



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA



**ENFOQUES, MÉTODOS Y HERRAMIENTAS PARA EL ESTUDIO DE LA CONECTIVIDAD  
ECOLÓGICA**

**TRABAJO FINAL**

---

Conectividad ecológica en parches de bosque *caatinga*, Parque  
Nacional da Serra da Capivara, Brasil, usando Makurhini

---

**Elaborado por: Isabella Castellón**

**Docente: Oscar Godínez Gómez**

---

## Contenido

Introducción	1
Metodología	2
Área de estudio	2
Análisis estadístico	2
Configuraciones y parámetros usados	2
Índices seleccionados	2
Resultados	4
Parches de bosque Caatinga	4
Índice de fragmentación	4
Índice de centralidad	6
Índice de probabilidad de conectividad PC, dPC y sus fracciones	7
Índice ECA	9
Índice ProtConn	9
Discusión	11
Conclusión	12
Referencias bibliográficas	13

## Introducción

La capacidad de un paisaje para permitir el movimiento e intercambio de recursos entre parches se denomina conectividad del paisaje. (Saura y Pascual-Horta, 2007). Para que un ecosistema se mantenga a flote, es necesario que exista un flujo constante de organismos, materia, energía e información entre paisajes (Correa et al, 2016). Es por esto que, en la última década, los estudios concernientes a conectividad del paisaje han tomado relevancia, pues responden a la necesidad de comprender las dinámicas en los ecosistemas para su conservación

La conectividad ecológica es un componente esencial en la conservación de la biodiversidad, especialmente en paisajes fragmentados donde la continuidad de los hábitats naturales se ve comprometida por actividades humanas(Correa et al, 2017). En este contexto, el presente trabajo se enfoca en evaluar la conectividad ecológica de los parches de bosque caatinga dentro del Parque Nacional da Serra da Capivara, ubicado en el noreste de Brasil. Esta región, caracterizada por su vegetación xerófila y su riqueza biológica, enfrenta crecientes amenazas derivadas del cambio de uso del suelo, la deforestación y la presión antrópica.

Utilizando el paquete Makurhini en el software R, se aplicaron diversos índices de conectividad y fragmentación para analizar la estructura del paisaje y su funcionalidad ecológica. Entre los índices

seleccionados se encuentran el porcentaje de área núcleo, el índice de centralidad de intermediación (BWC), el índice de probabilidad de conectividad (PC) y sus fracciones, el índice de área conexa equivalente (ECA) y el índice ProtConn, que evalúa la conectividad de las áreas protegidas.

**Preguntas de investigación:**

¿Qué nivel de fragmentación enfrentan los hábitats de Caatinga según un umbral de dispersión de 10 km?

¿Qué parches en el paisaje demuestran una mayor contribución en la centralidad del paisaje, y cuál es su contribución particular?

¿Qué parches en el paisaje son esenciales para la conectividad total del paisaje y mantiene el flujo de dispersión de fauna?

¿Cuál es el área conexa equivalente del paisaje?

¿Cuál es el estado de protección y conectividad de las áreas protegidas en una ecorregión boscosa de Latinoamérica?

## Metodología

### Área de estudio

Los datos geoespaciales seleccionados para este trabajo corresponden a parches de bosques de *Caatinga* presentes en el Parque Nacional da Serra da Capivara, en el estado de Piauí, noreste de Brasil.

Los bosques de caatinga se desarrollan en zonas semiáridas de Brasil. Se caracterizan por tener una temperatura media anual de 27°C, con precipitaciones entre 250-900 mm al año. La vegetación se caracteriza por ser mayormente xerófila, con una fisiología adaptada a la escasez de recurso hídrico. (Silva et al, 2018).

El parque Nacional da Serra da Capivara fue creado con el fin de conservar la rica flora y fauna de la zona. Se han registrado 615 especies vegetales, 33 especies de mamíferos no quirópteros, como el puma o el tapir, 24 especies de murciélagos, 175 especies de aves, 25 especies de anfibios y 39 de reptiles.

El Parque fue declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO. Destaca por su importancia en la conservación de la biodiversidad, contribución al conocimiento científico y turismo sostenible. (ICMBio, 2019).

### Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en el software R. Consiste en un software de programación de código abierto orientado al análisis estadístico computacional (R, 2025). Para la aplicación de índices de fragmentación y conectividad se empleó el paquete Makurhini. Makurhini, que significa “conectar” en purépecha, es un paquete de R cuyo propósito principal es el de evaluar la conectividad del paisaje en diferentes circunstancias y momentos. Es una herramienta útil para el monitoreo de metas globales de conservación y la gestión del paisaje. (Godínez et al, 2025).

