

PROYECTO FINAL

Enfoques, métodos y herramientas para el análisis de la conectividad ecológica

1. Introducción

La conectividad del paisaje en las áreas naturales protegidas (ANPs) del Desierto de Chihuahua constituye un elemento crítico para garantizar la viabilidad ecológica y funcional de los ecosistemas áridos. Este desierto, considerado uno de los más extensos y biodiversos del continente, enfrenta presiones crecientes derivadas de la fragmentación del hábitat, la expansión agropecuaria, la urbanización y las infraestructuras lineales, factores que reducen la capacidad de las especies para dispersarse, mantener flujo génico y acceder a recursos esenciales. La pérdida de conectividad compromete la resiliencia de las comunidades biológicas, especialmente de especies endémicas y de gran movilidad, cuya supervivencia depende de corredores funcionales que enlacen parches de hábitat adecuados.

Desde una perspectiva ecológica, mantener la conectividad asegura procesos fundamentales como la migración estacional, la recolonización tras disturbios y la adaptación frente al cambio climático, dado que facilita el desplazamiento hacia áreas con condiciones ambientales más favorables. Además, contribuye al mantenimiento de servicios ecosistémicos clave en zonas áridas, incluyendo la regulación hidrológica y la estabilidad del suelo. Ante este contexto, surge una pregunta de investigación esencial: ¿en qué medida las ANPs del Desierto de Chihuahua mantienen una conectividad funcional que permita sostener la diversidad biológica y los procesos ecológicos a largo plazo?

2. Metodología

Área de estudio: El Desierto de Chihuahua, ubicado en el norte de México y suroeste de Estados Unidos, es la ecorregión árida más extensa de Norteamérica. Presenta clima árido a semiárido, con precipitaciones de 150–500 mm anuales y marcadas variaciones térmicas. Su vegetación incluye matorral xerófilo, pastizales, mezquitales y bosques de encino-pino en zonas montañosas. Los principales usos de suelo corresponden a ganadería, agricultura de riego y urbanización, que generan fragmentación. Sus ecosistemas sostienen procesos ecológicos clave y especies de alta relevancia, como *Larrea tridentata*, *Dasylirion spp.*, el berrendo (*Antilocapra americana*), el lobo mexicano (*Canis lupus baileyi*) y el águila real (*Aquila chrysaetos*).

Tipo de datos usados: ANPs dentro de la ecorregión Desierto de Chihuahua.

Índice(s) de conectividad/fragmentación seleccionados y justificación de su elección: Se utilizó ProtConn (Protected Connected indicator), un índice diseñado para evaluar el grado de conectividad entre áreas protegidas, incluyendo parques nacionales y reservas, en escalas local, regional y global. Este indicador, desarrollado por Saura et al. (2017, 2018), se ha consolidado como una herramienta clave para monitorear el avance hacia compromisos internacionales de conservación, particularmente el Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal. Dentro de este marco, el objetivo 3 establece que, para el año 2030, al menos el 30 % de las superficies terrestres y marinas deben estar

protegidas y gestionadas de manera efectiva, representando adecuadamente la diversidad de ecosistemas, asegurando su conectividad funcional y garantizando un manejo justo y equitativo.

Parámetros y configuraciones aplicadas

Índice / Fracción	Descripción
ECA	<i>Equivalent Connected Area.</i> Área equivalente de hábitat que estaría disponible si el paisaje fuera completamente contiguo, manteniendo el mismo nivel de conectividad observado. Expresado en unidades de superficie.
Prot	Porcentaje de la superficie de la región que está cubierta por áreas protegidas, sin considerar conectividad.
ProtConn	Porcentaje del paisaje que está protegido y conectado dentro de la región de estudio.
ProtUnconn	Porcentaje del paisaje que está protegido pero aislado (sin conectividad funcional con otras áreas protegidas).
RelConn	Conectividad relativa: relación entre ProtConn y Prot . Indica la proporción de la superficie protegida que está funcionalmente conectada.
ProtUnConn[design]	Porción de la superficie protegida que permanece desconectada debido al diseño y localización de las áreas protegidas (dentro de la región).
ProtConn[bound]	Versión corregida del indicador ProtConn que se centra en la parte de la conectividad sobre la que un país o una región puede influir

