. Este descenso limita la frecuencia y duración de las conexiones hídricas y, por ende, las oportunidades reproductivas de los migradores.

El presente estudio surge ante la necesidad de entender si los grandes peces del Bermejo siguen utilizando estos corredores altitudinales y qué papel juegan las áreas protegidas —como el **Parque Nacional El Rey**— en su conservación (Figura 3). Para ello se integraron herramientas de ecología, geología y química ambiental con el fin de reconstruir las rutas migratorias de dorados y sábalos y determinar el origen de los individuos capturados en distintos sectores del sistema fluvial.

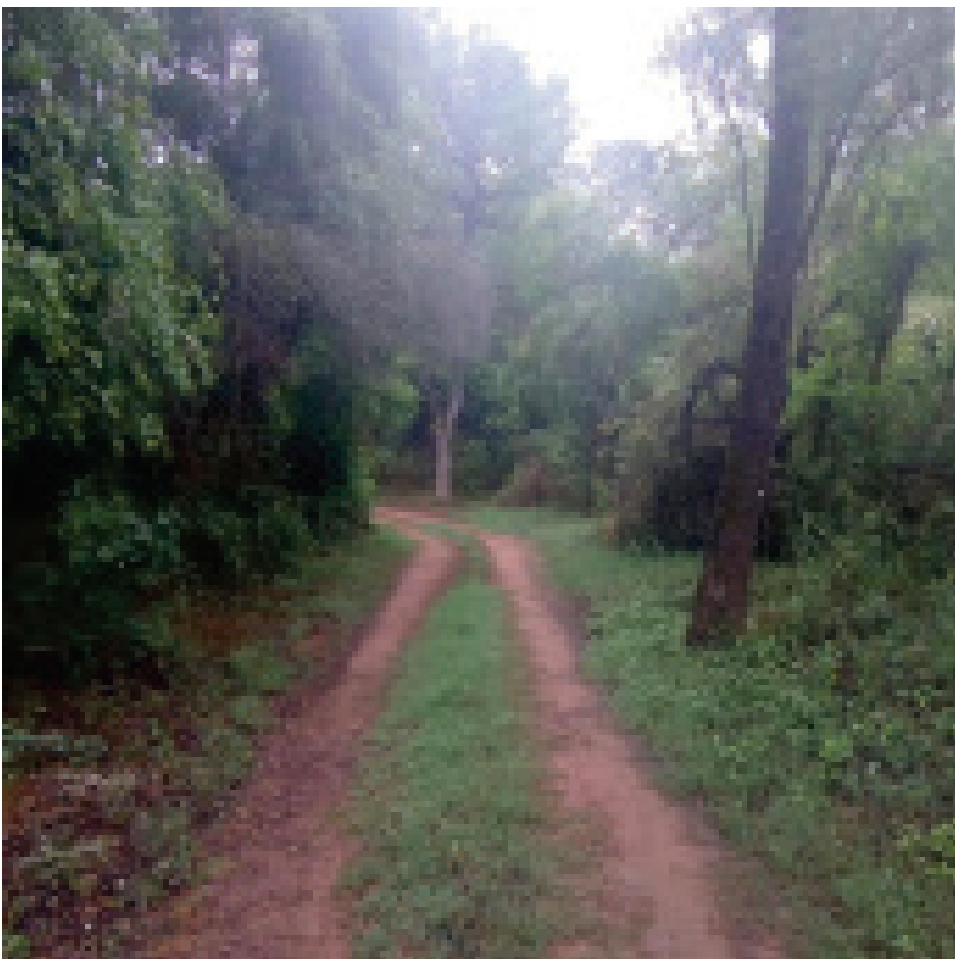


Figura 3. Vista de un camino interno del Parque Nacional El Rey que se abre paso entre la espesura del monte de Chaco serrano.

Marco conceptual: los otolitos como archivos biogeoquímicos

Los otolitos —estructuras calcáreas situadas en el oído interno de los peces— crecen anualmente acumulando capas de carbonato de calcio y elementos del ambiente. A diferencia de otras estructuras corporales, no se remodelan, por lo que cada capa conserva información química del agua donde vivió el pez. La relación entre diferentes isótopos de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) del agua está determinada por la geología local y difiere entre diferentes cuencas, incorporándose directamente en los otolitos a medida que estos crecen a lo largo de la vida, convirtiéndolos en auténticos “archivos geoquímicos”, como cajas negras que nos permiten reconstruir dónde estuvieron los peces en diferentes etapas de su vida.

