

INTRODUCCIÓN

La conectividad ecológica de las áreas protegidas es fundamental para mantener procesos ecológicos y la viabilidad de las poblaciones de fauna silvestre, especialmente en países megadiversos como Perú. La fragmentación del hábitat y el aislamiento de las áreas naturales pueden conducir a la pérdida de biodiversidad, endogamia y menor resiliencia de los ecosistemas (Saura et al. 2020). En respuesta a estos desafíos, se han desarrollado indicadores de conectividad como ProtConn (Protected Connected), que cuantifica el porcentaje de una región (país o ecorregión) cubierto por tierras protegidas y conectadas entre sí (Castillo et al. 2020). Estudios globales recientes revelan brechas importantes: hacia 2016 solo ~7,5% de la superficie terrestre mundial estaba efectivamente protegida y conectada (Saura et al. 2018). En consecuencia, muchas ecorregiones aún están lejos de cumplir las metas internacionales de conectividad (e.g., Aichi Target 11 de 17%). En el contexto del nuevo Marco Global de Biodiversidad Kunming-Montreal, la Meta 3 refuerza esta prioridad, estableciendo que al 2030 al menos 30% de las áreas terrestres del planeta estén conservadas mediante sistemas de áreas protegidas bien conectadas y efectivamente manejadas. Ante este marco, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál es el estado de la conectividad ecológica de las áreas protegidas en las distintas ecorregiones del Perú, según el indicador ProtConn, y cuáles son las brechas respecto a las metas globales? La presente investigación aborda esta cuestión, ofreciendo un análisis cuantitativo de la conectividad en cada ecorregión peruana y discutiendo sus implicaciones para la conservación.

METODOLOGIA

Área de estudio: Se analizaron las ecorregiones del Perú, enfocándose en aquellas de ecosistemas boscosos y alto valor biodiverso (e.g., Yungas, bosques húmedos amazónicos, bosques secos de Tumbes-Piura, várzeas amazónicas). Cada ecorregión se consideró como unidad de análisis espacial para calcular la conectividad de su red de áreas protegidas. Se utilizaron datos geospaciales oficiales de áreas protegidas del Perú (sistema nacional y áreas subnacionales reconocidas) y un shapefile de ecorregiones boscosas de Perú para delimitar el ámbito de cada cálculo.

Índice de conectividad: Se empleó el indicador ProtConn (Protected Connected) por ser un métrico integrador de cobertura y conectividad de áreas protegidas. ProtConn expresa el porcentaje del territorio de la ecorregión que está cubierto por tierras simultáneamente protegidas y conectadas funcionalmente (vía corredores dentro de un umbral de distancia). Este índice fue elegido por su uso en evaluaciones globales previas (Saura et al. 2017, 2018) y su alineamiento con las metas de conectividad ecológica. Además, ProtConn se descompone en fracciones que permiten distinguir la contribución de conexiones totalmente dentro de áreas protegidas versus las que requieren atravesar zonas no protegidas (matriz). Esto ofrece una visión más detallada de los tipos de conectividad (p. ej., ProtConn_Prot: conectividad intra-AP, ProtConn_Trans: conectividad a través de la matriz).

Herramientas y parámetros: El cálculo de ProtConn por ecorregión se realizó con la función MK_ProtConn del paquete Makurhini (versión R), la cual permite especificar distancias de dispersión y considerar efectos de borde. Se asumió una distancia de dispersión de 10 km (valor comúnmente utilizado para vertebrados terrestres medianos) como umbral para considerar dos áreas protegidas “conectadas”. Es decir, se considera conexión si las áreas están separadas por ≤ 10 km de terreno no protegido. Se usó el modo “tipo=edge” con keep = 0.1, permitiendo rutas que salen

parcialmente (10%) de las APs antes de reingresar, y se fijó un parámetro de probabilidad = 0.5 y distancia de transboundary = 50 km para contabilizar posibles conexiones transfronterizas significativas. Todos los cálculos se realizaron en proyección UTM 18S (EPSG:32718) para mayor precisión en distancias.

