

Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

“RELACIÓN ENTRE LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DEL PAISAJE Y EL CAUDAL BASE EN CUENCA CENTRO SUR DE CHILE”

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

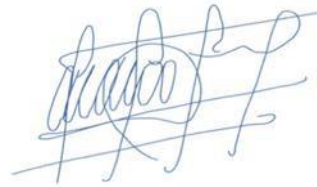
Edras Oliva Hidalgo

Profesores guía:

Dr. Mauricio Aguayo

“RELACIÓN ENTRE LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DEL PAISAJE Y EL CAUDAL BASE EN CUENCA CENTRO SUR DE CHILE”

Profesor Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias



Profesor Comisión: Dra. Alberto Araneda Castillo



Profesor Comisión: Dr. Ricardo Figueroa Jara



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MAXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2026

Índice

Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	10
Agradecimiento	12
Resumen.....	14
I. Introducción.....	16
1. Pregunta de investigación.....	18
2. Objetivo general	18
3. Objetivos específicos	18
II. Antecedentes.....	19
1. Configuración espacial y dinámica hidrológica del paisaje.....	19
1.1 Diferenciación entre composición y configuración.....	19
2. Procesos hidrológicos y cobertura de suelo.....	20
2.1 Dinámica del caudal base y su importancia ecológica.....	20
2.2 Dinámica del ciclo hídrico y su relación con la cobertura del suelo.....	21
2.3 Evidencia regional y brechas en el estudio de la configuración espacial.....	22
2.4 Contexto hidroclimático de las regiones centro-sur.....	22
2.4.1 Variabilidad climática y Megasequía en el centro sur de Chile (1988-2020).....	22
2.4.2 Resiliencia hídrica y vulnerabilidad de las cuencas ante el déficit pluviométrico	23
2.5 Fundamentos de la ecología del paisaje y cuantificación hidrológica.....	24
2.5.1 Las métricas del paisaje como indicadores de la dinámica hídrica.....	24

2.5.2	Definición de métricas de paisaje seleccionadas	24
2.	Fuentes de información y recolección de dato	32
3.	Procesamiento hidrológico de series de caudal	34
3.1	Tratamiento de series hidrológicas mediante programación en R.	34
3.2	Justificación de segmentación temporal y ventanas de observación.....	35
4.	Procesamiento geoespacial en QGIS	37
4.1	Preparación y tratamiento de la información espacial en QGIS.....	37
5.	Cuantificación del paisaje con FRAGSTATS v4.2.....	39
5.1	Fundamentos y aplicación de métricas del paisaje en FRAGSTATS.	39
5.2	Parámetros de implementación técnica (Batch Processing y Reglas de vecindad).	40
5.3	Calibración científica del Edge Depth.....	41
5.4	Parametrización de la Matriz de Contraste de Borde.	44
5.5	Niveles de métricas (Landscape, Class, Patch).	45
6.	Integración y análisis estadístico en R.	46
6.1	Preparación, integración y estructuración de datos en R.	46
6.2	Consolidación de bases de datos y coherencia temporal.....	46
6.3	Preparación, limpieza y estandarización de variables.	47
6.4	Tratamiento de redundancia y selección de variables.	49
6.5	Pruebas estadísticas y análisis de correlación (Spearman).....	52
6.6	Modelación de tendencias y visualización multivariada.....	54
IV.	Resultados y discusión	56
1.	Caracterización general de las unidades de análisis.....	56
1.1	Descripción geográfica de las unidades de análisis.....	58
2.	Depuración y selección de métricas del paisaje (Objetivo 1 - Fase 1).....	61

2.1	Análisis de redundancia mediante matriz de Pearson:	61
3.	Comportamiento espaciotemporal de la cobertura de suelo (Objetivo 1 - Fase 2) ...	71
3.1	Evolución estructural por periodo (1988–2020)	71
4.	Relación entre la configuración espacial y el caudal base (Objetivo 2)	80
4.1	Evaluación de normalidad hidrológica y espacial:	80
4.2	Panorama general de correlaciones espacio-hidrológicas	82
4.3.1	Plantaciones Forestales: El efecto del monocultivo continuo	86
4.3.2	Bosque Nativo: Corredores riparios y formas irregulares	87
4.3.3	Áreas Agrícolas: Dinámicas de riego y geometría	88
5.	Discusión de resultados	90
5.1	La homogenización del paisaje y el agravamiento de la escasez hídrica	90
5.2	Comportamiento complementario a escala anual e invernal	91
5.3	El rol mitigador del bosque nativo y la importancia de la forma	91
5.4	Síntesis funcional: El modelo del "Mosaico Hidrológico"	92
V.	Conclusiones	93
VI.	Contribución a los ODS	95
VII.	Glosario	96
VIII.	Referencia bibliográfica	99
IX.	Anexo	104
Anexo 1		104
Anexo 2		105
Anexo 3		106
Anexo 4		110
Anexo 5		115
Anexo 6		116