Las variaciones espaciales del $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a lo largo de una cuenca reflejan la mezcla de aportes de rocas antiguas (con altos valores de ^{87}Sr) y jóvenes (con bajos valores). Cada tramo del río presenta, por tanto, una proporción isotópica única (“firma isotópica”). Si esa firma se conserva en el núcleo de un otolito, puede identificarse el lugar donde nació el individuo.

El uso de esta técnica —denominada microquímica de otolitos— ha revolucionado la comprensión de las migraciones en peces continentales y marinos. En la cuenca del Plata permitió demostrar desplazamientos superiores a 1.000 km en dorados y sábalos entre los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay. Sin embargo, nunca se había aplicado en el noroeste argentino, donde la heterogeneidad geológica y los gradientes altitudinales ofrecen una oportunidad excepcional para analizar conectividades entre montañas y llanuras.

Zona de estudio

El sistema Río del Valle–Bermejito se extiende entre las provincias de Salta y Chaco (Figura 4), atravesando una gradiente altitudinal de más de 1.500 metros. Las cabeceras nacen en las Yungas, sobre formaciones del Cretácico–Paleógeno (tiempo de la escala geológica que abarca entre 145 y 23 millones de años) compuestas por areniscas, limolitas, tobas y calizas. Al descender, el río atraviesa depósitos aluviales del Neógeno (entre 23 y 2,5 millones de años) y finalmente penetra en la llanura chaqueña, caracterizada por sedimentos arcillosos y suelos con elevada salinidad. Esta transición geológica genera contrastes marcados en la composición iónica del agua y, por ende, en la proporción de isótopos de estroncio.

Durante las campañas de campo se muestrearon ocho sitios representativos: Popayán, Morenillo, Dorado, Tortugas, Río del Valle medio y bajo, y Bermejito (Figura 4). Los puntos fueron seleccionados

de acuerdo con accesibilidad, representatividad geológica y presencia de peces migratorios.

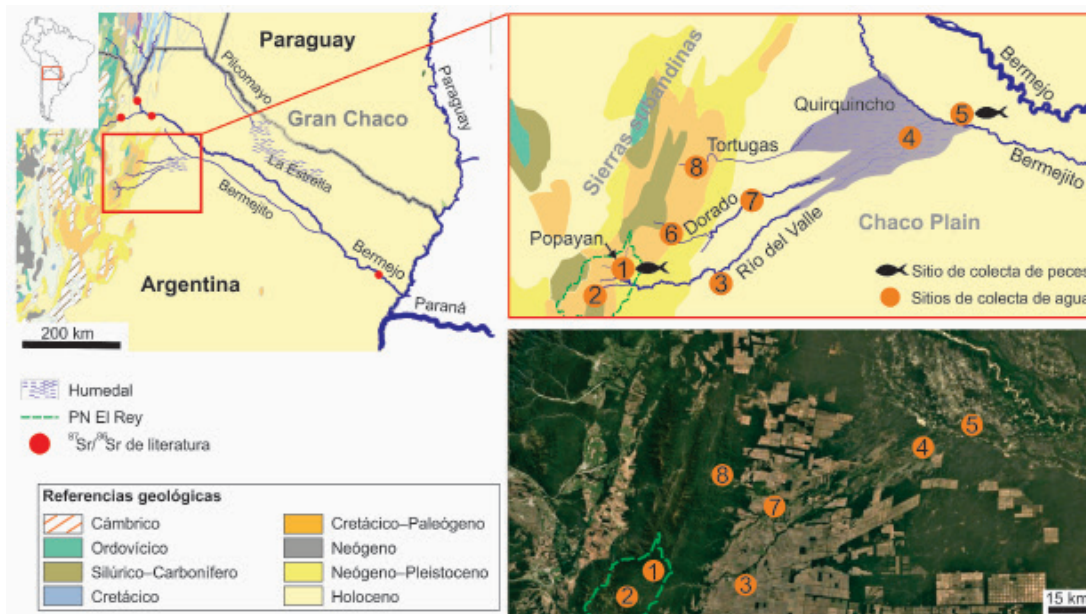


Figura 4. Mapa de la cuenca del río Bermejo. Se observan las formaciones geológicas que atraviesa desde las montañas hasta el llano y los sitios de muestreo señalados con números. Cada punto representa una historia de agua, roca y vida entrelazadas.