Primero, se evaluó cada ecorregión por separado con MK_ProtConn para obtener ProtConn individual y sus componentes. Luego, se aplicó MK_ProtConnMult a todas las ecorregiones en conjunto para verificar resultados globales y consistencia (aunque esta función se orienta a regiones múltiples, aquí sirvió para consolidar métricas en una sola tabla). Se obtuvo así, para cada ecorregión, el valor de ProtConn (%) y sus fracciones (porcentaje del territorio ecorregional conectado dentro de APs, a través de la matriz, porcentaje no protegido, etc.). Los resultados se organizaron en tablas y mapas. No se incluyó ningún código en el informe, pero en el material anexo se provee el script R completo y comentado empleado para reproducir el análisis.

RESULTADOS

Cobertura y conectividad por ecorregión:

Los valores obtenidos de ProtConn evidencian diferencias marcadas entre ecorregiones (Tabla 1). Ecorregiones amazónicas extensas como Napo moist forests y Solimões-Japurá moist forests presentaron los mayores porcentajes de territorio protegido y conectado (ProtConn \approx 35.6% y 28.4% respectivamente), reflejando la existencia de grandes bloques continuos de áreas protegidas interconectadas en la Amazonía norte. En Napo, aproximadamente el 84.6% de las tierras protegidas están bien conectadas entre sí (RelConn = 84.6%), lo cual sugiere una red de APs relativamente cohesiva. Caso contrario ocurrió en ecorregiones andinas o costeras. Por ejemplo, Marañón dry forests (bosque seco interandino) mostró ProtConn de solo 4.1%, aunque con una RelConn de 73.3% – indicando que si bien la cobertura protegida es baja (\approx 5.6% del área), gran parte de esa superficie protegida constituye un bloque conectado (posiblemente un solo parque). Tumbes-Piura dry forests (bosques secos del noroeste) tuvo ProtConn = 7.65%, con RelConn \approx 59%, evidenciando cierta fragmentación: aunque aprox. el 12.9% de la ecorregión está protegida, casi 41% de esa superficie protegida permanece aislada (no conectada con otras APs). Ecorregiones montañas húmedas como Eastern Cordillera Real y Peruvian Yungas presentaron ProtConn bajos (5.38% y 9.33% respectivamente) y también RelConn moderados (\leq 54%), sugiriendo que además de escasa superficie protegida, las áreas existentes están parcialmente desconectadas (probablemente separadas por valles intervenidos o carreteras andinas). Un caso notable es Bolivian Yungas (selvas yungueñas en el extremo sureste peruano): ProtConn = 27.4% y RelConn = 100%, lo que indica que la totalidad de la superficie protegida en esta ecorregión forma un bloque único conectado (es decir, todas sus APs están contiguas o a distancia \leq 10 km entre sí). Esto coincide con la presencia del gran Parque Nacional Bahuaja Sonene y áreas adyacentes, que generan un núcleo protegido continuo. Por otro lado, Purus várzea, con ProtConn = 7.0%, presentó RelConn no calculable (NA) porque virtualmente el 100% de su área protegida corresponde a un solo bloque aislado (toda el área protegida está conectada internamente, pero no hay otras APs cercanas para conectarse).

Tabla 1. Resumen de métricas de conectividad por ecorregión en el Perú. Se muestra el porcentaje de cada ecorregión bajo protección (**PA %**), el porcentaje protegido y conectado (ProtConn), y la conectividad relativa de la red de APs (RelConn = ProtConn/PA %, en %). Ecorregiones ordenadas de mayor a menor ProtConn.

Ecorregión	PA % (cobertura)	ProtConn (%)	RelConn (%)
Napo moist forests	42.1	35.6	84.6
Solimões-Japurá moist forests	28.5	28.4	99.7
Bolivian Yungas	27.4	27.4	100.0
Iquitos várzea	29.9	28.6	95.8
Southwest Amazon moist forests	30.3	25.2	83.0
Peruvian Yungas	17.3	9.3	53.9
Eastern Cordillera Real montane forests	11.2	5.4	47.9
Tumbes-Piura dry forests	12.9	7.7	59.3
Purus várzea	7.0	7.0	100.0*
Marañón dry forests	5.6	4.1	73.3

*En Purus várzea, la red consta de una sola área protegida grande; ProtConn = PA %, por lo que RelConn no es aplicable (todas las tierras protegidas están conectadas por definición, al no haber más áreas).