### Configuraciones y parámetros usados

Para todos los índices seleccionados, se usó una distancia de dispersión de 10 km, que corresponde a la distancia media de dispersión para mamíferos grandes terrestres. Mamíferos grandes como el Puma o el Tapir se encuentran en los ecosistemas del Parque Nacional da Serra da Capivara, por lo que la distancia de dispersión seleccionada es conveniente en dicho contexto. Para la función MK\_Fragmentation, se escogió un área mínima de nodo de 100 km y una distancia de borde de 500 metros. Para la función MK\_dIICPC se usó una probabilidad de 0.5 para todos los casos. Para la función MK\_ProtConn se seleccionó una distancia transfronteriza de 50 km.

### Índices seleccionados

#### Índice de fragmentación (porcentaje de área núcleo)

Se seleccionó con el fin de identificar la densidad del área núcleo en los parches de caatinga. Un porcentaje de área núcleo alto sugiere parches mejor conservados, y por lo tanto, importantes en la conservación

### **Índice de centralidad (BWC)**

Se escogió el índice de centralidad de intermediación (BWC), que mide cuántas veces un nodo se encuentra en las rutas más cortas entre otros nodos. Este índice permite identificar nodos que actúan como *stepping stones* en el paisaje, lo cual ayuda al desplazamiento de especies.

### **Índice de Probabilidad de Conectividad (PC), dPC, dPCintra, dPCfluz, dPCconnector**

El índice PC es definido como la probabilidad de que dos animales, ubicados aleatoriamente en el paisaje, se encuentren en parches que sean alcanzables desde el parche del otro, dado un grupo de parches  $n$  y la conexión entre ellos. (Saura y Pascual, 2007).

El **delta PC** (dPC) mide la contribución de cada parche individual a la conectividad del paisaje

La fracción **intra** calcula el aporte a la conectividad de cada nodo

La fracción **flux** mide el flujo de dispersión entre nodos

La fracción **connector** ayuda a detectar *stepping stones*

### **Índice de área conexa equivalente (ECA)**

El índice ECA se define como el área de un único parche totalmente conectado (con probabilidad de conexión 1), que tendría el mismo valor de conectividad que el paisaje real. (Saura *et al*, 2011).

Es un índice muy útil para calcular la conectividad total del paisaje, ya sea en distintos períodos de tiempo o bajo diferentes configuraciones espaciales. Asimismo, permite calcular el cambio de conectividad bajo distintos umbrales de dispersión. Para este trabajo, se calculó el ECA usando la función MK\_dIICPC, puesto que no se realizaron comparaciones entre años o entre posibles escenarios, la función MK\_dECA no fue necesaria

### **Índice Protected Connected (ProtConn)**

El índice ProtConn se define como el porcentaje de un país o región cubierto por áreas protegidas (APs), tomando en cuenta su conectividad. ProtConn considera la conectividad intra-APs e inter-APs. (Saura *et al*, 2018).

Puede ser de gran utilidad al momento de crear y ejecutar planes de manejo de áreas protegidas, así como para evaluar la calidad de las conexiones entre áreas protegidas en un país o región.

## Resultados

### Parches de bosque Caatinga

Luego de abrir las librerías necesarias, se crearon los objetos que contienen los parches y el paisaje de estudio. El objeto “bosque\_caatinga” contiene un shp que guarda 683 parches de bosque en un paisaje con un área de 528792.96 hectáreas

