

ANÁLISIS DE LA CONECTIVIDAD Y EL ESTADO DE PROTECCIÓN DE LA ECORREGIÓN DE BOSQUES HÚMEDOS ESTACIONALES DE COSTA RICA

Hersson Ramírez Molina

INTRODUCCIÓN

La ecorregión de bosques húmedos estacionales de Costa Rica (Costa Rican Seasonal Moist Forests) forma parte del hotspot de biodiversidad mesoamericano y se caracteriza por una marcada estacionalidad en las precipitaciones que determina la dinámica ecológica y la composición de especies (Janzen, 1983; Olson et al., 2001). A pesar de su relevancia ecológica, esta ecorregión se encuentra fuertemente fragmentada debido al cambio de uso del suelo causado por la expansión agrícola y la urbanización en la zona, lo cual compromete la conectividad funcional y estructural de los ecosistemas (Calvo-Alvarado et al., 2009). La pérdida de conectividad amenaza la viabilidad de poblaciones de fauna y flora, limita el flujo génico y reduce la resiliencia frente al cambio climático (Saura & Pascual-Hortal, 2007). La conectividad ecológica, entonces, se convierte en un criterio esencial para orientar estrategias de conservación y restauración del paisaje. Entre los análisis que nos pueden ayudar a evaluar el estado de esta ecorregión, se encuentra el índice ProtConn (Protected Connected), propuesto por Saura et al. (2017), que permite evaluar de manera integral la conectividad de áreas protegidas considerando tanto su extensión como sus conexiones funcionales en el paisaje. Los resultados de este índice, por ejemplo, se pueden vincular con la meta 30x30 del Marco Global de Biodiversidad de Kunming-Montreal (30% de protección efectiva de ecosistemas para 2030). El índice ProtConn no solo mide cuánta área está protegida, sino qué tan conectada está esa red de protección. Por lo anterior, se plantean las siguientes preguntas: ¿Cómo varía la contribución de las diferentes áreas protegidas a la conectividad ecológica (medida con el índice ProtConn y sus componentes) en los bosques húmedos estacionales de Costa Rica, y qué implicaciones tienen estas variaciones para la priorización de sitios en estrategias de conservación y restauración? y ¿En qué medida la red actual de áreas protegidas en la ecorregión de bosques húmedos estacionales de Costa Rica, evaluada a través del índice ProtConn, contribuye al cumplimiento de la meta 30x30 del Marco Global de Biodiversidad de Kunming-Montreal, considerando tanto la proporción de superficie protegida como su grado de conectividad ecológica?

METODOLOGÍA

El área de estudio corresponde a la ecorregión de bosques húmedos estacionales de Costa Rica (Costa Rican Seasonal Moist Forests), localizada principalmente en la vertiente del Pacífico norte y caracterizada por una marcada estacionalidad en las precipitaciones que condiciona su dinámica ecológica y composición de especies (Janzen, 1983; Olson et al., 2001). Esta ecorregión ha sido señalada como una de las más transformadas del país debido al cambio de uso del suelo y a la fragmentación de los hábitats (Calvo-Alvarado et al., 2009), lo que la convierte en un espacio prioritario para evaluar la conectividad de la red de conservación.

Para este estudio se seleccionó el índice ProtConn (Protected Connected Index), desarrollado por Saura et al. (2017), que permite cuantificar de forma integrada la proporción del territorio efectivamente protegido y conectado. Este índice considera tanto la superficie bajo protección como su grado de interconexión funcional, aspectos esenciales para valorar la efectividad de la meta global 30x30 del Marco de Kunming-Montreal. Adicionalmente, se calculó el índice ProtConn_Delta, que mide la contribución individual de cada área protegida a la conectividad total del sistema, lo que facilita identificar sitios clave y rezagados dentro de la ecorregión.

La elección de estos índices se justifica porque permiten responder dos cuestiones centrales: (i) si la cobertura y conectividad actual de las áreas protegidas en la ecorregión contribuyen al cumplimiento de la meta 30x30, y (ii) cómo varía la importancia relativa de cada área protegida en la red, información indispensable para orientar acciones de priorización, restauración y diseño de corredores biológicos. Los análisis se implementaron en R mediante la librería Makurhini (Martínez-Harms et al., 2020), utilizando la delimitación oficial de la ecorregión y la cartografía de áreas protegidas nacionales como insumos y que fueron proporcionados para este trabajo (Final1).