Entre octubre de 2022 y octubre de 2023 se realizaron capturas en distintos puntos de la cuenca, abarcando tanto la estación seca como la húmeda. Se obtuvieron 20 sábalos y 18 dorados en ríos de montaña, y 14 sábalos adicionales en el Bermejito. Las técnicas empleadas incluyeron pesca con

mosca, señuelos y redes de arrastre (Figura 5), bajo permisos de la Administración de Parques Nacionales y la Secretaría de Ambiente de Salta. Por normativa, solo se permitió el sacrificio de hasta 15 ejemplares por especie y campaña. En el campo se extrajeron los otolitos, se limpiaron con agua destilada y se guardaron en tubos rotulados para su análisis posterior.



Figura 5: Jornada de colecta en el río Dorado. Los investigadores avanzan entre aguas marrones y corrientes fuertes, midiendo la química del río y obteniendo muestras que revelarán los secretos migratorios de dorados y sábalos.

Los registros del Sistema Nacional de Información Hídrica evidenciaron una fuerte estacionalidad: las lluvias superan los 200 mm mensuales en enero y febrero, y caen a menos de 5 mm en invierno. Por ejemplo, el nivel medio del río San Francisco, uno de los principales afluentes del río Bermejo en esta zona, varía entre 4 m en la época húmeda en verano y 1,7 m en la seca en invierno. En los últimos treinta años la precipitación anual se redujo de unos 1430 a menos de 700 mm, un claro signo de aridificación que altera las inundaciones naturales y la conectividad de los ambientes acuáticos.

La conductividad eléctrica del agua, que indica su capacidad para conducir corriente eléctrica, depende de la cantidad de sales disueltas, como cloruros, sulfatos y carbonatos. Cuanto mayor es la concentración de estos iones, mayor es la conductividad. En los ríos estudiados, este valor aumentó progresivamente desde las montañas hacia el llano, reflejando el enriquecimiento natural en sales típico del clima semiárido y los efectos de la evaporación estacional. En paralelo, los análisis isotópicos de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) mostraron valores más altos en las cabeceras —como en los ríos Popayán y Morenillo— y menores hacia el Bermejito, donde las lluvias abundantes tienden a homogeneizar la señal química del agua. Estas variaciones, aunque sutiles, son suficientes para diferenciar regiones y rastrear los desplazamientos de los peces a lo largo de su recorrido entre la montaña y la llanura.

Los otolitos como relojes del tiempo

Además de revelar las rutas migratorias, los otolitos también permiten conocer la edad de los peces. Estos pequeños cristales de carbonato de calcio, ubicados en el oído interno, crecen de manera continua a lo largo de la vida del animal y van depositando capas sucesivas, como los anillos de un árbol. En regiones como el norte argentino, las variaciones estacionales de temperatura y alimentación generan períodos de crecimiento rápido y lento. Durante el verano, las aguas cálidas y la mayor disponibilidad de alimento favorecen el crecimiento del pez, lo que produce una banda clara y ancha en el otolito. En cambio, durante el invierno, el descenso de la temperatura reduce el metabolismo y la actividad alimentaria, haciendo que el crecimiento disminuya y se forme una banda más densa y fina. La alternancia entre estas bandas a lo largo del tiempo permite estimar la edad del individuo en años, ya que cada par de bandas corresponde a un ciclo anual.

Resultados

Los sábalos del Popayán mostraron once clases de edad, entre 1990 y 2019, con mayor frecuencia en 2005 y 2016. En el Bermejito se reconocieron tres cohortes principales (2013, 2014 y 2017). Los dorados presentaron edades entre 2 y 12 años, con un máximo en 2014 (Figura 6). El hallazgo más notable fue un sábalo de 33 años, mucho más longevo que el máximo registrado para la especie en

el Paraná (25 años), lo que sugiere baja mortalidad y la existencia de refugios donde los ejemplares mayores persisten durante décadas.