Anexo 7.....	118
Anexo 8.....	119
Anexo 9.....	124
Anexo 10.....	125
Anexo 11: Figuras de trayectoria individual temporal por cuenca hidrográfica y métrica espacial.....	127
Anexo 12: Análisis de componentes principales (PCA) preliminar: Círculo de correlaciones de la totalidad de métricas de paisaje	134

Índice de figuras

- Figura 1: Localización del área de estudio y delimitación de las 24 cuencas hidrográficas seleccionadas en el centro-sur de Chile.31
- Figura 2. Diagrama de flujo metodológico para la relación entre configuración espacial del paisaje y caudal base. Se detallan las ramas de procesamiento hidrológico (azul) y geoespacial (verde), junto con las etapas de integración y análisis estadístico multivariado.....33
- Figura 3. Análisis de sensibilidad temporal y espacial del Área Núcleo (CORE) ante variaciones en la profundidad de borde. La evaluación comparativa entre los periodos 1988-1998 y 2016-2018 permitió justificar la adopción metodológica del umbral de 200 m.43
- Figura 4. Análisis exploratorio y justificación del estadístico de correlación. La evidencia de asimetría en la distribución de los datos hidro-espaciales y la presencia de relaciones monótonas no lineales sustentan la elección del coeficiente no paramétrico de Spearman por sobre aproximaciones paramétricas tradicionales.53
- Figura 5. Matriz de correlación de Pearson para las métricas del paisaje. Los tonos rojizos indican correlaciones positivas fuertes, mientras que los tonos azulados representan correlaciones negativas. Las asociaciones críticas ($r > 0.80$) justificaron la exclusión de métricas redundantes.63
- Figura 6. Ordenación espacial del paisaje mediante Análisis de Componentes Principales (PCA). > Distribución de las cuencas según cobertura (Bosque Nativo, Plantaciones Forestales y Áreas Agrícolas) en función de las principales métricas estructurales. El primer eje (Dimensión 1) ilustra un gradiente de fragmentación impulsado por la División y la Cohesión, mientras que el segundo eje (Dimensión 2) está traccionado por la diversidad (Índice de Shannon) y complejidad del parche. Las elipses indican el nivel de confianza del 95% por clase68
- Figura 7. Trayectoria temporal de la diversidad del paisaje (1988-2020). Evolución del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) a nivel de paisaje. Se observa el punto de inflexión cercano a 2008 y la posterior estabilización del territorio en niveles de menor diversidad y mayor homogeneización estructural hacia el año 202074
- Figura 8. Evolución espacio-temporal desagregada del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) para las 24 cuencas de estudio (1988-2020). Los paneles individuales demuestran

la caída generalizada de la diversidad estructural del paisaje a lo largo de las últimas tres décadas, independientemente de los niveles de heterogeneidad inicial de cada cuenca.

-75
- Figura 9. Trayectorias de configuración espacial según clase de cobertura (1988-2020). Distribución de las métricas de Densidad de Parches (PD), Índice de División, Proximidad Media (PROX_MN), Cohesión Física y Complejidad Geométrica (SHAPE_MN) para Agricultura (amarillo), Bosque Nativo (verde) y Plantaciones Forestales (café). Los diagramas evidencian el profundo contraste estructural entre la fragmentación del bosque frente a la consolidación de bloques forestales masivos.....79
 - Figura 10. Diagramas de caja de los regímenes de caudal medio anual, estival e invernal, para la evaluación de la normalidad de los datos con respecto períodos desde el año 1988 a 2020, a escala logarítmica81
 - Figura 11. Síntesis de las correlaciones espaciales e hidrológicas mediante el estadístico de Spearman (Rho). El mapa de calor contrasta el impacto de la estructura de las distintas coberturas vegetales (BN, AGR, PFT) sobre la disponibilidad hídrica estacional en las 24 cuencas de estudio.....85
 - Figura 12. Panel de regresión local (LOESS) que ilustra la influencia empírica de la configuración espacial sobre el caudal base de verano (eje Y en escala logarítmica). Se contrastan tres métricas estructurales (Densidad de Parches, Complejidad de Forma y Aislamiento) a través de las coberturas de Plantaciones Forestales, Bosque Nativo y Uso Agrícola, evidenciando el efecto diferenciado de la fragmentación y la conectividad en la disponibilidad hídrica estival.89
 - Figura 13: Trayectorias temporales del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) a escala de paisaje (Landscape)128
 - Figura 14: Trayectorias temporales de la Complejidad de Forma (SHAPE_MN) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).....129
 - Figura 15: Trayectorias temporales de la Proximidad Media (PROX_MN) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).130
 - Figura 16: Trayectorias temporales de la Densidad de Parches (PD) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).....131
 - Figura 17: Trayectorias temporales del Índice de División (DIVISION) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).....132

- Figura 18: Trayectorias temporales del Índice de Cohesión (COHESION) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).133
- Figura 19: Análisis de componentes principales (PCA) preliminar: Círculo de correlaciones de la totalidad de métricas de paisaje.....134

Índice de tablas.