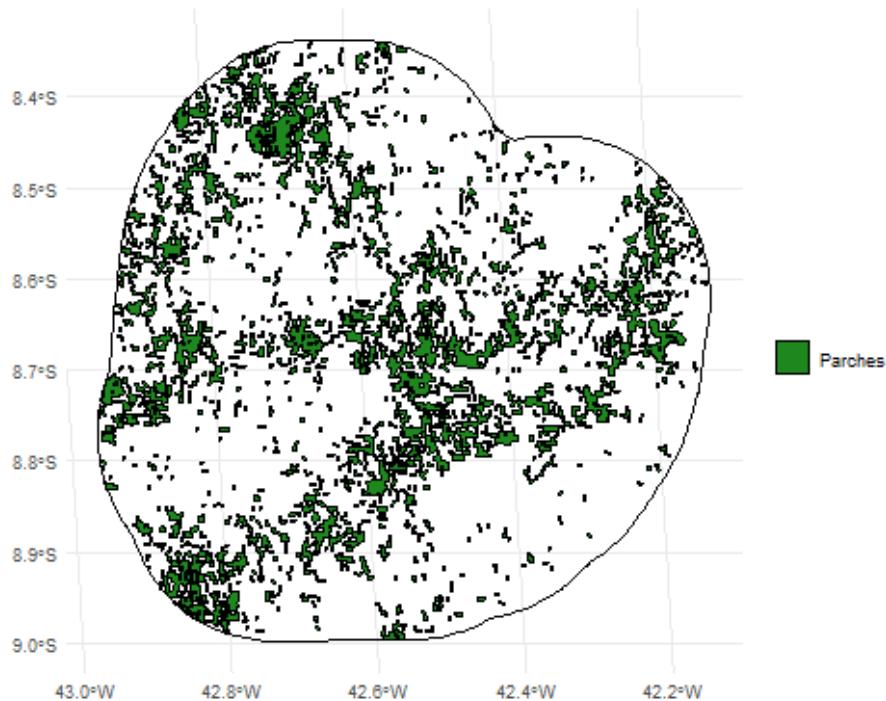
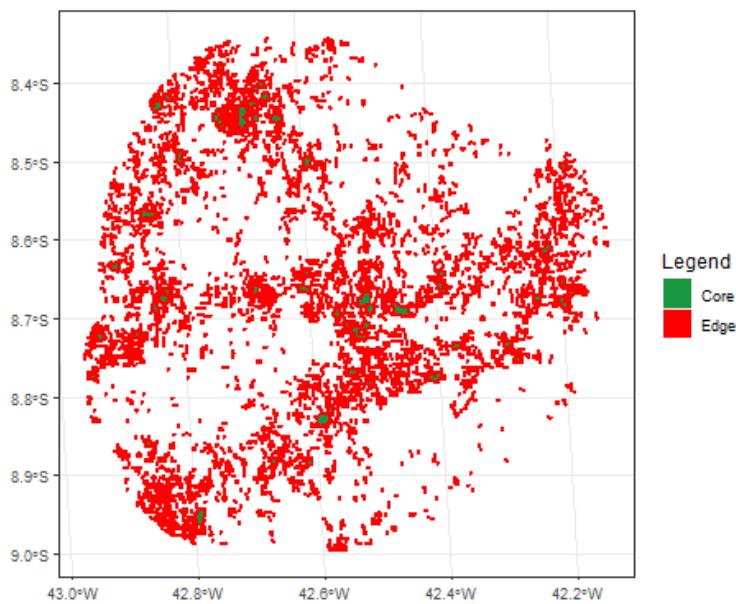


Figura 1. Parches de bosque de Caatinga

### Índice de fragmentación

Se aplicó la función MK\_Fragmentation con los parámetros antes mencionados. Se obtuvo como resultado un plot que muestra el área de borde en color rojo y el área núcleo en color verde. (Figura 2). A simple vista puede observarse que gran parte de los parches se encuentra consumido por el borde, es decir, que carecen de área núcleo. El segundo resultado fue una tabla con los estadísticos a nivel de paisaje. Los parches ocupan un área de 86670 ha del área total del paisaje, siendo el tamaño medio de los parches de 126.89 km<sup>2</sup>. Entre las métricas más destacables tenemos *Cority*, cuyo valor oscila entre 0 y 1, y mide la densidad del área núcleo total en el paisaje, entre más cercano sea el valor a 1, mayor densidad de área núcleo. En este caso, el valor es de 0.0337, lo que indica la densidad de área núcleo en el paisaje es bastante baja (figura 3).