En el análisis de conectividad se establecieron parámetros específicos para la obtención de los resultados deseados. La ecorregión de bosques húmedos estacionales fue utilizada como límite espacial del estudio, expresando todas las estimaciones en hectáreas. Para el cálculo de distancias se consideró el borde de las áreas protegidas, manteniendo un 10% de sus perímetros como zona de interacción. Se definió un umbral de 10 km con una probabilidad de dispersión del 50%, representando un escenario intermedio de movilidad para especies de tamaño medio y grande. Asimismo, se incorporó un radio de 50 km para contabilizar la conectividad transfronteriza. Además, se calculó el índice ProtConn_Delta para evaluar la contribución individual de cada área protegida, y se aplicó una clasificación de Jenks a los valores de conectividad, facilitando la identificación de patrones espaciales clave (Saura & Pascual-Hortal, 2007; Saura et al., 2017).

RESULTADOS

Primeramente se elaboró un mapa de los datos disponibles en el conjunto de datos espaciales proporcionado para este trabajo (Figura 1). La idea era poder visualizar el total de ecorregiones y las correspondientes Áreas Protegidas, con el fin de determinar si la zona de interés para desarrollar el trabajo contaba con los datos suficientes para el análisis. Finalmente, se determinó que era posible seguir con lo establecido y era posible responder las preguntas planteadas.

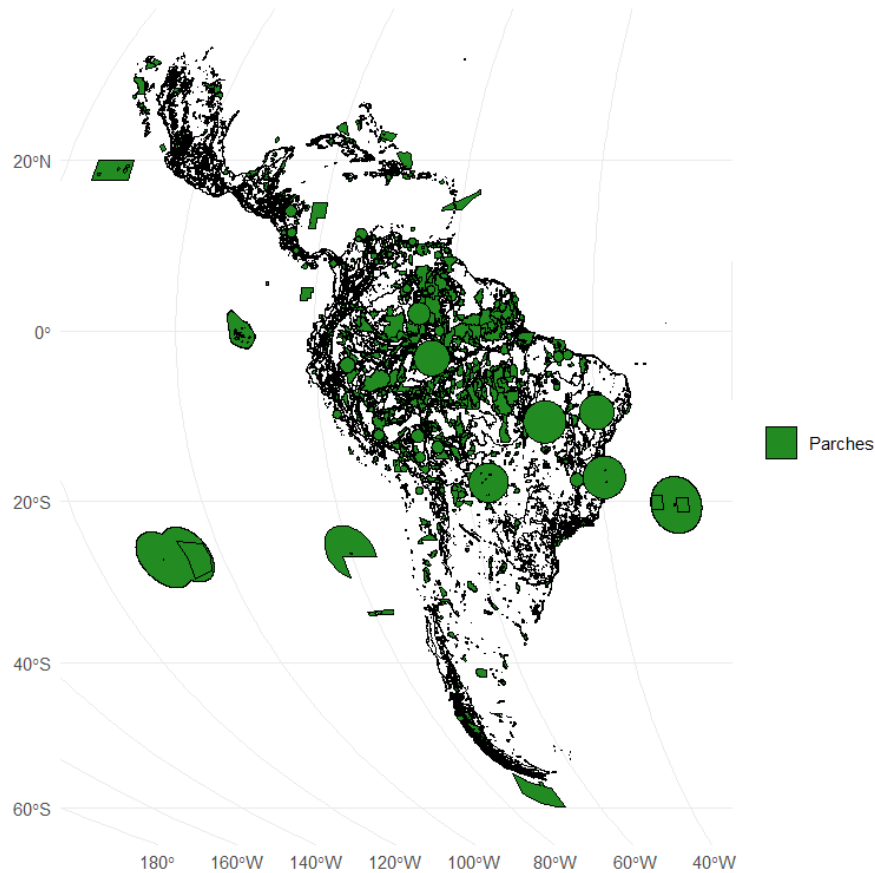


Figura 1. Visualización general del conjunto de datos espaciales proporcionado que incluye las ecorregiones y las Áreas Protegidas de latinoamérica.