Mapas de contribución a la conectividad:

Se generaron mapas para visualizar la aportación individual de cada área protegida a la conectividad de su ecorregión, mediante el cálculo de $\Delta\text{ProtConn}$ (o $d\text{Prot}$, incremento de ProtConn aportado por cada área). En la **Figura 1** se ejemplifica la ecorregión **Marañón dry forests**, donde se identifican las pocas áreas protegidas existentes y su influencia en la conectividad regional. Las áreas están coloreadas según su $d\text{Prot}$ (intervalos Jenks): tonalidades más cálidas indican mayor aporte a ProtConn al formar enlaces cruciales. En ecorregiones con mayor cobertura, como Napo, los mapas (**Figura 2**) revelaron un mosaico más equilibrado: varias áreas grandes comparten la conectividad total, aunque generalmente una reserva núcleo (ej. Pacaya Samiria) domina el indicador. Estos mapas resaltan visualmente qué parques o reservas actúan como “pilares” de la conectividad ecológica en cada paisaje regional, información valiosa para priorizar acciones de manejo.

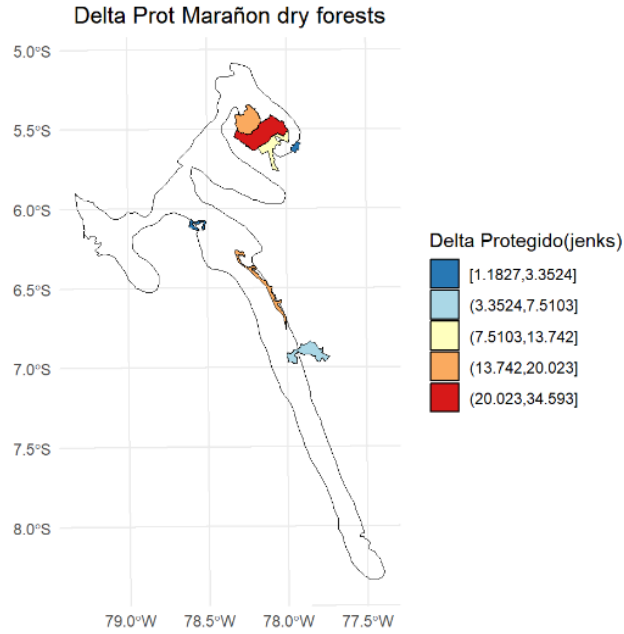


Figura 1. Mapa de la ecorregión Marañón dry forests mostrando la contribución de cada área protegida a la conectividad ($\Delta\text{ProtConn}$). Los colores van del azul (baja contribución) al rojo (alta contribución) según quintiles de $d\text{Prot}$. Se aprecia que solo uno o dos espacios protegidos grandes (en rojo) sostienen la mayor parte de la conectividad de esta ecorregión fragmentada. Las áreas en azul, de tamaño muy reducido o distantes, prácticamente no incrementan ProtConn regional.