ProtConn[Prot]	Fracción de ProtConn derivada del área protegida interna en sí misma (Within + Contig).
ProtConn[Within]	Fracción de ProtConn aportada por conexiones entre áreas protegidas dentro de la región.
ProtConn[Contig]	Fracción de ProtConn derivada de áreas protegidas contiguas (adyacentes sin distancia entre ellas).
ProtConn[Trans]	Fracción de ProtConn aportada por conexiones transfronterizas con áreas protegidas fuera de la región.
ProtConn[Unprot]	Fracción de ProtConn derivada de conexiones que incluyen áreas no protegidas como corredores funcionales.
ProtConn[Within][land]	Igual que ProtConn[Within] pero considerando solo la parte terrestre de la región.
ProtConn[Contig][land]	Igual que ProtConn[Contig] pero considerando únicamente territorio terrestre.
ProtConn[Unprot][land]	Igual que ProtConn[Unprot] pero restringido a conexiones por tierra.
ProtConn[Trans][land]	Igual que ProtConn[Trans] pero considerando únicamente conexiones transfronterizas terrestres.

La función tiene los siguientes argumentos:

Argumento	Descripción
nodes	<code>sf</code> , <code>sfc</code> , <code>sfg</code> , <code>SpatVect</code> , <code>spatialPolygonsDataFrame</code> . El archivo debe tener un sistema de coordenadas proyectado.
region	Objeto de clase <code>raster</code> , <code>rast</code> , <code>sf</code> , <code>sfc</code> , <code>sfg</code> o <code>spatialPolygonsDataFrame</code> . Polígono que delimita la región o área de estudio. Debe estar en un sistema de coordenadas proyectado.
area_unit	<code>character</code> (opcional, por defecto <code>"m2"</code>). Unidades de área cuando <code>attribute = NULL</code> . Ejemplos: <code>"m2"</code> , <code>"km2"</code> , <code>"cm2"</code> , <code>"ha"</code> . Ver <code>unit_convert</code> para más detalles.

distance

Matriz o lista que define la distancia entre cada par de nodos. Puede ser distancia euclíadiana o efectiva (costos de movimiento).

- Si es matriz: número de filas y columnas igual al número de nodos (puede generarse con `distancefile`).
- Si es lista: debe incluir parámetros como "type" ("centroid", "edge", "least-cost", "commute-time") y, en su caso, "resistance". Para más detalles ver `distancefile`.

distance_thresholds

`numeric`. Distancia(s) de dispersión de la especie en metros. Si es `NULL`, se estima como la distancia de dispersión mediana entre nodos. También se puede calcular con `dispersal_distance`.

probability

numeric . Probabilidad asociada a la distancia en `distance_threshold` . Ej.: mediana de dispersión → `0.5` ; máxima dispersión → `0.05` o `0.01` . Usar solo con la métrica "PC" . Por defecto = `0.5` .

transboundary

numeric . Búfer para seleccionar polígonos en una segunda ronda (atributo = 0, actuando como stepping stones según Saura et al. 2017) . Puede ser un valor único o uno por cada distancia umbral.

transboundary_type

character . Opciones: "nodes" (por defecto, límites de los nodos en la región) o "region" (límites de la región).

protconn_bound

logical . Si es `TRUE` , estima las fracciones `ProtUnConn[design]` y `ProtConn[bound]` .

delta	<code>logical</code> . Si es <code>TRUE</code> , estima la contribución de cada nodo al valor de <code>ProtConn</code> en la región.
plot	<code>logical</code> . Si es <code>TRUE</code> , grafica los indicadores y fracciones principales de <code>ProtConn</code> . Por defecto = <code>FALSE</code> .
resample_raster	<code>numeric</code> . Úsallo con rásters pequeños y alta resolución (<150 m) o regiones muy grandes. Define el valor para remuestrear y acelerar el proceso de selección de nodos transfronterizos.
write	<code>character</code> . Carpeta de salida con nombre de archivo sin extensión. Ej.: "C:/ProtConn/Protfiles".
parallel	<code>numeric</code> . Número de núcleos para procesamiento en paralelo (usando <code>furrr</code> y <code>multiprocess</code>). Por defecto = <code>NULL</code> .
intern	<code>logical</code> . Si es <code>TRUE</code> , muestra el progreso. Puede no llegar al 100% si el proceso es muy rápido.