• Tabla 1. Descripción y fundamentación de las métricas de paisaje en niveles de Paisaje, Clase y Parche.	26
• Tabla 2: Caracterización geográfica e hidroclimática de las cuencas de estudio.	27
• Tabla 3: Definición de las ventanas temporales de observación (1987-2020)	36
• Tabla 4. Matriz de pesos de contraste de borde utilizada para el cálculo de métricas en FRAGSTATS.....	44
• Tabla 5.. Set preliminar de métricas del paisaje evaluadas y su dimensión ecológica asociada.....	50
• Tabla 6. Composición porcentual promedio de las coberturas de suelo en los periodos clave del estudio.....	57
• Tabla 7. Caracterización geográfica e hidrológica de las unidades de análisis (Estaciones Fluviométricas).....	58
• Tabla 8. Criterios de depuración y selección de métricas representativas según análisis de colinealidad	64
• Tabla 9. Contribución porcentual de las métricas de paisaje a los componentes principales (Dim. 1 y Dim. 2).....	67
• Tabla 10. Síntesis ecológica e hidrológica de las métricas de paisaje seleccionadas. ..	70
• Tabla 11. Escala de interpretación ecológica del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI).	72
• Tabla 12. Análisis de fase de evolución de SHDI	73
• Tabla 13. Interpretación de métricas de configuración espacial	77
• Tabla 14. Coeficientes de correlación de Spearman (Rho) y nivel de significancia (p-value) entre las métricas de paisaje y los caudales base. (Nota: Solo se muestran relaciones significativas con $p < 0,05$).	84
• Tabla 15: Contribución a las ODS.....	95
• Tabla 16: Autovalores y varianza explicada del Análisis de Componentes Principales (PCA)	104
• Tabla 17: Estadísticos descriptivos de métricas a nivel Landscape	105
• Tabla 18: Estadísticos descriptivos de métricas a nivel Class.....	106
• Tabla 19: Estadísticos descriptivos de métricas a nivel Parche (Patch).	110
• Tabla 20: Resultados del coeficiente de Spearman (Rho) para la cobertura Agrícola	

(AGR).....	115
• Tabla 21: Resultados del coeficiente de Spearman (Rho) para la cobertura de Plantaciones Forestales (PFT).	116
• Tabla 22: Resultados del coeficiente de Spearman (Rho) para la cobertura de Bosque Nativo (BN).....	118
• Tabla 23: Síntesis completa de correlaciones significativas de Spearman por cobertura.	119
• Tabla 24: Coordenadas factoriales de las variables del Análisis de Componentes Principales (PCA)	124
• Tabla 25: Resultados de sensibilidad del Edge Depth.....	125

Agradecimiento

En primer lugar, debo reconocer que escribir este apartado no era algo que imaginaba que fuera tan difícil, quizás no estaba preparado para este día, pero sabía que este día llegaría, en el cual cierro una etapa, pero también el momento de agradecer, en primera instancia a la vida misma por el simple hecho de estar, de poder moverme, observar, sentir y vivir. A veces se me olvida de valorizar algo tan simple como el privilegio de existir.

Quiero detenerme en un recuerdo, mejor dicho, en una persona, mi amigo John, amigo y excompañero que hoy ya no está en este plano, independiente como haya acabado tu historia amigo, en este fin de etapa deseo recordarte y agradecerte, ya que sigues vivo en mi corazón y en el de todos quienes tuvimos la oportunidad de conocerte. Su nobleza y muchas otras cualidades permanecerán vivas en la memoria de quienes lo quisimos. No quiero extenderme demasiado; solo quiero decir: gracias por tu amistad, gracias por todo.

Volviendo a mis raíces, agradezco y honro profundamente a mi madre, gracias por mostrarme con tu forma de vivir el verdadero significado del sacrificio. Nos criaste a cuatro hijos en circunstancias que muchas veces parecían imposible, enfrentando una realidad económica y social que fácilmente pudo haberte derrumbado, pero que nunca logró vencerte. Por lo contrario, siempre fuiste fuerte, resiliente y nos enseñaste seguir por el buen camino pese a toda adversidad. Gracias madre, si tuviera que escribir todo lo que significas para mí y todo lo que representas como persona, sin duda me extendería más, pero tú sabes cuanto te amo.

Gracias a mi familia, siempre los llevo en mi corazón, pero debo ser un poco específico y dar las gracias a mis hermanos, que, sin duda, han sido un ejemplo para mí. Juntos rompimos esquemas y limitaciones que muchos creían que tendríamos. Fueron un ejemplo de cómo no decaer, de luchar con fuerza y persistencia, seguir adelante incluso en los momentos más duros. Solo nosotros sabemos lo difícil que fue trabajar y estudiar al mismo tiempo. Si no hubiera visto todo lo que ustedes eran capaces de hacer, probablemente hoy no estaría aquí.

A mis amigos, tanto de la universidad como de la vida, gracias de corazón. Sé que muchas veces estuve distante, ocupado o me ausenté, y quizá no siempre fui la mejor compañía. Aun así,

gracias por comprender este proceso y por permanecer en cada etapa y circunstancia. La vida, sin amigos, pierde gran parte de su sentido.