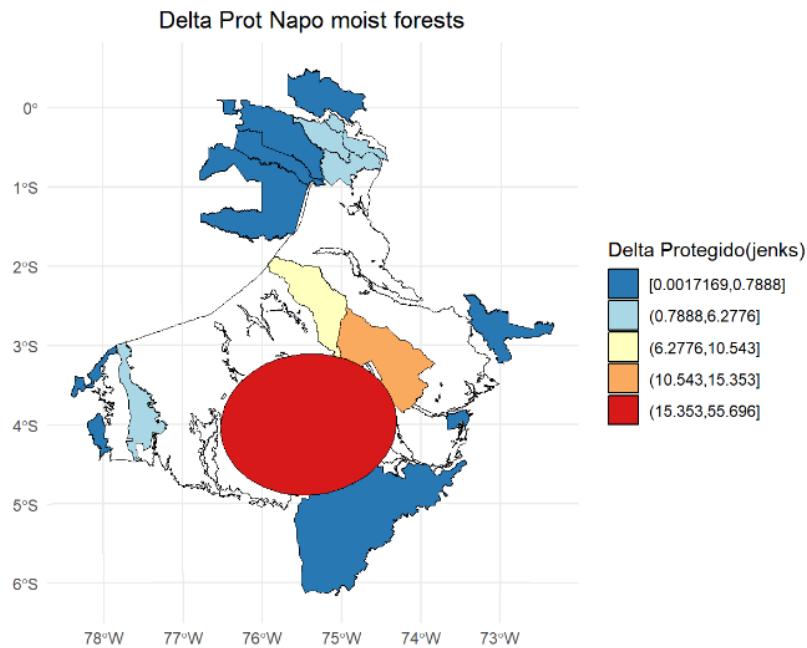


Figura 2. Mapa de la ecorregión Napo moist forests

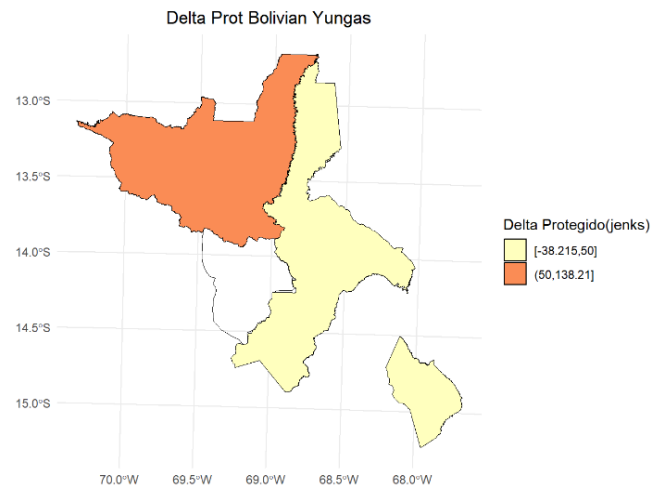


Figura 3. Mapa de la ecorregión Bolivian Yungas

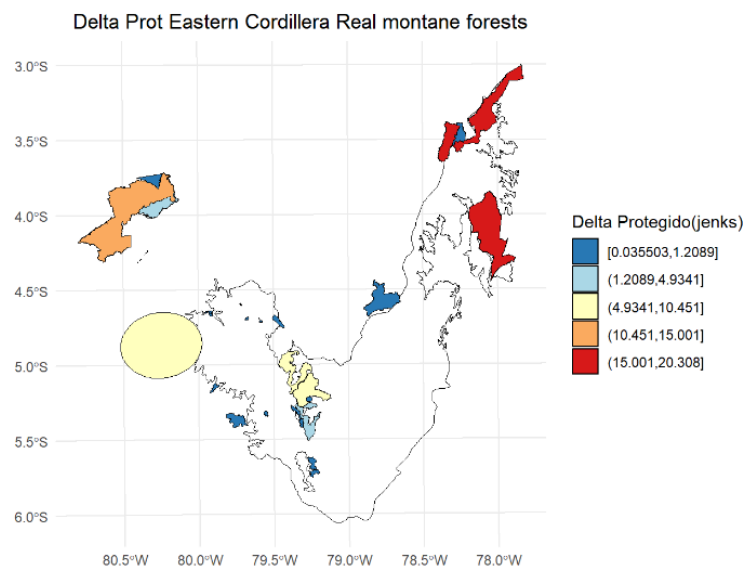


Figura 4. Mapa de la ecorregión Eastern Cordillera Real montane forests

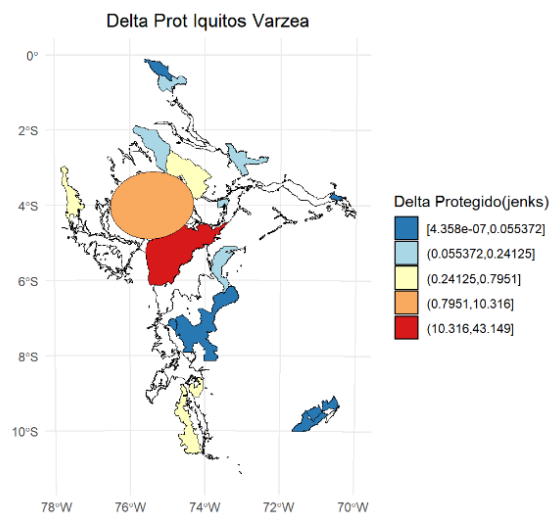


Figura 5. Mapa de la ecorregión Iquitos Varzea

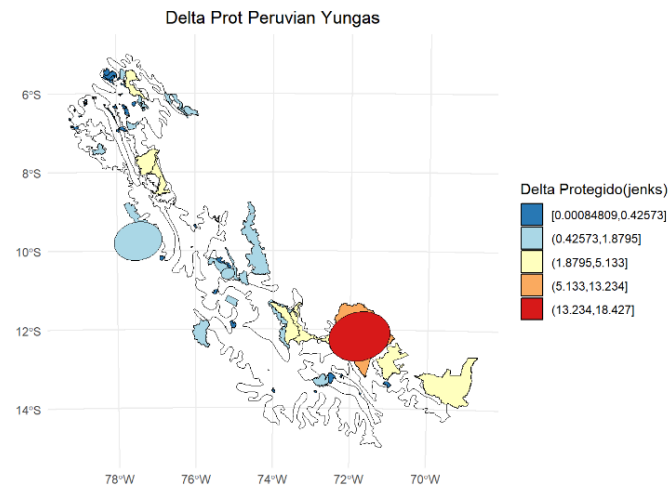


Figura 6. Mapa de la ecorregión Peruvian Yungas

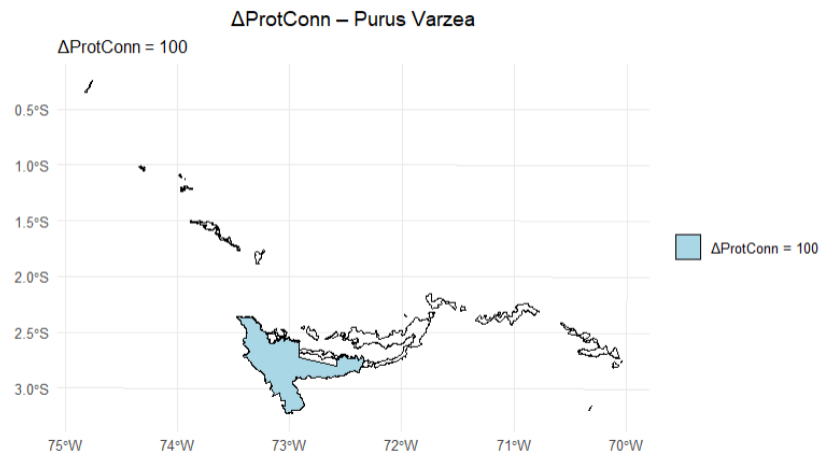


Figura 7. Mapa de la ecorregión Purus Varzea

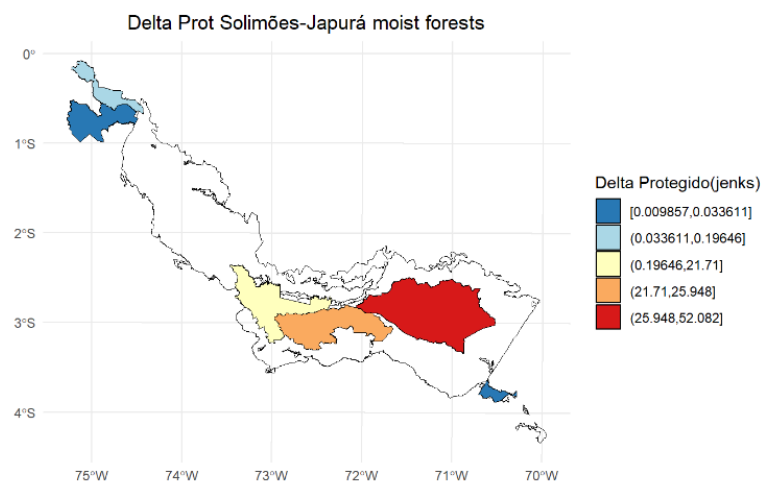


Figura 8. Mapa de la ecorregión Solimões-Japurá moist forests

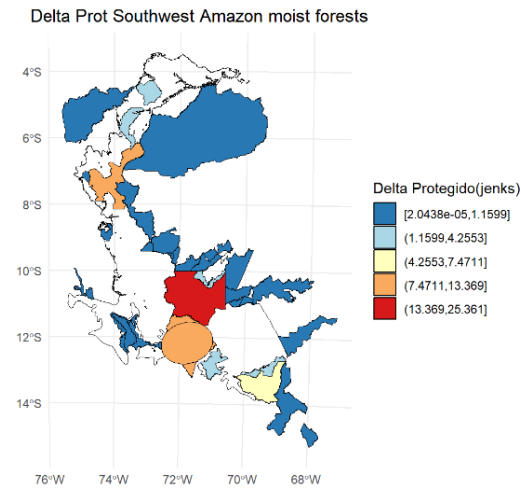


Figura 9. Mapa de la ecorregión Solimões-Japurá moist forests

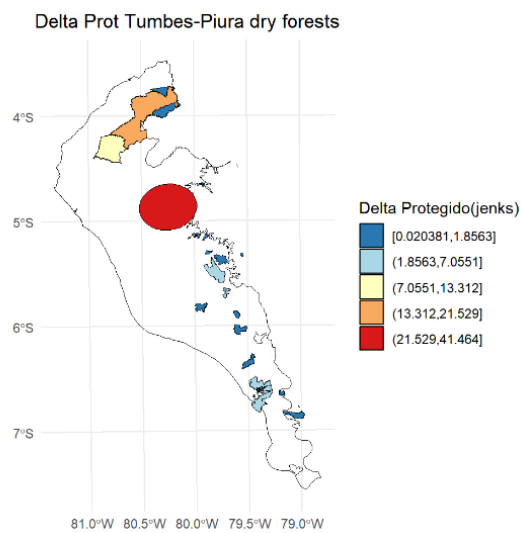


Figura 10. Mapa de la ecorregión Tumbes-Piura dry forests

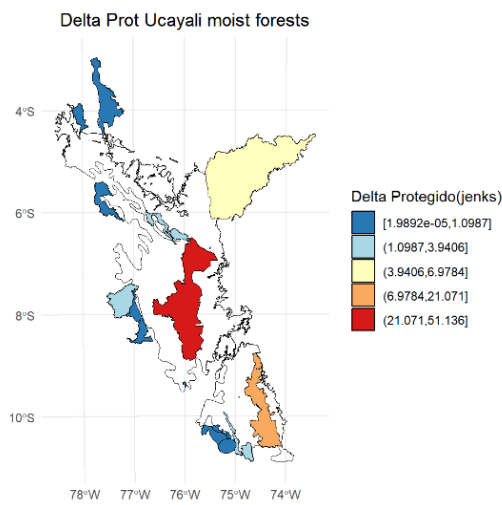


Figura 11. Mapa de la ecorregión Ucayali moist forests

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian contrastes importantes en la conectividad ecológica entre las ecorregiones del Perú. En general, las ecorregiones amazónicas presentaron mejores indicadores de conectividad (ProtConn altos), dado que albergan extensos bloques continuos de hábitats conservados. Esto es congruente con lo hallado por Saura et al. (2017), quienes reportaron que muchas