Los resultados isotópicos definieron tres grupos según el origen natal reflejado en los otolitos. Los sábalos del Bermejito mostraron señales locales; dorados y sábalos del Popayán, valores compatibles con sectores bajos del río del Valle, lo que indica migraciones río arriba; y un tercer grupo, con señales intermedias, provenía de zonas de transición. Algunos peces mostraron perfiles estables, propios de residentes, mientras que otros presentaron cambios bruscos, señal de migraciones altitudinales o laterales. Un caso excepcional fue el de un sábalo cuyo perfil coincidía con aguas del Bermejo principal, a más de 300 kilómetros del sitio de captura, evidencia de conexiones hidrológicas intermitentes que permiten desplazamientos a gran escala.



Figura 6: Izquierda: Sábalo y dorado nadan en las aguas transparentes del río Popayán, dentro del Parque Nacional El Rey. Derecha: Un sábalo en primer plano domina la escena, mientras al fondo, a la derecha, un dorado se aproxima con sigilo. La imagen resume un instante de tensión y equilibrio entre presa y depredador en las aguas de montaña.

En los dorados (Figura 7) se observaron patrones mixtos: algunos permanecieron en las cabeceras y otros alternaron entre tramos altos y medios. En varios casos, sus movimientos coincidieron con los pulsos de lluvia y el aumento del caudal, lo que sugiere un control estacional del comportamiento.



Figura 7: El investigador Alejo Irigoyen sostiene un dorado recién capturado en el río Popayán. Cada ejemplar será medido, sexado y se colectarán muestras de otolitos y tejidos.

En conjunto, los datos de conductividad, isótopos y edad (Figura 8) muestran que el sistema Río del Valle–Bermejito funciona como un corredor ecológico activo. Durante la estación húmeda los peces migran río arriba para reproducirse y dispersarse, mientras que en la seca se refugian en pozones y lagunas remanentes. Las áreas protegidas de montaña, como el Parque Nacional El Rey, permiten la supervivencia de las clases adultas y longevas, y los humedales del Chaco actúan como zonas de cría y alimentación juvenil, completando un ciclo que enlaza las montañas con las llanuras del norte argentino.



Figura 8. Toma de muestras y análisis de los ejemplares obtenidos. Los otolitos —pequeñas estructuras del oído interno— son extraídos cuidadosamente: en ellos quedará grabada la historia química de cada pez.

Conectividad ecológica a escala de paisaje

Los resultados (Figura 9) muestran que el sistema Yungas–Chaco, lejos de ser un mosaico de ambientes aislados, constituye un continuo ecológico donde las fluctuaciones hidrológicas determinan los patrones de conectividad. El gradiente isotópico del estroncio revela que tanto el dorado como el sábalo se desplazan a lo largo de ese continuo, aprovechando los pulsos de crecida para colonizar nuevas áreas y mantener el flujo genético entre poblaciones. Estos movimientos altitudinales —inusuales en peces fluviales sudamericanos— amplían el concepto de migración en la cuenca del Plata, tradicionalmente centrado en desplazamientos longitudinales (aguas arriba–aguas abajo).

En ambientes tan dinámicos, la conectividad no es constante: se activa y desactiva de manera pulsátil. Durante los años lluviosos, los ríos de montaña se enlazan con los humedales chaqueños, generando corredores temporales que los peces explotan para reproducirse. En años secos, esos corredores se interrumpen, forzando a las poblaciones a adoptar estrategias alternativas, como la