A mi profesor guía, Dr. Mauricio Aguayo, por su apoyo, consejos y dedicación. Su orientación ha sido fundamental para mi crecimiento académico y para el desarrollo de este proceso formativo. Agradezco también a la facultad y a cada persona que forma parte de este hermoso espacio. Sin duda, una de las razones que me motivó a permanecer fue haber encontrado aquí un lugar dentro de la vida universitaria; un lugar mucho menos abrumador de lo que alguna vez imaginé. Encontré personas amables, dispuestas siempre a regalar un saludo y una sonrisa. Guardo un especial cariño por las auxiliares, quienes son pilares silenciosos pero fundamentales de esta facultad, siempre con disposición y calidez.

Finalmente, me agradezco a mí mismo por no haber decaído. Fueron muchas las veces que pensé en rendirme, muchas ocasiones de flaqueo, en que me atormentaba y cuestionaba en un río de pensamiento caudalosos. Sin embargo, persistí, y comprendí que mientras tenga la posibilidad de seguir, no voy a rendirme.

En fin, gracias dios por la oportunidad que me has dado cada día y como diría un compositor gracias totales.

Resumen

La configuración espacial de la cobertura de suelo tiene un rol fundamental en la dinámica de caudal de las cuencas del centro-sur de Chile es por ende que este estudio analizó la relación entre la organización espacial del paisaje y la dinámica de caudal base en una línea temporal que abarca desde el año 1988 al 2020, utilizando una muestra de 24 cuencas distribuidas entre las regiones del Maule, Bio-Bio y la Araucanía. El objetivo principal fue determinar en qué medida las métricas del paisaje permiten explicar la contribución de la estructura del paisaje en la regulación de caudales estivales, en un contexto de marcada variabilidad climática y cambios de uso de suelo en las zonas de estudio.

Por ello, la metodología adoptó un enfoque cuantitativo, basado en datos hidrológicos histórico que abarcan 32 años. Estos datos se extrajeron de la base CAMELS-CL e información cartográfica procesada mediante herramientas SIG. Se empleó el software FRAGSTATS 4.2 para el cálculo de métricas a nivel de clase y paisaje, seleccionando índices representativos como densidad de parches (PD), cohesión, índice de división y complejidad de forma (SHAPE_MN). El análisis estadístico se ejecutó en el software R, utilizando Análisis de Componentes Principales (PCA) para la reducción de dimensionalidad y correlaciones de Spearman para evaluar las relaciones no paramétricas entre la estructura del paisaje y la respuesta hídrica.

Los resultados demostraron que la configuración espacial puede ser utilizada como un predictor significativo de la regulación hídrica estival. Para el caso del bosque nativo, se identificó una relación positiva y significativa ($p < 0.001$) entre las métricas que abarcan la complejidad de los parches (SHAPE_MN y FRAC_MN) y el caudal de verano. Esto evidencia que los parches de bosque con formas complejas y ramificadas que son asociados a quebradas y cursos de agua, favorecen una mayor infiltración en comparación con aquellos con formas geométricas simples y artificiales. En cambio, para las plantaciones forestales, los bloques continuos y homogéneos limitan los procesos hidrológicos como la infiltración y generan un elevado consumo del recurso hídrico. Por consiguiente, esta configuración reduce la recarga de las reservas subterráneas, disminuyendo la capacidad de la cuenca para sostener el caudal base durante el verano; no obstante, se observó que una mayor fragmentación (incremento en PD) de los parches se asoció

con una menor disminución del caudal base. En el caso del uso agrícola, las estructuras geométricas de índole industrial caracterizada por ser formas simples (bajo SHAPE_MN), tiene relación con una menor retención hídrica, por el contrario, las configuraciones con formas complejas e irregulares (altos valores de SHAPE_MN y FRAC_MN) mostraron la correlación positiva más fuerte con el caudal ($\rho = 0.32$). Esto sugiere que los parches agrícolas que mantienen una adaptación a la topografía natural del terreno favorecen el sostenimiento de los flujos de agua en comparación con aquellos que presentan una alta estandarización geométrica.

El estudio concluye que la gestión adecuada de la distribución espacial del paisaje es un factor determinante, ya que su organización influye significativamente en la regulación del caudal, más allá de la sola composición de las coberturas presente en las cuencas. Por lo tanto, es necesario transitar desde paisajes de bloques uniformes hacia un mosaico más diverso y funcional. Al fragmentar las grandes extensiones de plantaciones forestales para reducir su consumo hídrico y restaurar el bosque nativo en los cursos de agua respetando sus formas naturales, se logra proteger el caudal base durante el verano. Esta investigación entrega herramientas prácticas para diseñar paisajes resilientes que aseguren el recurso hídrico frente a los desafíos climáticos en la zona centro-sur de Chile

I. Introducción

Durante las últimas décadas en la zona centro sur de Chile se ha enfrentado a una crisis hídrica cada vez más severa, la cual se agudiza por un periodo prolongado de escasez de precipitaciones conocido como la megasequía (Garreaud et al., 2017). Aunque este fenómeno responde a forzantes climática de escala macro (Boisier et al., 2016). Pero a nivel local se debe considerar como las cuencas hidrográficas han reaccionado frente a esta megasequía, ya que en esto últimos 30 años se ha agudizado proceso antrópico que determinan la transformación de la estructura del paisaje, especialmente por los cambios en la cobertura y el uso del suelo. El aumento de presencia de extensas plantaciones forestales exóticas (*Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp.), sumado a la intensificación de actividades agrícolas, han reducido el área y continuidad del bosque nativo lo cual ha provocado que el territorio pierda su capacidad para retener y regular el agua, afectando con mayor fuerza los caudales durante los periodos de estiaje estival (Alvarez-Garretón et al., 2019; Huber et al., 2010).