**Figura 2. Borde y área núcleo en los parches de caatinga**

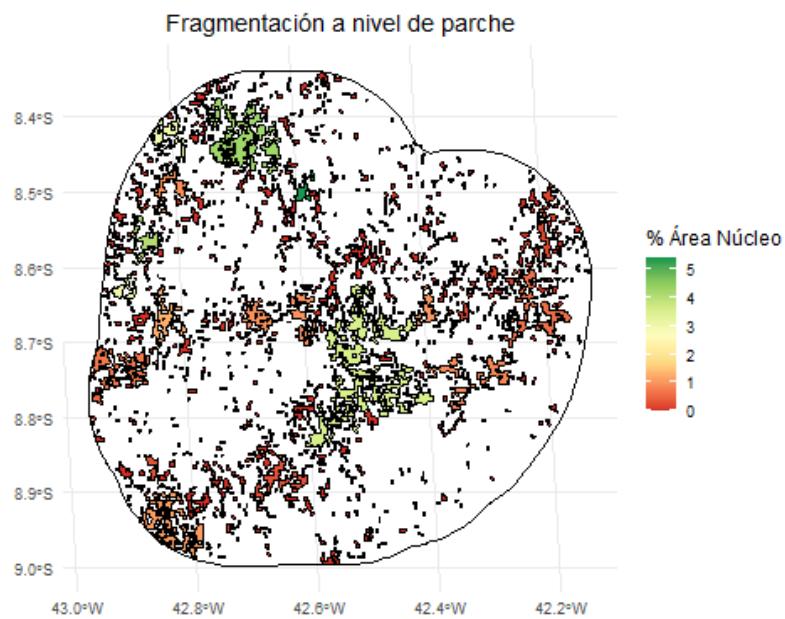


**Figura 3. Estadísticos de fragmentación a nivel de paisaje**

Metric	Value
Patch area (ha)	86670.1275
Number of patches	683.0000
Size (mean)	126.8962
Patches < minimum patch area	582.0000
Patches < minimum patch area (%)	20.1907
Total edge	4692.4460
Edge density	0.0541
Patch density	0.1292
Total Core Area (ha)	1073.9128
Cority	0.0337
Shape Index (mean)	0.1588
FRAC (mean)	0.5811
MESH (ha)	524.8658

Entre los estadísticos a nivel de parche se seleccionó el porcentaje de área núcleo debido a su facilidad de interpretación. Se graficó el plot usando ggplot2 y RColorBrewer. Como resultado se obtuvo un mapa que muestra el porcentaje de área núcleo, siendo el color rojo 0% de área núcleo, y el valor máximo de 5% se representa por color verde. En la gráfica podemos observar que la gran mayoría de parches en el paisaje tienen un área núcleo por debajo del 5%, lo que indica un deterioro notable en los hábitats.

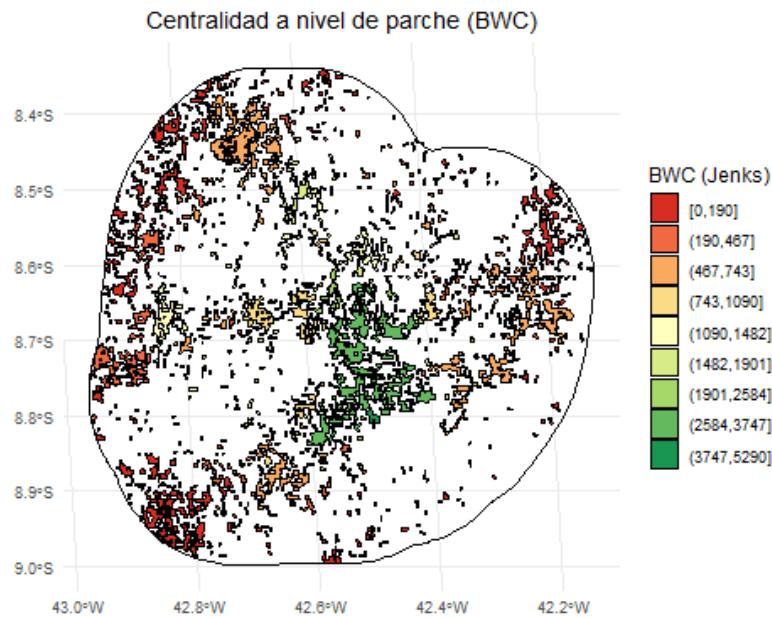
**figura 4. Porcentaje de área núcleo**



### Índice de centralidad

Se aplicó la función de MK\_RMCentrality siguiendo los parámetros indicados. Como resultado se obtuvo un shapefile con las métricas de centralidad de los parches. Se seleccionó el índice de centralidad de intermediación BWC para identificar *stepping stones* en el paisaje, que representan parches claves para la conservación y la conectividad. En este caso, el plot se realizó usando las clases jenks (figura 5). En el mapa se puede observar que los parches centrales, coloreados con verde, son los que juegan el papel de corredores en el paisaje.