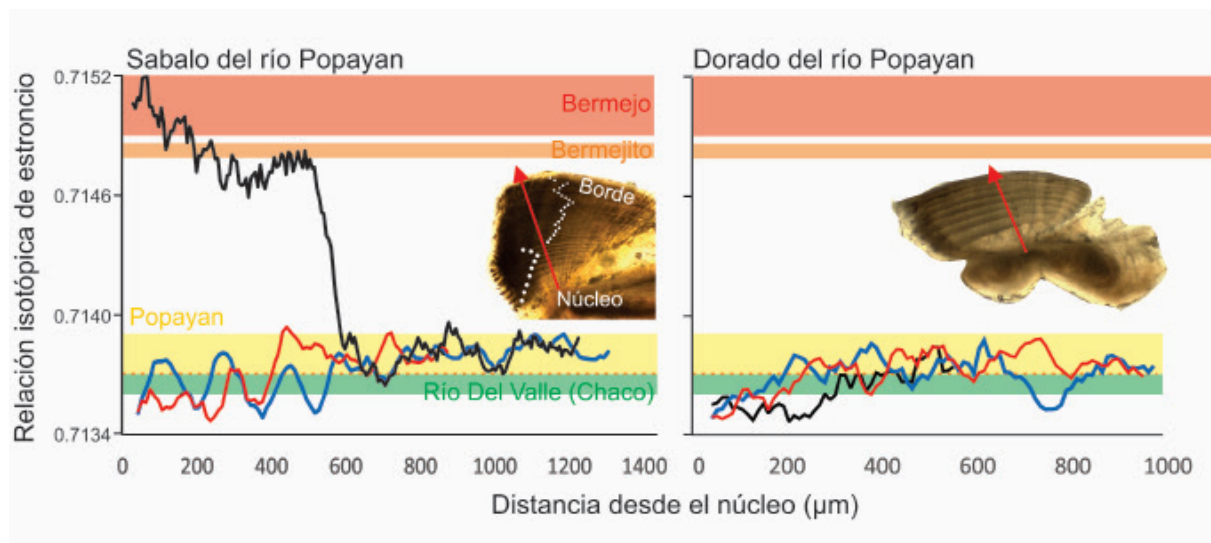


Figura 9: Gráfico que muestra la relación isotópica del estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) obtenida de distintos otolitos. Cada línea representa una ruta migratoria de un individuo diferente, un mapa invisible trazado por los propios peces a lo largo de su vida

residencia o el uso de refugios permanentes en pozas profundas. Esta plasticidad ecológica es una forma de resiliencia biológica frente a la variabilidad climática, pero tiene un límite: si la frecuencia de conexiones se reduce por causas antrópicas, la estructura metapoblacional puede colapsar.

El rol de los refugios de montaña

El hallazgo de individuos longevos en el Parque Nacional El Rey indica que las áreas protegidas de montaña actúan como verdaderos refugios poblacionales. En estos ambientes la pesca está prohibida, la calidad del agua se mantiene alta y la vegetación ribereña ayuda a regular la temperatura y el aporte de nutrientes. En un estudio previo (Irigoyen et al., 2023) se observó que dentro del parque las poblaciones de sábalos y dorados son más abundantes y los ejemplares alcanzan mayores tamaños. Los otolitos de estos peces muestran una señal isotópica estable durante varios años, coherente con una permanencia prolongada en el mismo ambiente. Es probable que estos adultos reproductores contribuyan periódicamente con nuevos individuos a las poblaciones del llano, cuando las lluvias intensas arrastran sus larvas y juveniles río abajo.

La presencia de sábalos de más de tres décadas obliga a reconsiderar los modelos de dinámica poblacional de la especie. Las tasas de mortalidad natural empleadas en las evaluaciones pesqueras del Paraná podrían estar subestimadas para las poblaciones de montaña. Esto tiene implicancias directas sobre la estimación del rendimiento máximo sostenible: si los individuos viven más tiempo y alcanzan la madurez sexual más tarde, las estrategias de manejo deben ajustarse para evitar la sobrepesca.

Diversidad de estrategias de vida

El análisis combinado de edades e isótopos mostró que, dentro de una misma especie, los peces presentan distintas estrategias de vida. Algunos son migradores unidireccionales, que se desplazan hacia las zonas altas del río durante el período reproductivo y mueren tras el desove. Otros son migradores bidireccionales, alternando entre montaña y llano en distintos momentos del año. También hay individuos residentes, que permanecen todo su ciclo vital en un mismo tramo del río, y otros que realizan desplazamientos ocasionales más allá del rango habitual de la especie.

Esta diversidad de comportamientos migratorios contribuye a la estabilidad de las poblaciones, ya que distintas formas de uso del ambiente responden de manera diferente a las fluctuaciones del caudal, la temperatura o la disponibilidad de hábitats. Cuando las condiciones modifican o restringen una de las estrategias, otras pueden seguir operando, manteniendo la continuidad demográfica.

Este patrón se vincula con el concepto ecológico de bet-hedging, o “apuesta diversificada”, que describe cómo la variación individual dentro de una población reduce el riesgo ante ambientes impredecibles. En este caso, la coexistencia de migradores, residentes y móviles de corto alcance distribuye la exposición a perturbaciones ambientales —como sequías o crecidas intensas—, favoreciendo la persistencia del conjunto poblacional.