De los indicadores obtenidos con el análisis (Cuadro 1), se puede destacar que un 19.07% del área total de la ecorregión posee alguna categoría de protección (Prot), mientras que un 11.08% del total de esa área protegida dentro de la ecorregión se encuentra conectada (ProtConn). El indicador ProtConn_Prot muestra que la mayor parte de la conectividad (63.02%) se debe a las áreas protegidas existentes, mientras que los corredores naturales no protegidos (ProtConn_Unprot) contribuyen solo en un 16.04%. El ProtConn_Within (59.844%) indica que la mayoría de la conectividad se da dentro de las mismas áreas protegidas, en lugar de entre diferentes áreas protegidas (ProtConn_Contig, 40.156%). Los valores de ProtConn_Unprot_land (1.7777%) y ProtConn_Trans_land (2.3208%) son muy bajos, lo que sugiere que los corredores naturales no protegidos y las zonas de transición tienen una contribución mínima a la conectividad general.

Index	Value	ProtConn indicator	Percentage
EC(PC)	118835.37	Prot	19.0744
PC	1.2300e-02	Unprotected	80.9256
Maximum landscape attribute	1072051.61	ProtConn	11.0849
Protected surface	204487.58	ProtUnconn	7.9896
		RelConn	58.1137
		ProtConn_Prot	63.0261
		ProtConn_Trans	20.9367
		ProtConn_Unprot	16.0372
		ProtConn_Within	59.8440
		ProtConn_Contig	40.1560
		ProtConn_Within_land	6.6336
		ProtConn_Contig_land	4.4512
		ProtConn_Unprot_land	1.7777
		ProtConn_Trans_land	2.3208

Cuadro 1. Índices generales de ProtConn y los porcentajes correspondientes para la ecorregión de bosques húmedos estacionales de Costa Rica.

En la Figura 2 se puede observar en términos generales que existe una desigualdad en la conectividad, ya que la clasificación en intervalos muestra que la conectividad no es homogénea; algunas áreas tienen buena conectividad, mientras que otras están muy desconectadas. Las áreas que contribuyen más a la conectividad (círculo naranja oscuro) se encuentran concentradas en la zona sureste de la ecorregión. Dicho círculo fue identificado a través de una evaluación con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y corresponde a un buffer que incluye una sección de la Cordillera Volcánica Central, incluyendo al Parque Nacional Volcán Irazú, Parque Nacional Braulio Carrillo y las Zonas Protectoras de los Cerros de la Carpintera y el Río Tiribí (Figura 3).