Frente a este escenario es que gran parte de los estudios hidroecológico se han concentrado en analizar la composición del paisaje, es decir cómo está ocupada la superficie por cada tipo de cobertura que compone la cuenca. Sin embargo, este enfoque, deja de lado una dimensión igual de relevante que es a la configuración espacial de dichas coberturas. La configuración espacial desde la ecología analiza la forma de los parches, su grado de fragmentación y conectividad, como factores que pueden influir en los procesos hidrológicos al interior de las cuencas hidrográfica (Shi et al., 2013; Wei et al., 2023). De hecho la evidencia reciente sugiere que el efecto hidrológico no depende solo de la presencia de cobertura como plantaciones forestales, sino también de como estas se distribuyen y consolidan espacialmente, del mismo modo esto se aplica también para coberturas como las del bosque nativo, la cual no solo por su presencia ayuda a proceso hidrológico como la infiltración, sino también por la forma en que esta organiza, especialmente cuando se mantiene asociado a corredores ribereños y redes de drenaje. (Barrientos et al., 2020; Boongaling et al., 2018).

En este contexto, es que la presente investigación busca abordar este desafío analítico mediante la integración espacial de métricas de paisaje, de forma cuantificativa, utilizando el software RAGSTATS (McGarigal & Marks, 1995) el cual permitió el análisis de series históricas de

caudales. Se evaluó a través de la recopilación de información de 24 cuencas hidrográficas a lo largo de 32 años (1988-2020), se comprobó empíricamente cómo la estructura del paisaje se relaciona con en el agotamiento del caudal base. En particular, se planteó que una matriz territorial menos homogénea y una mayor conectividad en el bosque nativo, dando paso un mosaico hidrológico, podrían contribuir al sostenimiento del caudal base y constituir una alternativa de adaptación frente a la actual vulnerabilidad hídrica regional, brindando una Solución Basada en la Naturaleza (SbN) para adaptar el territorio frente a la creciente vulnerabilidad hídrica regional (Marquet & Rojas, 2021; Schneider-Valenzuela et al., 2023).

1. Pregunta de investigación

- ¿Cuál es la relación entre la configuración espacial del bosque nativo, las plantaciones forestales y la agricultura, evaluada mediante métricas de paisaje y la disminución del caudal base en cuencas del centro-sur de Chile durante el periodo 1988-2020?

2. Objetivo general

- Evaluar la relación entre la configuración espacial del paisaje y la disminución del caudal base en cuencas del centro-sur de Chile entre 1988 y 2020, para determinar si estas métricas tienen correlación con este fenómeno.

3. Objetivos específicos

- Caracterizar la configuración espacial del bosque nativo, las plantaciones forestales y la agricultura en los periodos 1988–2020, utilizando métricas de paisaje a nivel de clase y paisaje.
- Analizar la relación entre las métricas del paisaje y la disminución del caudal base (anual y estival) mediante pruebas estadísticas de correlación, identificando los índices más significativos.

II. Antecedentes

1. Configuración espacial y dinámica hidrológica del paisaje.

1.1 Diferenciación entre composición y configuración

Para el análisis de la dinámica de caudal a nivel de cuenca, se deben considerar distinciones previas entre los conceptos composición y configuración del paisaje. Mientras que la composición se refiere a la abundancia relativa o el porcentaje total de cada cobertura y su configuración, el segundo concepto es el que describe la distribución de parche de cobertura de suelo presente en la cuenca y la forma de los parche en el espacio, de hecho Hernández-Sosa et al. (2025) señalan que los cambios en la composición del paisaje (proporción y tamaño de cada uso o cobertura de suelo) y en su configuración (distribución y características espaciales de los parches) reducen la capacidad de los ecosistemas para proveer servicios ecosistémicos.. En base a esta distinción se puede entender que la regulación del flujo de agua no depende solo de la cantidad total de vegetación presente (composición), si no como esta se organiza físicamente (configuración). Desde la perspectiva teórica, se plantea que parches con formas naturales, es decir parches con formas ramificadas, cuya complejidad se evalúa mediante métricas de paisajes tales como el Índice de Forma Medio (SHAPE_MN) y la Dimensión Fractal (FRAC_MN) favorecen la infiltración y el sostenimiento del caudal base (Boongaling et al., 2018). Esto ocurre debido a que las formas irregulares aumentan el perímetro de contacto y la capacidad de interceptación hídrica del suelo; por el contrario, las configuraciones geométricas simples o altamente fragmentadas suelen asociarse a una menor retención y a una respuesta hídrica más acelerada ante eventos de precipitación (Shi et al., 2013).