ecorregiones amazónicas excedían el 17% de tierra protegida conectada, a diferencia de regiones andinas. En cambio, las ecorregiones andinas y costeras peruanas muestran un claro déficit de conectividad: ProtConn muy por debajo del 17% sugiere que, además de baja cobertura de APs, el paisaje está altamente fragmentado. Por ejemplo, Eastern Cordillera Real y Marañón dry forests tienen redes de APs pequeñas y dispersas, reflejando la intensa conversión de hábitats para agricultura y desarrollo en los Andes. Esta situación coincide con patrones de aislamiento de áreas protegidas en montañas reportados en estudios previos. La baja ProtConn implica que especies que requieren desplazarse entre reservas enfrentan barreras significativas, aumentando riesgos de extinción local.

Un hallazgo positivo fue la existencia de ecorregiones con ProtConn relativamente alto ($\geq 25\%$), como Bolivian Yungas o Iquitos várzea. En Bolivian Yungas, la conectividad es casi óptima (RelConn 100%) gracias a un complejo continuo de áreas protegidas transfronterizas (Perú-Bolivia) que cumplen la función de corredor binacional. Esto resalta la importancia de la coordinación internacional en la conservación: la conectividad ecológica trasciende fronteras políticas. Objetivo 3 del Marco Kunming-Montreal enfatiza precisamente la necesidad de sistemas protegidos bien conectados a nivel de paisajes más amplios. Los