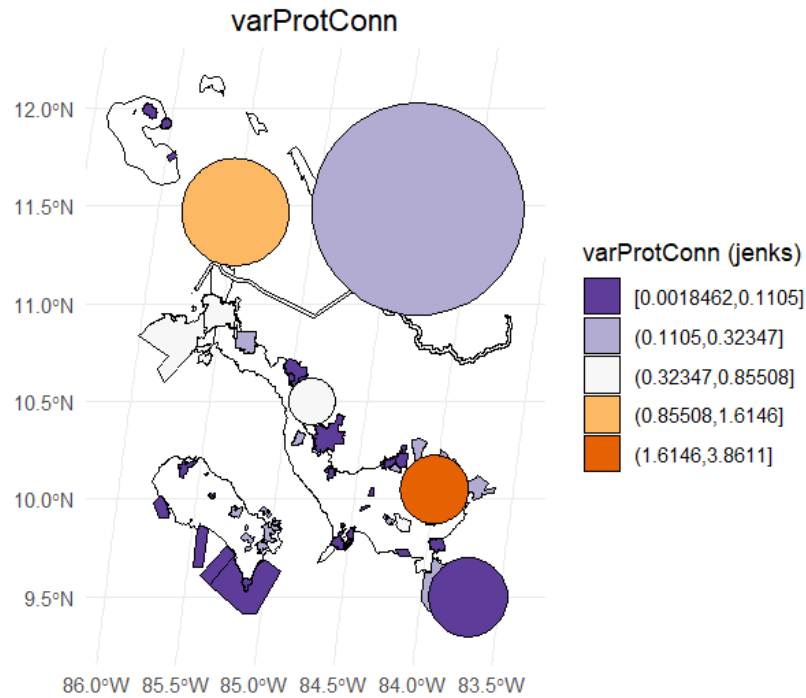


Figura 2. Análisis de varProtConn que indica las variaciones en la contribución de las diferentes áreas protegidas en la conectividad de la ecorregión de bosques húmedos estacionales de Costa Rica clasificadas en intervalos (jenks). Los valores más bajos indican áreas con muy baja conectividad, mientras que los más altos corresponden a regiones con mayor conectividad.