2. Procesos hidrológicos y cobertura de suelo

2.1 Dinámica del caudal base y su importancia ecológica.

El caudal se define como el volumen de agua que fluye en una sección transversal ya sea de un río o canal, el cual, para su cuantificación, se mide en unidades de tiempo (m^3/s). En el contexto hidrológico, el caudal refleja la combinación de distintos procesos del ciclo del agua, incluyendo la escorrentía superficial, el flujo subsuperficial (interflow), y el caudal base, esto varía en función de la estacionalidad y la configuración del paisaje (Hernández-Sosa et al., 2025; Moya et al., 2022). En el concepto régimen hidrológico, el flujo total es el resultado de distinto componente como lo es la escorrentía superficial, caudal base el cual representa la fracción de flujo que proviene de descarga de acuíferos y del drenaje lento del agua, es por aquello que es un factor que sostiene el escurrimiento en los ríos, incluso en ausencia prolongada de precipitaciones (Hernández-Sosa et al., 2025).

El caudal base se ve determinado por factores físicos, tales como la precipitación, la forma, la pendiente, los cuales regulan la velocidad del escurrimiento y la disponibilidad hídrica, siendo las tierras bajas zonas de mayor acumulación en comparación con laderas pronunciadas (Álvarez-Garretón et al., 2019). En este proceso, la cobertura del suelo actúa como un regulador crítico que determina la distribución del agua mediante la interceptación, evapotranspiración e infiltración (Martínez-Retureta et al., 2020). No obstante, las actividades antrópicas como las plantaciones forestales alteran esta dinámica al compactar el suelo y reducir su capacidad de almacenamiento, lo que disminuye la recarga del caudal base y favorece una mayor escorrentía superficial en comparación con el bosque nativo (Álvarez-Garretón et al., 2019).

En resumen, este balance hídrico es fundamental para que la naturaleza del centro-sur de Chile tenga la capacidad de resistir y recuperarse ante la falta de agua. Durante la temporada estival, el caudal base sostiene los niveles mínimos de agua necesarios para la supervivencia de la biota acuática y asegura el abastecimiento para el consumo humano (Álvarez-Garretón et al., 2019). Por lo tanto, la capacidad de infiltración y almacenamiento, mediada por la configuración del paisaje, actúa como el regulador principal frente a los efectos de la variabilidad climática y la mega sequía

2.2 Dinámica del ciclo hídrico y su relación con la cobertura del suelo.

El ciclo hidrológico se entiende como la circulación constante del agua entre el sistema tierra y la atmósfera, un movimiento permanente en sus distintas fases que, a nivel de cuenca, se manifiesta a través de procesos críticos como la precipitación, la infiltración, la escorrentía superficial y el caudal base (Ward & Robinson, 2000). Estos procesos determinan el balance hídrico y están influenciados por factores físicos como la pendiente y el clima, pero especialmente por la cobertura vegetal y su configuración espacial. Al respecto, Wei et al. (2023) señalan que la forma en que se distribuyen los tipos de suelo en el territorio afecta directamente la eficiencia de estos procesos.

La organización espacial de los parches que conforman el paisaje, tiende a condicionar la capacidad de la cuenca en la regulación del recurso hídrico. Estudios recientes han evidenciado que las configuraciones caracterizadas por presentar una alta fragmentación y una baja conectividad entre parches de la misma clase, es decir, el grado de conexión entre fragmentos por ejemplo de la cobertura del bosque nativo, tienden a reducir la eficiencia de los procesos hidrológicos afectando negativamente la sostenibilidad del caudal base (Zhang et al., 2014; Li & Zhou, 2015). Para evaluar esta interacción, se emplean métricas como el Índice de Proximidad Medio (PROX_MN) y el Índice de Cohesión (COHESION), las cuales permiten cuantificar el aislamiento y la continuidad física de la vegetación.

Es importante destacar que el impacto de la conectividad varía según el tipo de suelo; en coberturas agrícolas o plantaciones forestales, una alta conectividad puede resultar contraproducente, ya que la presencia de grandes superficies uniformes y compactadas facilita la escorrentía superficial y disminuye la infiltración (Álvarez-Garretón et al., 2019). Las configuraciones que tienden a la homogenización del paisaje, se relacionan con una mayor escorrentía superficial ya que, se simplifica la ruta del agua, reduciendo la capacidad de almacenamiento de la cuenca, por consecuente afectado a la disponibilidad del recurso en periodos de estiaje (Martínez-Retureta et al., 2020; Wei et al., 2023).

2.3 Evidencia regional y brechas en el estudio de la configuración espacial.

La existencia de variados estudios desarrollados en Chile, en especial en la zona centro- sur del país, han contribuido a comprender la relación que existe en la cobertura y uso de suelo con los comportamientos hidrológicos presentes en las cuencas. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones aborda los cambios de composición del uso de suelo, es decir, la proporción de cada tipo de cobertura, dejando en un segundo plano el análisis de la configuración espacial, en específico con lo que respecta a la distribución de estas coberturas de suelo.