resultados sugieren que Perú contribuye a esa meta en la Amazonía (p.ej., el corredor de parques Alto Purús–Manu–Madidi), pero tiene deudas pendientes en otras regiones biogeográficas. Por ejemplo, la costa norte y los Andes centrales requerirían establecer nuevos corredores biológicos o expandir áreas protegidas para acercarse al ideal de “30x30 bien conectado” (Oppler, 2021).

Al comparar con la literatura, nuestros hallazgos concuerdan en que Perú, al igual que otros países megadiversos, ha enfocado sus esfuerzos principalmente en la cobertura más que en la conectividad de APs. Saura et al. (2018) destacaron que globalmente las metas de conectividad (elemento de Aichi 11) no se estaban cumpliendo. Nuestros datos lo confirman a nivel nacional: solo 5 ecorregiones peruanas superarían el 17% de tierra protegida conectada (ProtConn), quedando la mayoría por debajo. Esto a pesar de que algunas alcanzan o sobrepasan 17% de superficie protegida (cobertura), lo que evidencia la brecha entre proteger territorio y asegurar su interconexión funcional. Se destaca la necesidad de acciones de conectividad complementarias: por ejemplo, establecer áreas de conservación privadas o corredores de restauración forestal entre APs existentes en los Andes, así como implementar pasos de fauna en infraestructuras (carreteras) que actualmente interrumpen flujos biológicos clave. Adicionalmente, la