3. Resultados

Figura 1

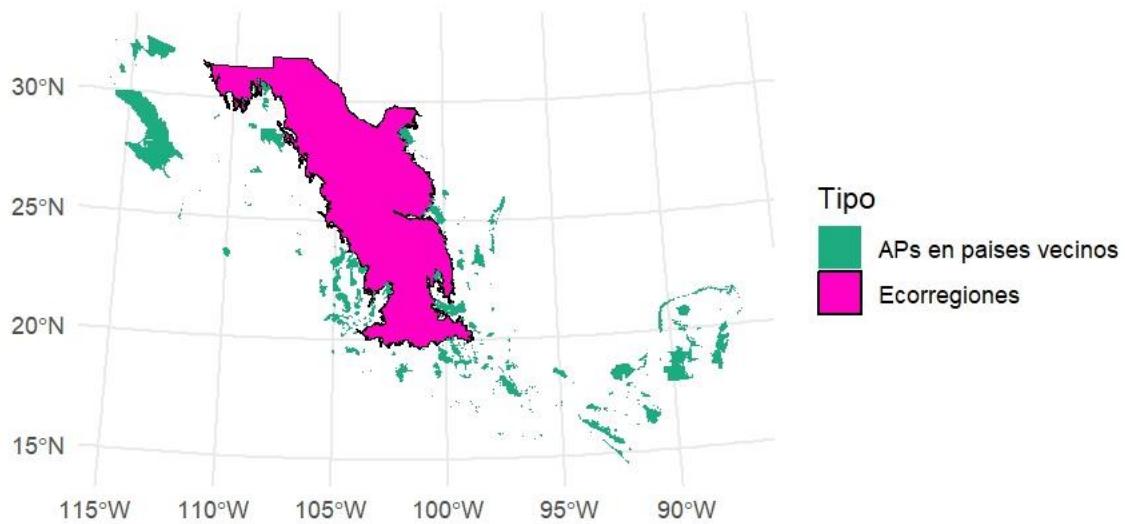


Tabla 1

Index	Value	ProtConn indicator	Percentage
EC(PC)	1728792.18	Prot	7.2507
PC	9.0000e-04	Unprotected	92.7493
Maximum landscape attribute	57800154.82	ProtConn	2.9910
Protected surface	4190935.79	ProtUnconn	4.2598
		RelConn	41.2507
		ProtConn_Prot	91.6967
		ProtConn_Trans	0.2088
		ProtConn_Unprot	8.0945
		ProtConn_Within	63.2594
		ProtConn_Contig	36.7406
		ProtConn_Within_land	1.8921
		ProtConn_Contig_land	1.0989
		ProtConn_Unprot_land	0.2421
		ProtConn_Trans_land	0.0062