Investigaciones como las de Martínez-Retureta et al. (2020) en la cuenca del río Andalién han evidenciado que la pérdida de vegetación nativa y su reemplazo por plantaciones exóticas afecta negativamente el rendimiento hídrico, observándose una disminución del caudal base a medida que se reduce la cobertura nativa. En esta misma línea, se afirma que paisajes mayormente fragmentados, con parches pequeños y una distribución deficiente, tienden a reducir la infiltración y aumentar la escorrentía superficial (Wei et al., 2023).

Asimismo, se plantea que no solo la proporción de la cobertura vegetal influye en los procesos, sino también la conexión entre los fragmentos (Shi et al., 2013). Al respecto, Barrientos et al. (2020) postulan que las cuencas con mayor proporción de vegetación nativa en zonas altas y con baja fragmentación presentan una regulación hídrica más estable y una menor vulnerabilidad frente a eventos extremos. Esto refuerza la idea de que la ubicación y la organización espacial de la vegetación son variables críticas para la eficiencia hidrológica del sistema.

2.4 Contexto hidroclimático de las regiones centro-sur.

2.4.1 Variabilidad climática y Megasequía en el centro sur de Chile (1988-2020).

El régimen hidrológico de las cuencas del centro-sur de Chile se caracteriza por presentar una marcada estacionalidad, con una gran dependencia de las precipitaciones invernales para la recarga de los sistemas acuíferos (Alvarez-Garretón et al., 2018; Garreaud et al., 2017). No obstante, desde el año 2010, el territorio a nivel nacional ha enfrenta un escenario climático sin precedente, que se le denomina comúnmente como “mega sequía”, definido por un déficit de

precipitaciones que promedia un 30% en comparación con los registros históricos. (Garreaud et al., 2017). Este escenario no solo se explica por la variabilidad natural presente en el país como es el fenómeno “El Niño Oscilación del Sur (ENOS)”, sino también por forzantes antrópicos asociados al cambio climático global. El déficit de precipitación ha provocado la disminución de escorrentía, el cual alcanza hasta en un 40% en la zona del centro sur del país (Mendoza et al., 2014). Por ende, la variación de escorrentía superficial y el aumento de demanda de la evapotranspiración resultan que menor cantidad de agua percole hacia las napas subterráneas (Mendoza et al., 2014).

Lo anterior compromete el riesgo de la capacidad de las cuencas para sostener el caudal base en los periodos de estivales, especialmente durante los meses de febrero y marzo, que históricamente registran los caudales mínimos de las regiones en cuestión (Stehr et al., 2010). Por lo cual el periodo de estudio que abarca desde el año 1987 al 2020 permite entender el impacto de la sequía extrema que afectado a Chile central desde el año 2010 (Boisier et al., 2016).

2.4.2 Resiliencia hídrica y vulnerabilidad de las cuencas ante el déficit pluviométrico

La resiliencia hídrica se define como la capacidad de las cuencas para asegurar la provisión y regulación del recurso hídrico frente a distinto escenario como lo es el mega sequia u otras condiciones climáticas (Mendoza et al., 2014). Dicha capacidad, para efecto de este estudio, es evaluada a través de los patrones espaciales del paisaje, los cuales tienen relación sobre el ciclo hidrológico (Hernández-Sosa et al., 2025; Wei et al., 2023). Al respecto, se reconoce que ciertas configuraciones espaciales, que se adecuan al contexto de cada cuenca, pueden actuar como un amortiguador ante impactos hidrológicos negativos (Boongaling et al., 2018). No obstante, la vulnerabilidad aumenta frente al cambio de uso de suelo de bosque nativo hacia un uso forestales. Esta conversión tiene como consecuencias la reducción del rendimiento hídrico, la capacidad de infiltración y por consecuente la disminución del almacenamiento de aguas subterráneas (Alvarez-Garretón et al., 2019; Barrientos et al., 2020). En el contexto de la megasequía que se comienza agudizar en 2010, la dinámica de la vegetación adquiere un rol fundamental para regular el caudal base y sostener el flujo de los ríos en periodos de escasez (Garreaud et al., 2017; Zhang et al., 2024)

2.5 Fundamentos de la ecología del paisaje y cuantificación hidrológica

2.5.1 Las métricas del paisaje como indicadores de la dinámica hídrica

La ecología del paisaje permite interpretar el territorio como si se tratara de un mosaico compuesto por diversos parches. A través de métricas cuantitativas, es posible describir las características de estos parches, así como su forma, conectividad, diversidad, distribución y organización dentro del territorio estudiado (Lang et al., 2008). Es por aquello, que la configuración espacial resulta ser determinante para el estudio de los procesos ecológicos e hídricos de una cuenca, ya que las métricas de paisaje permiten cuantificar patrones que regulan el movimiento del agua, la conectividad ecológica y la capacidad de retención hídrica del territorio (Turner et al., 2001; Boongaling et al., 2018).