contribución de Other Effective Conservation Measures (OECM) – territorios indígenas, concesiones de conservación – podría ser vital para mejorar ProtConn sin la creación formal de nuevos parques, tal como sugieren Castillo et al. (2020) para los Andes Tropicales.

Limitaciones: Este estudio empleó un umbral uniforme de 10 km para conectividad, basado en vertebrados medianos. En realidad, las distancias de dispersión varían

entre especies; algunas (p.ej., aves) pueden conectar fragmentos más distantes, mientras que pequeños roedores requieren proximidad mayor. Analizar múltiples escalas de distancia podría brindar un panorama más completo de la conectividad funcional. Asimismo, ProtConn considera conectividad estructural; no incorpora explícitamente la calidad de la matriz. Introducir criterios de permeabilidad (como el índice human footprint) refinaría la medición, dado que un paisaje agrícola puede ser más o menos transitable según su uso. Otra limitación es que nuestros datos de APs provienen de registros oficiales; áreas de conservación privadas o comunitarias poco reportadas podrían estar subrepresentadas, afectando el cálculo real de ProtConn. Finalmente, asumimos que las áreas protegidas están efectivamente gestionadas para conservar biodiversidad. Si alguna “en el papel” sufre de invasiones o deforestación interna, la conectividad efectiva sería menor a la estimada.