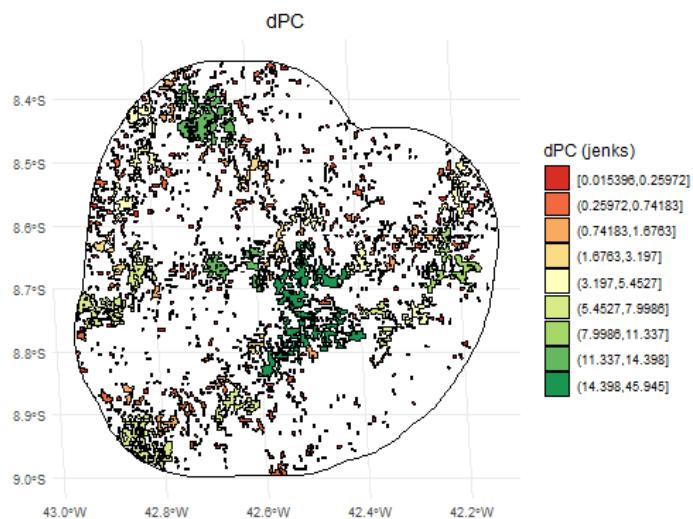
**Figura 5. Índice de centralidad de intermediación.**



### Índice de probabilidad de conectividad PC, dPC y sus fracciones

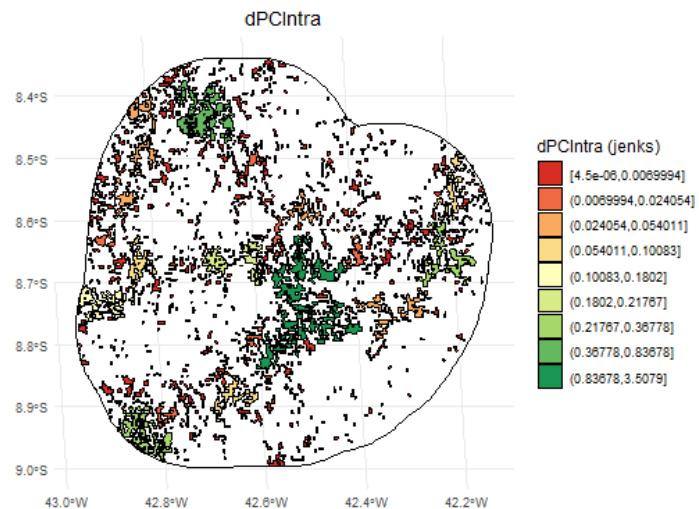
Continuando con los análisis, se usó la función MK\_dIICPC para calcular el índice PC, delta PC y sus fracciones. Como resultado se obtuvo un shapefile con los índices y fracciones. Para graficar los resultados se usaron la clase jenks. El primer resultado, el delta PC muestra los valores más altos para los parches ubicados en la zona superior izquierda y central. Estos nodos se encuentran bastante cerca unos de otros, por lo que, tomando en cuenta la distancia de dispersión aplicada, animales como el Tapir o el Puma podrían acceder a los parches ubicado en esa zona desde otro parche sin mucha dificultad, esto nos indica que se encuentran bastante conectados entre sí, y que además aportan gran parte de la conectividad global del paisaje. (figura 6).

**figura 6. Delta PC**

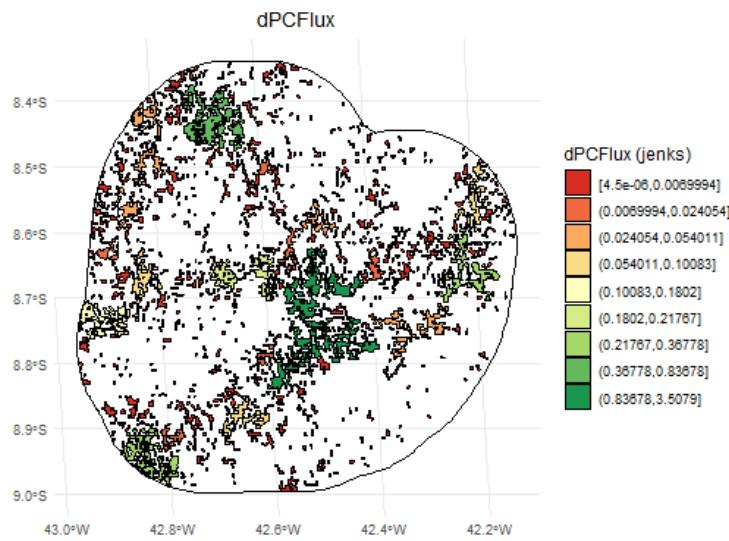


La fracción intra y flux mostraron resultados idénticos para todos los parches del paisaje. Al igual que en el delta PC, los parches de la zona central y superior izquierda muestran los valores más altos en el aporte a la conectividad y en el flujo de dispersión de la fauna. Los parches más pequeños, que en el delta PC aparecen de colores verde claro, se representan con colores naranjas y rojizos para las fracciones flux e intra. Esto podría indicarnos que por su posición en el paisaje no son parches muy adecuados para el flujo de materia general del paisaje y por lo tanto, su contribución a la conectividad desde un punto de vista funcional es menor.