Figura 2

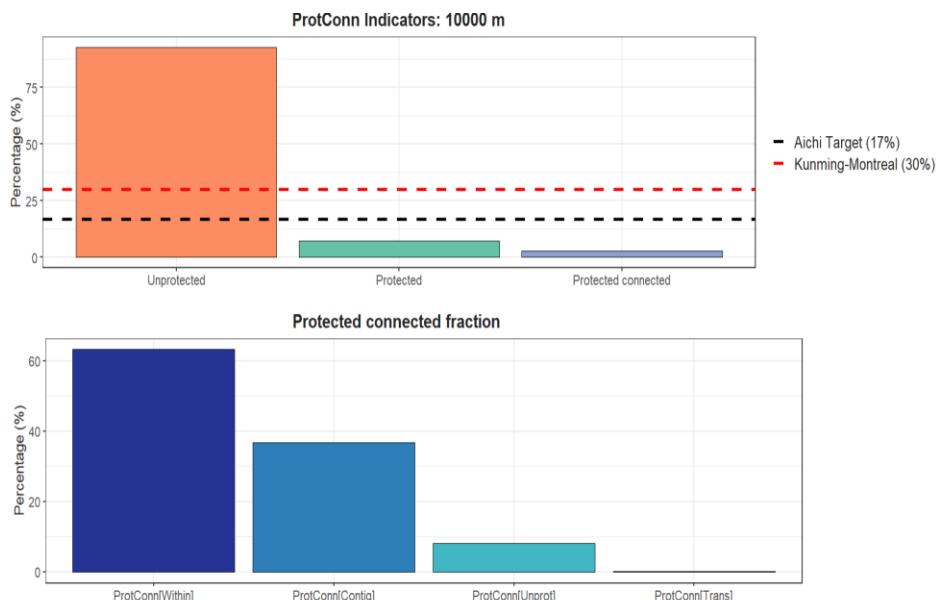


Tabla 2

Index	Value	ProtConn indicator	Percentage
EC(PC)	1728777.68	Prot	7.2507
PC	9.0000e-04	Unprotected	92.7493
Maximum landscape attribute	57800154.82	ProtConn	2.9910
Protected surface	4190935.79	ProtUnconn	4.2598
		ProtUnconn_Design	4.2598
		ProtConn_Bound	2.9910
		RelConn	41.2504
		ProtConn_Prot	91.6975
		ProtConn_Trans	0.2143
		ProtConn_Unprot	8.0883
		ProtConn_Within	63.2599
		ProtConn_Contig	36.7401
		ProtConn_Within_land	1.8921
		ProtConn_Contig_land	1.0989
		ProtConn_Unprot_land	0.2419
		ProtConn_Trans_land	0.0064

Tabla 3

OBJECTID	NOMBRE	CAT_DECRET	TIPO Shape_Leng Shape_Area dProt dProtConn varProtConn	geometry
2 31	Acuña	2 Zona Sujeta a Conservación Ecológica	2 Estatal 31563.175 1267649 0.028634536 6.973455e-04 2.688972e-05 2 POLYGON ((13895370 132073...	
4 75	Área de Conservación Los Ojos 1 Fracciones A y B	4 Sociedades	4 ADVC 68378.346 10794100 0.27767947119359e-014 6.15643e-03 4 MULTIPOLYGON (((184644 213...	
5 76	Área de Conservación Los Ojos 2 Fracciones C y D	5 Sociedades	5 ADVC 40475.957 9781532 9 0.229633190 9.889591e-02 3.824329e-03 5 POLYGON ((1828806 2156856...	
6 77	Área de Conservación Los Ojos 3 Fracciones E, F,	6 Sociedades	6 ADVC 82351695 140609757 6.0239137875 1604152e-01 6.203234e-03 6 MULTIPOLYGON (((1951619 215...	
7 89	Área de Conservación Los Ojos Relevant Rancho La Puenta	7 Personas Físicas	7 ADVC 15512.039 14633873 3 0.04438385 5.672207e-04 1.951435e-05 7 POLYGON ((26120411446463...	
8 91	Área de Protección del Águila Real de la Sierra	8 Tierras de Uso Común	8 ADVC 3027109 25956273 8 0.06236569 6.68736e-04 2.566228e-05 8 POLYGON ((250932 1105640...	
9 92	Área de Uso Común del Ejido Nopalá	9 Área de Uso Común	9 Ejidal 23026.368 17474508 10.04123346 5.607861e-04 2.66574e-05 9 POLYGON ((2749811 928949 6...	
12 124	Asthar	12 Zona de Preservación Ecológica	12 Municipal 6108.622 223335 3 0.006255736 1447539e-05 5.597670e-07 12 POLYGON ((2783764 3265538...	
18 145	Bavipse	18 Reserva Forestal Nacional y Zona de Refugio de la Fauna Silvestre	18 Federal 53777.703 2056060576 13.354975988 1.079595e+00 4.74800e-02 18 MULTIPOLYGON (((182536 209...	
19 152	Bondojito	19 Zona de Preservación Ecológica	19 Ejidal 573.795 66452.2 0.00562972 1.672763e-05 6.238592e-07 19 POLYGON ((2739394 938752 7...	