Geoquímica y biología evolutiva

El gradiente isotópico $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, al reflejar la geología del territorio, se convierte también en una herramienta para comprender los procesos evolutivos y adaptativos de estas especies. Los dorados que habitan ríos con aguas más mineralizadas presentan otolitos de mayor densidad y anillos de crecimiento más espaciados, posiblemente como respuesta fisiológica a ambientes más duros. En cambio, los sábalos de montaña muestran otolitos menos densos, coherentes con aguas más frías y tasas metabólicas reducidas. Estas diferencias, aunque sutiles, ilustran cómo geología, fisiología y ecología interactúan en la configuración evolutiva de las poblaciones.

Interacciones entre peces y paisaje

En la cuenca alta del Bermejo se observa una estrecha relación entre los procesos físicos del paisaje y la ecología de los peces que la habitan. Los aportes de sedimentos provenientes de las Yungas determinan la turbidez del agua y, con ella, la eficiencia visual de los predadores como el dorado (*Salminus brasiliensis*). En condiciones de aguas claras pueden detectar a sus presas a distancia, y las mismas también pueden detectarlos de lejos, lo que podría favorecer diferentes estrategias de

depredación en diferentes contextos de turbidez, como cazar en grupos y acorrallar a las presas en aguas claras mientras que, en ambientes turbios, pueden priorizar estrategias de caza por emboscada a menor distancia. El sábalo (*Prochilodus lineatus*), en cambio, basa principalmente su dieta en detritos —restos de materia vegetal y animal en descomposición— y en biofilm, una capa delgada formada por algas, bacterias y microinvertebrados que se adhieren a los fondos y piedras sumergidas. Este material constituye una importante fuente de energía en los ecosistemas fluviales.

De esta manera, los pulsos naturales de erosión, transporte y sedimentación no solo modifican el paisaje, sino que también influyen en la estructura y composición de las comunidades de peces, integrando procesos geológicos e hidrológicos con la dinámica ecológica del sistema.

Implicancias ecológicas y de conservación

Los resultados muestran que las fronteras administrativas carecen de significado para los peces: sus rutas migratorias cruzan provincias e incluso países. La conservación del dorado (*Salminus brasiliensis*) y del sábalo (*Prochilodus lineatus*) requiere, por lo tanto, políticas de manejo a escala de cuenca y no basadas en jurisdicciones aisladas. La coordinación binacional entre Argentina y Bolivia, e interprovincial dentro del país, es esencial. Iniciativas como el Programa Bermejo-Chaco podrían incorporar estos resultados para diseñar corredores biológicos acuáticos que integren conocimiento científico y gestión ambiental.

Los humedales temporarios del Chaco, como el Bañado del Quirquincho, cumplen un papel fundamental como zonas de cría y alimentación juvenil. Su degradación por drenaje agrícola o ganadero interrumpe el ciclo vital de los peces migradores. Restaurar la conectividad entre cauces y bañados mediante la protección de corredores hídricos y la regulación de pequeñas represas podría mejorar significativamente el éxito reproductivo anual. En este contexto, los mosaicos de conservación —que combinan áreas protegidas públicas y privadas— representan una estrategia viable y eficaz.

La disminución de las lluvias y el aumento de la temperatura reducen los flujos hídricos y la frecuencia de los pulsos de inundación, afectando la conexión entre la montaña y la llanura. Los resultados isotópicos sugieren que, bajo escenarios más secos, los individuos residentes en las cabeceras podrían volverse más comunes, aumentando el riesgo de aislamiento genético. Para mitigar este efecto, se recomienda conservar los tramos medios del río como zonas de amortiguamiento que mantengan la conectividad incluso en años de sequía.

El reconocimiento de longevidades extremas y migraciones altitudinales tiene implicancias directas en la gestión pesquera. Las vedas deberían ajustarse a los pulsos hidrológicos locales, ya que la captura de grandes reproductores longevos puede afectar desproporcionadamente la población. Incorporar la información isotópica en la trazabilidad de los productos pesqueros permitiría verificar el origen de las capturas y asegurar que provengan de sectores no reproductivos, favoreciendo la sostenibilidad del recurso.