**Figura 7. dPCintra**

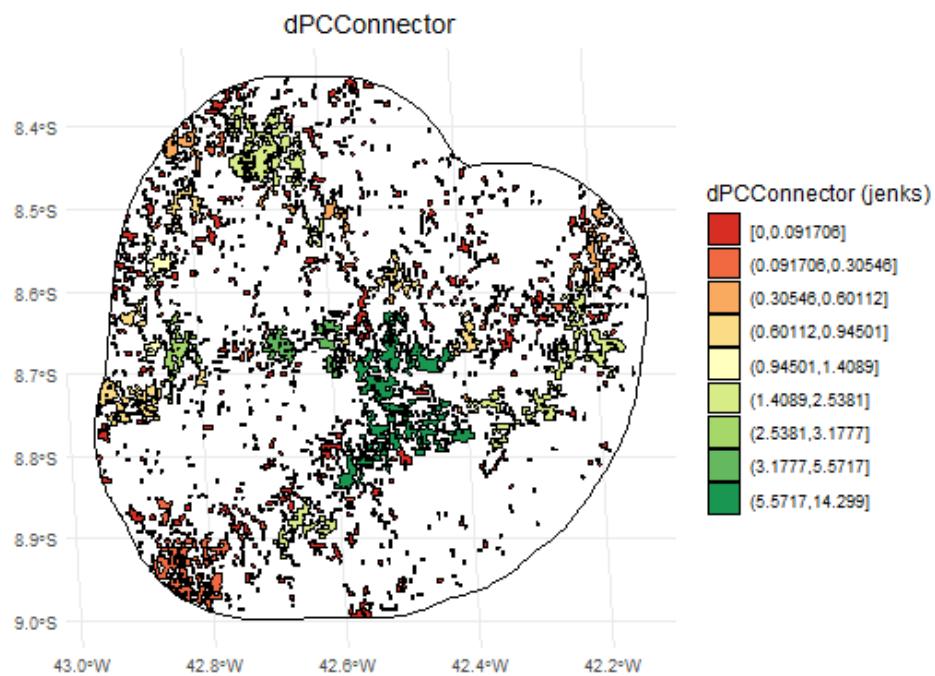


**Figura 8. dPCfLux**



Finalmente, la fracción dPCconnector nos muestra que los parches ubicados en la zona central son los que mejor actúan como stepping stones, lo que coincide con el resultado obtenido aplicando el índice BWC.