Figura 3

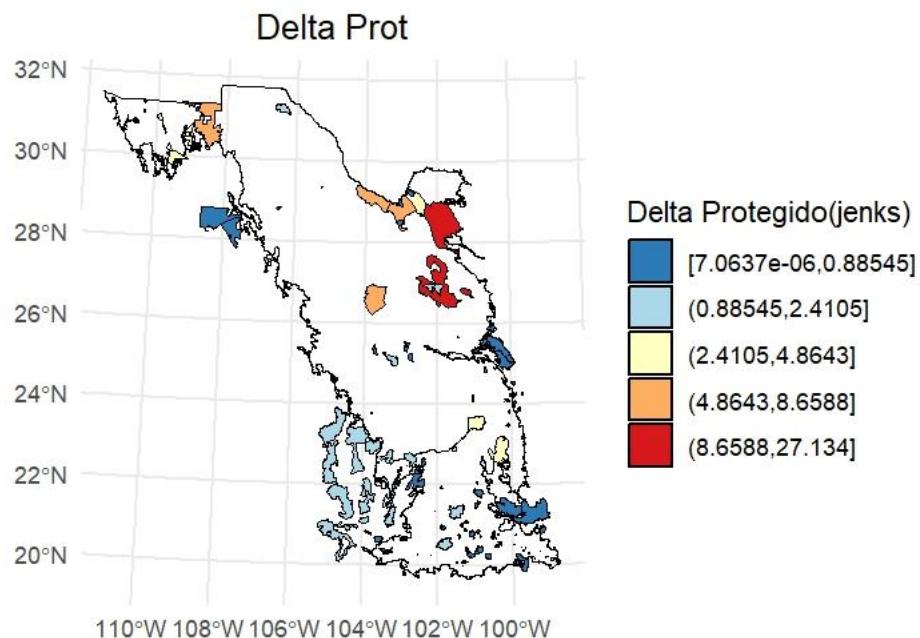


Figura 4

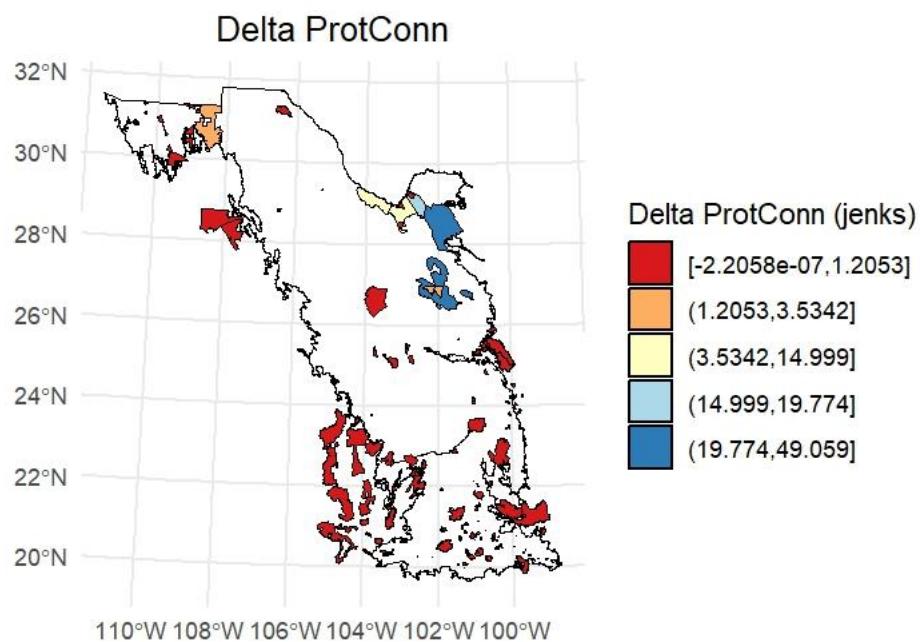
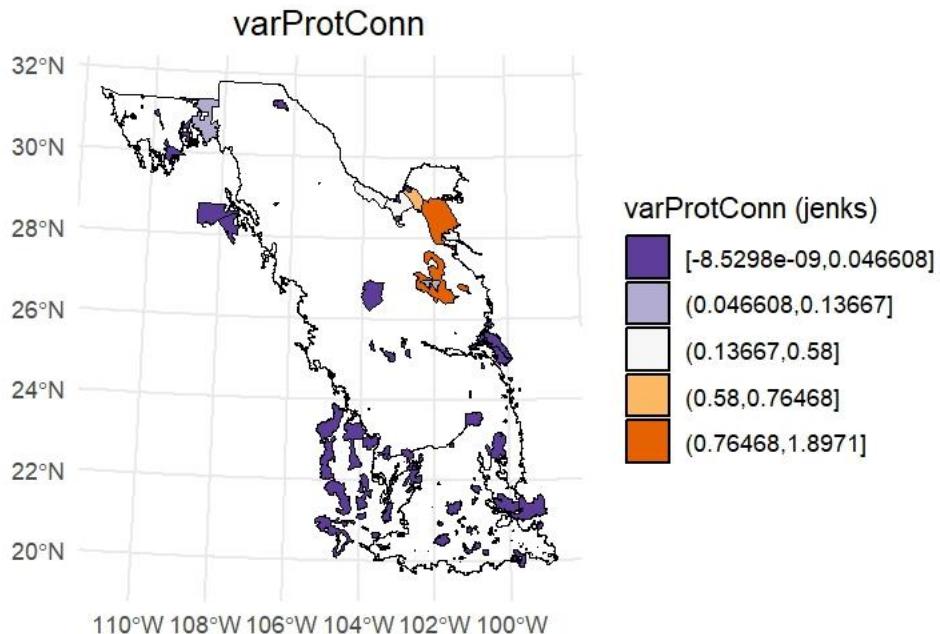


Figura 5



4. Discusión

La conectividad del paisaje en las áreas naturales protegidas (ANPs) del Desierto de Chihuahua constituye un desafío crítico para la conservación de su biodiversidad. A pesar de la existencia de un sistema de ANP de relevancia biológica, diversos estudios evidencian que estas no cumplen con las metas internacionales establecidas por el Plan Estratégico de Biodiversidad de Aichi (2011–2020) ni con el actual Marco Mundial de Biodiversidad Kunming-Montreal (2022). Dichos acuerdos plantean que al menos el 17 % (Aichi, Meta 11) y posteriormente el 30 % (Kunming-Montreal, Objetivo 3) de las superficies terrestres y marinas deben estar protegidas, bien conectadas y representativas de los ecosistemas. Sin embargo, en esta ecorregión, la protección se concentra en polígonos aislados, insuficientes para mantener conectividad funcional.

Desde una perspectiva ecológica, la falta de conectividad en el paisaje restringe el flujo génico, la dispersión de semillas y el movimiento de fauna de gran movilidad, como berrendo (*Antilocapra americana*), puma (*Puma concolor*) y águila real (*Aquila chrysaetos*). Esta fragmentación genera poblaciones más pequeñas y aisladas, con mayor riesgo de extinción local debido a la pérdida de variabilidad genética y la reducción de la resiliencia frente a disturbios ambientales. Además, la conectividad es esencial en regiones áridas como el Desierto de Chihuahua, donde los recursos —agua, refugio y alimento— se distribuyen de forma heterogénea y las especies dependen de corredores funcionales para sobrevivir. Lo anterior, es respaldado por diversos estudios. Por ejemplo, Saura et al. (2017, 2018) destacan que indicadores como ProtConn permiten cuantificar la conectividad estructural y funcional de las ANP, evidenciando que en ecosistemas áridos las metas internacionales difícilmente se alcanzan sin estrategias de corredores biológicos. De igual forma, Crooks y Sanjayan (2006) subrayan que la pérdida de conectividad reduce la viabilidad poblacional a largo plazo, mientras que Hilty et al. (2020) enfatizan que la conectividad es un principio rector para enfrentar el cambio climático, al permitir el desplazamiento de especies hacia áreas con condiciones ambientales más favorables.