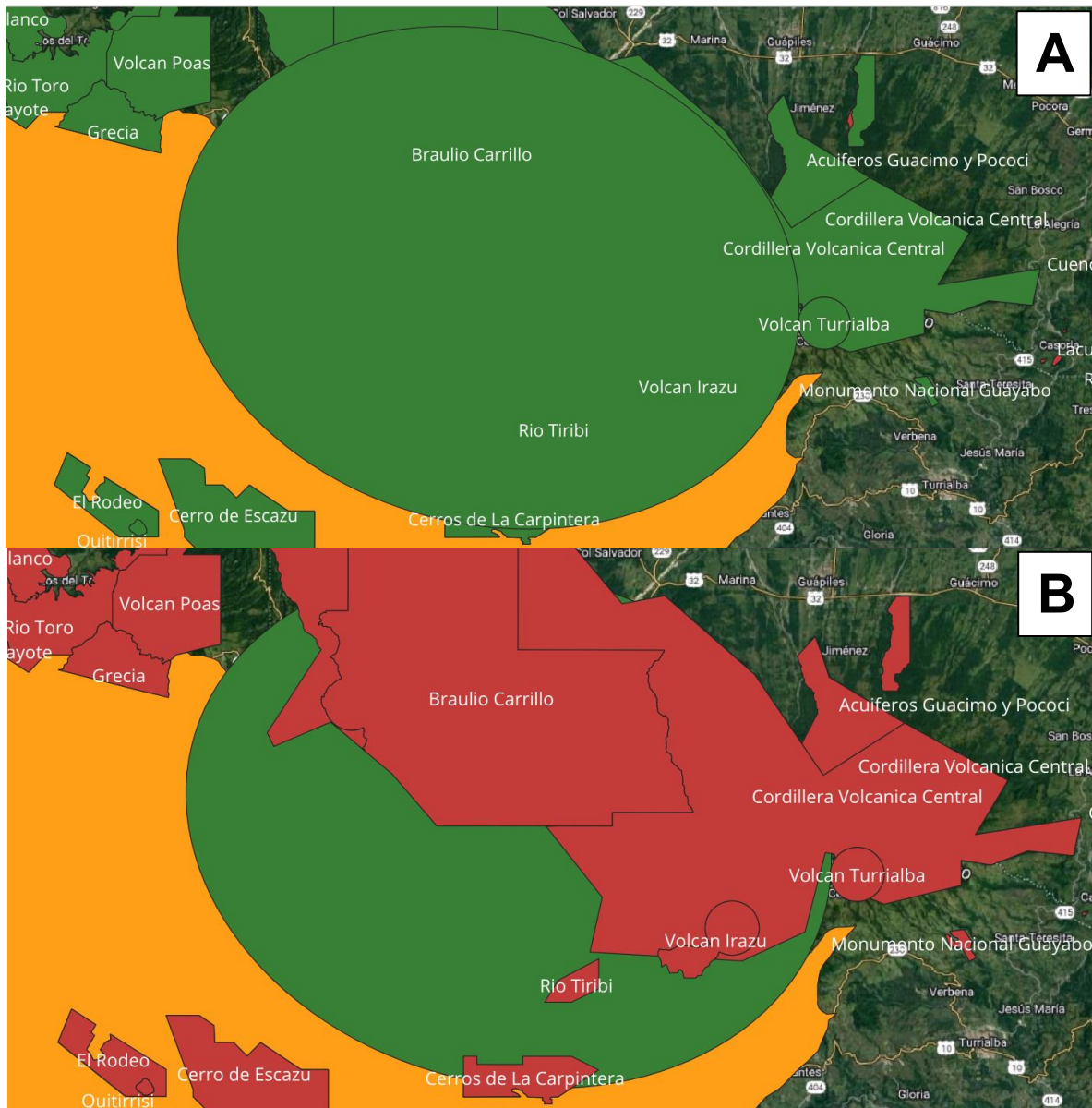


Figura 3. Evaluación con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar las Áreas Protegidas incluidas en el buffer con la mayor conectividad en la ecorregión de bosques húmedos estacionales de Costa Rica. A: El buffer completo original sobre las Áreas Protegidas, B: las Áreas Protegidas traslapadas sobre el buffer original.

DISCUSIÓN

Los resultados del análisis ProtConn y varProtConn proporcionan una evaluación cuantitativa y espacial de la efectividad de la red de áreas protegidas en el bosque húmedo estacional de Costa Rica para mantener la conectividad ecológica funcional. Estos hallazgos tienen implicaciones directas para las estrategias de conservación y el cumplimiento de los compromisos internacionales.

El valor de ProtConn (11.08%) es significativamente menor que la superficie protegida reportada (19.07%). Esta diferencia entre la protección es un hallazgo común en la literatura (Saura et al., 2017; 2018) y subraya que la mera existencia de áreas protegidas no garantiza la conectividad. El componente ProtConn_Within (59.84%) es el que más contribuye, indicando que la conectividad se da principalmente dentro de los límites de las áreas protegidas más grandes y consolidadas, como pueden ser las ya mencionadas Parque Nacional Volcán Irazú, Parque Nacional Braulio carrillo y las Zonas Protectoras de los Cerros de la Carpintera y el Río Tiribí. Por el contrario, la baja contribución de ProtConn_Contig (40.16%) sugiere que la conectividad entre diferentes áreas protegidas es limitada.

Este patrón refleja un fenómeno bien documentado en los paisajes tropicales: las áreas protegidas se convierten en "islas" de habitat en un "mar" de matriz agrícola (principalmente pastos para ganadería y monocultivos), lo que genera un efecto de aislamiento que dificulta el flujo genético y la recolonización natural tras perturbaciones (Haddad et al., 2015). La muy baja contribución de la tierra no protegida (ProtConn_Unprot_land: 1.78%) confirma que la matriz agropecuaria dominante en el bosque húmedo estacional costarricense ofrece una alta resistencia al movimiento para la mayoría de las especies forestales, actuando como una barrera efectiva más que como un corredor.

El mapa de varProtConn puede ser muy útil para la planificación. Las áreas con los valores más altos (0.855 - 1.615) representan núcleos críticos de conectividad, asociados a las áreas protegidas más grandes (en especial el Parque Nacional Braulio Carrillo) y a los pocos corredores riparios (Zona Protectora Río Tiribí) o relieves que han escapado a la conversión agrícola (Zona Protectora de los Cerros de la Carpintera). Estos núcleos deben ser el foco de esfuerzos de conservación en la ecorregión.

Las zonas con valores intermedios (0.110 - 0.855) son las de mayor oportunidad para la restauración y la creación de corredores. Estas áreas, que a menudo conectan dos núcleos protegidos, son ideales para implementar esquemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA), una política emblemática de Costa Rica, para incentivar a los dueños de tierras a restaurar cobertura forestal y establecer cercas vivas, transformando la matriz en un paisaje más permeable (Hilje-Quesada & Calvo-Alvarado, 2020).

Las áreas con la conectividad más baja (<0.110) representan paisajes altamente degradados y aislados. Las estrategias aquí podrían centrarse en la conectividad a escala fina (por ejemplo, para insectos polinizadores o anfibios) mediante agroforestería y la protección de parches de bosque remanente, antes de aspirar a conectividad a gran escala.