**Figura 9. dPCconnector**



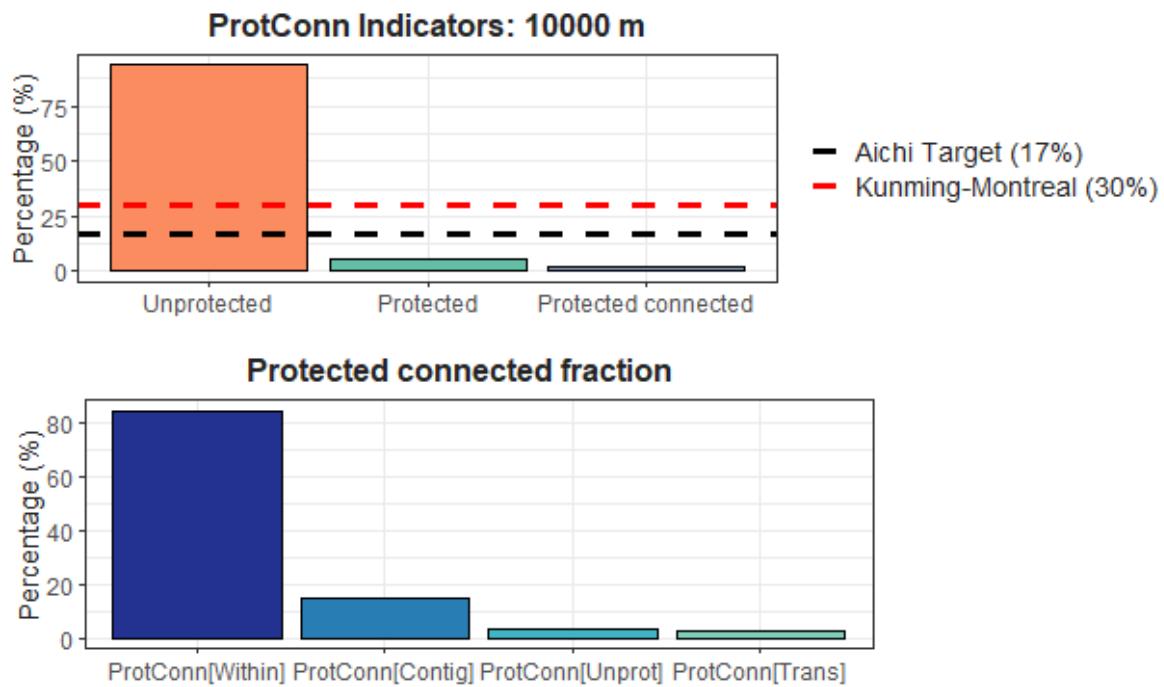
### Índice ECA

Para este estudio se usó la función MK\_DIICPC para la estimación del índice ECA, pues no se carece de datos para realizar comparaciones entre variaciones en el paisaje. Como resultado se obtuvo que 66900.36 hectáreas del paisaje se encuentran conectadas de forma eficiente. Se transformó el valor de ECA al ECA normalizado, y se obtuvo que la zona del paisaje que se encuentra conectado equivale al 12.65% del área total.

### Índice ProtConn

Se usó la función MK\_ProtConn para estimar el área protegida y conservada en solo una ecorregión de bioma boscoso latinoamericano. El primer test muestra que tan solo el 2.3% de la región se encuentra protegida y conectada; las zonas protegidas mas no conectadas equivalen al 3.5% del área total de la ecorregión. Con respecto a las metas de conservación propuestas por Aichi Target y Kunming-Montreal, los resultados se encuentran significativamente por debajo de los valores considerados ideales. (figura 10).

**figura 10. Porcentaje de reservas naturales protegidas y conectadas**



## Discusión

Los resultados obtenidos en las métricas de fragmentación a nivel de parche y paisaje en los hábitats de bosque de caatinga evidencian un alto grado de fragmentación en el paisaje. El mapa de la figura 2 muestra una gran incidencia de borde en los parches del paisaje. Como consecuencia, puede que la gran mayoría de los parches no cuenten con la capacidad para proveer condiciones adecuadas para el mantenimiento de la biodiversidad dentro de los ecosistemas. El valor de la métrica *Cority* muestra una densidad muy baja de área núcleo total del paisaje. El área núcleo es el área del parche que mejor contiene los procesos originales del ecosistema, por lo que un parche con mayor área núcleo será un parche más funcional y mejor conservado (Isaacs-Cubides et al., 2015). La densidad tan baja que presentan los parches de caatinga en el paisaje de estudio pueden tener repercusiones negativas muy marcadas en la conservación de la vida silvestre de la matriz.

En cuanto al índice de centralidad de intermediación BWC, los parches en el centro del paisaje obtuvieron los valores más altos (figura 5), por lo que se supone que son los parches más recorridos por la fauna silvestre, por lo que juegan un rol como stepping stones dentro del paisaje. Esto puede deberse a la cercanía de dichos parches entre sí, otro factor influyente puede ser que los parches centrales son los parches que concentran el mayor porcentaje de área núcleo en el paisaje, por lo que son más aptos para albergar vida silvestre. Estos resultados se consolidan al aplicar los índices PC, delta PC y sus fracciones, pues los parches centrales son los señalados como más conectados y viables para el flujo de materia y dispersión de especies en el paisaje.

En cuanto a la conectividad total del paisaje, el índice de Área Conexa Equivalente ECA mostró que tan solo 66,900.36 hectáreas de las 528,792.96 ha de paisaje se encuentran conectadas, equivalentes a un 12.65% del área total. Esto deja en evidencia el bajo grado de conectividad del paisaje, que podría estar afectando de manera negativa a las dinámicas eco sistémicas, poniendo en riesgo toda la biodiversidad presente en el área de estudio.

En las últimas décadas, el bosque de caatinga ha sido mermado significativamente debido a la actividad humana, como la ganadería intensiva, la agricultura y la deforestación indiscriminada. Araujo et al (2023) encontraron que solo el 11.04% de la vegetación nativa de caatinga persiste en la región. Como consecuencia de la pérdida dramática de cobertura vegetal por el cambio de uso del suelo, la región es más propensa a sufrir los efectos del cambio climático, por lo que su resiliencia a fenómenos climáticos extremos como El Niño es cada vez menor.