Posibles mejoras y trabajo futuro: Para robustecer este análisis, se podría integrar la presión humana en el cálculo de conectividad, siguiendo enfoques recientes que restan áreas protegidas degradadas o agregan resistencias en la matriz. Asimismo, sería valioso modelar escenarios de incremento de conectividad: por ejemplo, identificar áreas clave de restauración cuya rehabilitación conectaría múltiples APs y aumentaría ProtConn significativamente. Esto se podría hacer calculando ProtConn delta al “agregar” hipotéticos corredores o nuevas APs en el paisaje (análisis de priorización espacial). Por último, incorporar el componente marino-costal (no abarcado por ProtConn terrestre) sería importante para una visión integradora tierra-mar en la implementación de la Meta 3 en Perú.

CONCLUSIÓN

En el Perú, la conectividad ecológica de las áreas protegidas varía ampliamente según la ecorregión, reflejando diferencias en historia de uso del suelo y configuración del paisaje. Las ecorregiones amazónicas muestran relativamente alta conectividad, con grandes bloques de hábitat protegido interconectado que acercan al país a las metas globales de conservación. En contraste, las ecorregiones andinas y costeras presentan redes de áreas protegidas fragmentadas y aisladas, con ProtConn muy por debajo de lo deseable. En conjunto, nuestros hallazgos indican que Perú ha logrado avances en proteger una porción significativa de su territorio (aprox. 15% nacional), pero asegurar que esas áreas conformen un sistema cohesionado es la tarea pendiente. Para cumplir los compromisos del Marco de Kunming-Montreal (30% de tierras protegidas y bien conectadas al 2030), serán necesarias estrategias específicas de conectividad: creación de corredores biológicos, expansión estratégica de APs en puntos de cuello de botella, y fortalecimiento de la gestión en el matrix para permitir el tránsito de especies entre reservas. Un resumen de hallazgos clave incluye: (1) Solo 5 ecorregiones del Perú superan 17% de superficie con protección conectada, evidenciando un déficit general frente a las metas de Aichi/CBD; (2) La conectividad está altamente concentrada en ciertas “APs ancla” (p. ej., Pacaya Samiria en Loreto, Bahuaja Sonene en Puno/Madre de Dios), cuya pérdida degradaría enormemente la conexión del sistema; (3) Existen oportunidades de mejora, como conectar las APs de bosques secos norteños (p. ej., mediante corredores entre Cerros de Amotape y áreas cercanas) o consolidar un corredor andino central integrando reservas paisajísticas e iniciativas de reforestación. En síntesis, impulsar la conectividad ecológica en Perú no solo contribuirá a las metas globales de biodiversidad, sino que potenciará la resiliencia de los ecosistemas ante el cambio climático y garantizará rutas de movilidad vitales para la fauna silvestre, fortaleciendo el manejo del paisaje a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Castillo, L. S., Correa Ayram, C. A., Matallana Tobón, C. L., Corzo, G., Areiza, A., González-M., R., Serrano, F., Chalán Briceño, L., Sánchez Puertas, F., More, A., Franco, O., Bloomfield, H., Aguilera Orrury, V. L., Rivadeneira Canedo, C., Morón-Zambrano, V., Yerena, E., Papadakis, J., Cárdenas, J. J., Golden Kroner, R. E., & Godínez-Gómez, O. (2020). Connectivity of protected areas: Effect of human pressure and subnational contributions in the ecoregions of tropical Andean countries. *Land*, 9(8), 239.
- Saura S., Bertzky B., Bastin L., Battistella L., Mandrici A., Dubois G. (2018). Protected area connectivity: shortfalls in global targets and country-level priorities. *Biol. Conserv.*; 219: 53–67
- Saura, S., Bertzky, B., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2019). Global trends in protected area connectivity from 2010 to 2018. *Biological Conservation*, 238, 108183.
- Oppler, G., Hilty, J. A., Laur, A. T., & Tabor, G. (2021). Connectivity conservation. In *Parks Stewardship Forum* Vol. 37, No. 3, pp. 448-455. George Wright Society.