CONCLUSIONES

- La red de áreas protegidas tiene una conectividad moderada-baja (11.08%), con una fuerte dependencia de las propias áreas protegidas en lugar de corredores naturales.
- Existe una alta proporción de terreno no protegido (80.93%), lo que limita la conectividad ecológica.
- La conectividad es irregular en el territorio, con algunas regiones bien conectadas y otras muy aisladas.
- Se necesitan medidas de conservación adicionales, como la creación de más corredores biológicos y la protección de áreas estratégicas para mejorar la conectividad y esfuerzos de restauración ecológica.

LITERATURA CITADA

- Calvo-Alvarado, J., McLennan, B., Sánchez-Azofeifa, A., & Garvin, T. (2009). Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context. *Forest Ecology and Management*, 258(6), 931–940. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.035>.
- Haddad, N. M. et al. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052.
- Hilje-Quesada, B., & Calvo-Alvarado, J. (2020). Program of Payments for Ecosystem Services in Costa Rica: A history of institutional learning and evolution. *Journal of Sustainable Forestry*, 39(3), 219-234.
- IUCN (2023). *Other Effective Area-based Conservation Measures: From Aichi Target 11 to the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework*. Gland, Switzerland.
- Janzen, D. H. (1983). *Costa Rican Natural History*. University of Chicago Press.
- LaRue, M. A., & Nielsen, C. K. (2008). Modelling potential dispersal corridors for cougars in midwestern North America using least-cost path methods. *Ecological Modelling*, 212(3-4), 372-381.
- Martínez-Harms, M. J., Saura, S., & Ureta, C. (2020). Makurhini: An R package for connectivity and conservation prioritization. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(8), 1022–1027. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13438>.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., ... Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2).
- Saura, S. et al. (2017). Protected area connectivity: Shortfalls in global targets and country-level priorities. *Biological Conservation*, 219, 53-67.

- Saura, S. et al. (2018). Importance of assessing protected area connectivity for the conservation of forest-dwelling species: The case of the Iberian lynx. *Journal for Nature Conservation*, 43, 93-103.
- Saura, S., & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83(2–3), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>.
- 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>.
- Zeller, K. A. et al. (2020). Are all data types and connectivity models created equal? A case study using tigers. *Landscape Ecology*, 35(11), 2513-2528.

MATERIAL ANEXO

```
library(ggplot2)
```

```
library(sf)
```

```
library(terra)
```

```
library(raster)
```

```
library(Makurhini)
```

```
library(RColorBrewer)
```

```
library(classInt)
```

```
library(dplyr)
```

```
# Cargamos los datos
```

```
APs <- read_sf("C:/Users/Hersson/Desktop/Final1/Areas_Protegidas.shp")
```

```
nrow(APs)
```

```
Ecorreg <-
```

```
read_sf("C:/Users/Hersson/Desktop/Final1/Ecorregiones_Biomas_Boscosos.shp")
```

```
# Hacemos un plot general para visualizar los datos
```

```
ggplot() +
```

```

geom_sf(data = Ecorreg, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
geom_sf(data = APs, aes(color = "Parches"), fill = "forestgreen", linewidth = 0.5) +
scale_color_manual(name = "", values = "black")+
theme_minimal() +
theme(axis.title.x = element_blank(),
      axis.title.y = element_blank())

```

Seleccionamos la ecorregion de nuestro interés

```
Ecorreg_31 <- Ecorreg[31,]
```

Estimamos el índice Protconn en la ecorregión seleccionada:

```

test <- MK_ProtConn(nodes = APs,
                    region = Ecorreg_31,
                    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)

```

test\$`Protected Connected (Viewer Panel`

Estimamos la contribución individual de cada AP en la ecorregión:

```

test2 <- MK_ProtConn(nodes = APs,
  region = Ecorreg_31,
  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)

```

```

test2$ProtConn_Delta

```

```

#

```

```

dProtConn <- test2$ProtConn_Delta

```

```

# Calcular los intervalos de Jenks para strength

```

```

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

```

```

# Creamos una nueva variable categórica con los intervalos

```

```

dProtConn2 <- dProtConn %>%

```

```

  mutate(varProtConn_q = cut(varProtConn,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))

```

```

# Graficamos en ggplot2 usando las clases Jenks

```

```
ggplot() +  
  geom_sf(data = Ecorreg_31, 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)  
  )
```

```
names(dProtConn)
```

```
head(dProtConn)
```