Bajo este contexto, la falta de cumplimiento de las metas Aichi y Kunming-Montreal en el Desierto de Chihuahua no solo implica un rezago en compromisos internacionales, sino también una amenaza directa a los procesos ecológicos fundamentales que sostienen sus ecosistemas. Ante ello, resulta prioritario diseñar estrategias que integren corredores biológicos, restauración de hábitats y gestión colaborativa del territorio para garantizar la conectividad funcional, condición indispensable para la conservación de la biodiversidad y la resiliencia ecológica en esta ecorregión.

5. Conclusiones

Las conclusiones evidencian que la conectividad del paisaje en las ANP del Desierto de Chihuahua es insuficiente para cumplir con las metas de Aichi y Kunming-Montreal, lo que compromete la conservación de su biodiversidad. La fragmentación limita el flujo genético, la dispersión de semillas y el movimiento de fauna, incrementando el riesgo de extinción local y reduciendo la resiliencia ecológica. La literatura científica confirma que la conectividad es esencial para mantener procesos ecológicos y enfrentar el cambio climático. Se requieren estrategias de corredores biológicos, restauración de hábitats y gestión territorial colaborativa para asegurar la funcionalidad ecológica y la viabilidad a largo plazo.

6. Referencias

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), Article 8. <https://doi.org/10.3390/land9080239>

Crooks, K.R. & Sanjayan, M.A. (2006) Connectivity Conservation: Maintaining Connections for Nature. In: Crooks, K.R. and Sanjayan, M., Eds.: *Connectivity Conservation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1-20.
<http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511754821.001>

Hilty, J., Worboys, G.L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B., Locke, H., Carr, M., Pulsford I., Pittock, J., White, J.W., Theobald, D.M., Levine, J., Reuling, M., Watson, J.E.M., Ament, R., & Tabor, G.M. (2020). Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 30. Gland, Switzerland: IUCN

Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators*, 76, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>

Saura, S., Bartzky, B., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2018). Protected area connectivity: Shortfalls in global targets and country-level priorities. *Biological Conservation*, 219, 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.12.020>

7. Material Anexo

```
library(ggplot2)
library(sf)
library(terra)
library(raster)
library(Makurhini)
library(RColorBrewer)

APs <- read_sf("D:/Users/jeram/Downloads/Conectividad/chihdesert/ANPs_lcc.shp")
nrow(APs)

Ecorreg <- read_sf("D:/Users/jeram/Downloads/Conectividad/chihdesert/Chihuahuan_Desert_province_P_lcc.shp")

APs <- APs[,c("NAME", "DESIGNACIO", "ESCALA_2")]
Ecorreg <- Ecorreg[,"ECO_NAME"]

library(rmapshaper)
mask_ecorreg <- ms_dissolve(Ecorreg)
APs_nacionales <- ms_clip(APs, mask_ecorreg)

APs_transnacionales <- ms_erase(APs, mask_ecorreg)
APs_transnacionales$Tipo <- "APs en paises vecinos"

APs_subnacionales <- APs_nacionales[APs_nacionales$ESCALA_2 == "Subnacional",]
APs_subnacionales$Tipo <- "APs Subnacionales"

APs_nacionales <- APs_nacionales[APs_nacionales$ESCALA_2 == "Nacional",]
APs_nacionales$Tipo <- "APs Nacionales"
```

```

APs_vis <- rbind(APs_nacionales, APs_subnacionales, APs_transnacionales)

APs_vis$Tipo <- factor(APs_vis$Tipo, levels = c("APs Nacionales", "APs Subnacionales", "APs en paises vecinos"))

ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg, aes(fill = "Ecorregiones"), color = "black") +
  geom_sf(data = APs_vis, aes(fill=Tipo), color = NA) +
  scale_fill_manual(name = "Tipo", values = c("#1DAB80", "#FF00C5", "#E06936",
  "#8D8BBE"))+
  theme_minimal()

Ecorreg_1 <- Ecorreg[1,] #Selecciono la primera fila o primera ecorregion

test<- MK_ProtConn(nodes = APs,
                     region = Ecorreg_1,
                     area_unit = "ha",
                     distance = list(type= "edge", keep = 0.1),
                     distance_thresholds = 10000,
                     probability = 0.5,
                     transboundary = 50000,
                     plot = TRUE,
                     parallel = NULL,
                     protconn_bound = FALSE,
                     delta = FALSE,
                     write = NULL,
                     intern = TRUE)

#> Step 1. Reviewing parameters

#> Step 2. Processing ProtConn metric

#> Done!