La creación de un programa de monitoreo permanente, que combine muestreos de agua, análisis isotópicos y registros de captura, permitiría seguir los cambios en las rutas migratorias a lo largo del tiempo. Las comunidades locales, pescadores y guardaparques podrían participar recolectando otolitos o muestras de agua bajo protocolos estandarizados. Este enfoque de ciencia ciudadana fortalecería el vínculo entre conocimiento científico y manejo ambiental, aportando datos valiosos y fomentando la conciencia sobre la conservación de los ecosistemas fluviales.

La tendencia hacia una menor precipitación y una mayor aridez podría fragmentar los corredores migratorios y aislar las poblaciones. En ese escenario, las estrategias residentes, limitadas a los tramos de montaña, podrían predominar a costa de la pérdida de flujo genético y diversidad funcional. Los registros isotópicos actuales, que reflejan una conectividad todavía activa, evidencian un sistema ecológico en equilibrio frágil. Conservarlo implica proteger tanto las cabeceras como los valles y humedales donde las aguas de montaña alcanzan el llano.

Aunque el estudio se centra en el sistema Río del Valle–Bermejito, sus implicancias se extienden a toda la cuenca del Plata. Las metodologías empleadas —microquímica de otolitos y mapeo isotópico del agua— pueden aplicarse en otros tributarios como los ríos Pilcomayo, Juramento o Salí–Dulce, donde aún se desconoce la estructura migratoria de las poblaciones. Cada nuevo mapa isotópico permitirá avanzar hacia una cartografía biogeoquímica del sistema del Plata, reconstruyendo las rutas de los peces a través del paisaje.

Este trabajo integra geoquímica, biología y conservación, y muestra el valor del enfoque interdisciplinario para comprender los sistemas fluviales. Los análisis isotópicos, una herramienta derivada de la geología, se aplican aquí al estudio de la vida, uniendo las ciencias físicas y biológicas. La colaboración entre instituciones argentinas, francesas y taiwanesas resalta la dimensión global de los procesos locales y su relevancia frente al cambio ambiental.

Los otolitos del sábalo y del dorado son, en definitiva, pequeñas “piedras” que guardan la memoria del río. Cada capa acumulada cuenta una historia de desplazamientos, sequías, inundaciones y supervivencia. En ellas se leen las huellas del tiempo, la geología y la vida entrelazadas.

El estudio del sistema Bermejo demuestra que la ciencia puede hacer visible lo invisible: los viajes silenciosos bajo el agua, las conexiones que sostienen ecosistemas enteros y los vínculos ocultos entre las montañas y el mar.

Proteger esos ríos no es solo una tarea de biólogos o conservacionistas: es una responsabilidad compartida, porque en sus aguas viajan también las historias y los futuros posibles de las comunidades humanas que dependen de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Fundación Williams y CONICET. Agradecemos especialmente a Pachamama Fly Fishing Lodge (Barazzuol Fascio), Méndez-López, Cortés Hernández, Elías, Mateo y Farías por su apoyo durante el trabajo de campo. A la Administración de Parques Nacionales, y a los guardaparques del Parque Nacional El Rey por su invaluable colaboración durante las campañas. A la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Provincia de Salta, particularmente a Bonduri y Musalem, y al guardaparque Luna del Parque Provincial Los Palmares. Al IBIGEO, INPA-CONICET-UBA y a la Fundación Miguel Lillo por su constante apoyo y a todos los miembros de la Killifish Foundation.

CITA DEL ARTÍCULO ORIGINAL

AVIGLIANO E, M-T CHUNG, M LEISEN, G AGUILERA, A IRIGOYEN, G TROBBIANI, G TERÁN, B BUGEAU, JJ ROSSO, C DUQUENOY, A-L CHEN, K-F HUANG, F ALONSO. 2025. Fish migration patterns in semi-isolated and seasonally variable freshwater systems from the Yungas Forest to the Chaco Plain (South America). River Research and Applications. <https://doi.org/10.1002/rra.70067>

LITERATURA RECOMENDADA

IRIGOYEN AJ, G TROBBIANI, AM DE WYSIECKI, G AGUILERA, G TERÁN, BH BUGEAU, ... F ALONSO. 2023. Efecto del Parque Nacional El Rey y de una crecida sobre peces de interés pesquero en un río subandino del noroeste de la Argentina. *Ecología Austral*, 33(3): 909-922. <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.3.0.2168>