Los resultados obtenidos muestran la necesidad urgente de tomar acciones concretas para frenar la degradación de la caatinga, único en el mundo. El aumento de la fragmentación, la pérdida de conectividad y el cambio de uso del suelo amenaza con acabar con la gran diversidad que alberga este ecosistema brasileño.

## Conclusión

- Los índices de fragmentación a nivel de parche y a nivel de paisaje mostraron que gran parte de los parches carece de un área núcleo significativa, y que la densidad de la misma a nivel del paisaje es escasa, con un valor de 0.0337%
- El índice de centralidad de intermediación sugiere que los parches ubicados en el centro del paisaje se encuentran bien conectados con respecto al umbral de distancia seleccionado. Dicho resultado subraya la importancia de esos parches como zonas de paso para la fauna silvestre}
- El índice PC y sus fracciones mostraron que, además de los parches centrales, los parches en ubicados en la parte superior izquierda cumplen funciones significativas para la conectividad funcional, pues permiten el flujo de materia y dispersión de especies.
- El índice ECA mostró que el 12.65% del área total del paisaje se encuentra conectado
- Con respecto a las ecorregiones boscosas y las áreas protegidas, el índice ProtConn muestra resultados alarmantes para la conectividad y la protección de los biomas boscosos de la zona. Los bajos niveles en el resultado del Prot (3%) y ProtConn (2%) con respecto a las metas internacionales sobre conectividad y conservación, nos advierten sobre la necesidad de tomar acciones más contundentes para ampliar la cantidad de áreas protegidas conectadas y conservadas.

## Referencias bibliográficas

- Araujo, H. F. P., Canassa, N. F., Machado, C. C. C., & Tabarelli, M. (2023). Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. *Scientific Reports*, 13(18440). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45571-9>
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Pérez Salicrup, D. R. (2016). Habitat connectivity in biodiversity conservation: A review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography*, 40(1), 7–37. <https://doi.org/10.1177/0309133315598713>
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Pérez Salicrup, D. R. (2017). Anthropogenic impact on habitat connectivity: A multidimensional human footprint index evaluated in a highly biodiverse landscape of Mexico. *Ecological Indicators*, 72, 895–909. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.007>
- Godínez-Gómez, O., Correa-Ayram, C., Goicoechea, T., & Saura, S. (2025). Makurhini: An R package for comprehensive analysis of landscape fragmentation and connectivity. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6398746/v1>
- ICMBio. (2019). Plano de manejo do Parque Nacional da Serra da Capivara. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. [https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/caatinga/lista-de-ucs/parna-da-serra-da-capivara/arquivos/plano\\_de\\_manejo\\_parna\\_da\\_serra\\_da\\_capivara.pdf](https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/caatinga/lista-de-ucs/parna-da-serra-da-capivara/arquivos/plano_de_manejo_parna_da_serra_da_capivara.pdf)
- Isaacs-Cubides, P., Ariza, A., Calle, Z., Carvajal, M., Giraldo, A. M., Pizano, C., Curiel Yuste, J., González-M., R., Avella, A., Díaz-Triana, J. E., Jiménez-Carmona, E., Domínguez-Haydar, Y., Henao, N., Zabala, G., Escobar, S., Armbrecht, I., Chacón de Ulloa, P., Cultid-Medina, C. A., Medina, C. A., Urbina-Cardona, J. N., Díaz-Pulido, A., Aguilar-Garavito, M., Pérez-Torres, J., & Solari, S. (2015). Plataformas de monitoreo: paisaje, grupos sociales, suelo, vegetación y fauna. En M. Aguilar-Garavito & W. Ramírez (Eds.), *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres* (pp. 50–176). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- R Core Team (2025). *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Saura, S., Bertzky, 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>
- Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C. y Rodríguez-Freire, M. (2011). Network analysis to asses landscape connectivity trends: Application to European forest (1990-2000). *Ecological Indicators*, 11, 407-416.

Saura, S. y Pascual-Horta, 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, 91-103

Silva de Lucena, M., Rocha Alves, A., & Alves Bakke, I. (2018). Parámetros estructurales de la vegetación arbóreo-arbustiva del bioma Caatinga sometida a sistemas silviculturales en la región semiárida de Brasil. *Bosque (Valdivia)*, 39(3), 385-395.  
<https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002018000300385>