```

```
test$`Protected Connected (Viewer Panel`  
#Alternativa: test[[1]]  
test$`ProtConn Plot`  
#Alternativa: test[[2]]  
test2 <- MK_ProtConn(nodes = APs,  
                      region = Ecorreg_1,  
                      area_unit = "ha",  
                      distance = list(type= "edge", keep = 0.1),  
                      distance_thresholds = 10000,  
                      probability = 0.5,  
                      transboundary = 50000,  
                      plot = TRUE,  
                      parallel = NULL,  
                      protconn_bound = TRUE,  
                      delta = FALSE,  
                      write = NULL,  
                      intern = TRUE)  
  
#> Step 1. Reviewing parameters  
#> Step 2. Processing ProtConn metric  
#> Done!  
test2$`Protected Connected (Viewer Panel`  
test3 <- MK_ProtConn(nodes = APs,  
                      region = Ecorreg_1,  
                      area_unit = "ha",  
                      distance = list(type= "edge", keep = 0.1),  
                      distance_thresholds = 10000,  
                      probability = 0.5,
```

```

transboundary = 50000,
plot = TRUE,
parallel = NULL,
protconn_bound = FALSE,
delta = TRUE,
write = NULL,
intern = TRUE)

#> Step 1. Reviewing parameters

#> Step 2. Processing ProtConn metric

#> Step 3. Processing Delta ProtConn

#> Done!

test3$ProtConn_Delta

library(classInt)

library(dplyr)

dProtConn <- test3$ProtConn_Delta

breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$dProt, n = 5, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos

dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProt_q = cut(dProt,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks

ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg_1, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProt_q), color = "black", size = 0.1) +

```

```

scale_fill_brewer(palette = "RdYlBu", direction = -1, name = "Delta Protegido(jenks)") +
theme_minimal() +
labs(
  title = "Delta Prot",
  fill = "Delta Prot"
) +
theme(
  legend.position = "right",
  plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

dProtConn <- test3$ProtConn_Delta

# Calcular los intervalos de Jenks para strength

breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$dProtConn, n = 5, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos

dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(dProtConn_q = cut(dProtConn,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks

ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg_1, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = dProtConn_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlBu", direction = 1, name = "Delta ProtConn (jenks)") +
  theme_minimal()

```

```

labs(
  title = "Delta ProtConn",
  fill = "Delta ProtConn"
) +
theme(
  legend.position = "right",
  plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

dProtConn <- test3$ProtConn_Delta

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(dProtConn$varProtConn, n = 5, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
dProtConn2 <- dProtConn %>%
  mutate(varProtConn_q = cut(varProtConn,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = Ecorreg_1, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = dProtConn2, aes(fill = varProtConn_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "PuOr", direction = -1, name = "varProtConn (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "varProtConn",

```

```
fill = "varProtConn"  
)+  
theme(  
  legend.position = "right",  
  plot.title = element_text(hjust = 0.5)  
)
```