Existen investigaciones que han utilizado métricas del paisaje para el análisis de la configuración espacial presente en el territorio de estudio, como es el caso de Hernández-Sosa et al. (2025) han aportado evidencia significativa sobre cómo la configuración del territorio condiciona la respuesta hidrológica regional. Esto a través de métricas específicas como CONT (grado de agrupamiento), PROX (cercanía entre parches) y ECON (contraste de bordes) presentan correlaciones significativas con la infiltración, la percolación y el caudal base. Sus resultados indican que, mientras las plantaciones jóvenes forestales muestran correlaciones negativas, los bosques nativos bien conectados exhiben relaciones positivas, lo que confirma que una configuración paisajística cohesiva y natural favorece la regulación hidrológica.

2.5.2 Definición de métricas de paisaje seleccionadas

Para la cuantificación de la estructura espacial de las cuencas, se han seleccionado métricas que operan en tres niveles jerárquicos. A continuación, se detallan sus definiciones técnicas según McGarigal & Marks (1995) y su interpretación en el contexto de la regulación hídrica.

Tabla 1. Descripción y fundamentación de las métricas de paisaje en niveles de Paisaje, Clase y Parche.

Nivel	Métrica	Sigla	Función en la Ecología del Paisaje
Land	Diversidad	SHDI / SHEI	Heterogeneidad y equidad del mosaico (Lang et al., 2008).
Land	Agrupamiento	CONT	Grado de agregación de las coberturas en la cuenca.
Class	Fragmentación	NP / DIVISION	División física y número de fragmentos (Fahrig, 2003).
Class	Conectividad	COHESION	Continuidad física de una clase específica.
Class	Cercanía	PROX_MN	Proximidad entre parches de la misma clase.
Class	Forma	SHAPE_MN	Complejidad de los límites de los parches

Nivel	Métrica	Sigla	Función en la Ecología del Paisaje
			(Wu, 2013).
Patch	Geometría	AREA / CORE	Tamaño y superficie núcleo del fragmento individual.
Patch	Borde	ECON	Contraste entre el parche y sus vecinos.

Fuente: Elaboración propia a partir de McGarigal & Marks (1995), Fahrig (2003) y Hernández-Sosa et al. (2025)

III. Metodología

1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en la zona centro sur de Chile, desde la región del Maule hasta la región de la Araucanía. aproximadamente entre los paralelos 35° y 39° de latitud sur. Se seleccionaron una muestra de 24 cuencas hidrográficas las cuales tienen como característica que presentan régimen de alimentación tanto pluvial como mixto(nivo-pluvial), características que dependen de la latitud y altitud (Correa Céspedes, 2012)., a su vez , las cuencas presentan una diversidad de coberturas de suelo como bosque nativo, plantaciones forestales, áreas agrícolas y matorrales lo que las convierte en un escenario adecuado para el análisis de métricas de paisaje y su relación con la respuesta hidrológica.

Tabla 2: Caracterización geográfica e hidroclimática de las cuencas de estudio.

Nombre de la Cuenca (Estación)	Región	Provincia	Área (km ²)	Precip. anual media (mm)
Río Achibueno En La Recova	Maule	Linares	894.3	1946
Estero Curipeumo En Lo Hernández	Maule	Talca	217	868
Río Cauquenes En El Arrayán	Maule	Cauquenes	622.1	963
Río Purapel En Sauzal	Maule	Talca/Cauquenes	404.3	845

Nombre de la Cuenca (Estación)	Región	Provincia	Área (km ²)	Precip. anual media (mm)
Estero Upeo En Upeo	Maule	Curicó	367.2	1481
Río Perquilauquén En Ñiquén	Maule/Ñuble	Linares/Punilla	1209	1582
Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	Maule	Talca	558.8	774
Río Chillán En Camino A Confluencia	Ñuble	Diguillín	798.5	1541
Río Itata En Trilaleo	Ñuble	Diguillín/Punilla	1148.2	1719
Río Andalién Camino A Penco	Biobío	Concepción	750.3	1114
Río Duqueco En Cerrillos	Biobío	Biobío	1339.5	1829
Río Duqueco En Villucura	Biobío	Biobío	817.7	2029

Nombre de la Cuenca (Estación)	Región	Provincia	Área (km ²)	Precip. anual media (mm)
Río Nicodahue En Pichún	Biobío	Biobío	739.6	1915
Río Rucue En Camino A Antuco	Biobío	Biobío	210.9	2089
Río Biobío En Coihue	Biobío	Biobío	11147.8	1995
Río Lleu-Lleu En Desagüe Lago Lleu-Lleu	Biobío	Arauco	580.2	1367
Río Allipén En Los Laureles	La Araucanía	Cautín	1675.1	2330
Estero Chufquén En Chufquén	La Araucanía	Cautín	853.6	1527
Río Lumaco En Lumaco	La Araucanía	Malleco	853.1	1163
Río Quepe En Vilcún	La Araucanía	Cautín	1665.6	1983

Nombre de la Cuenca (Estación)	Región	Provincia	Área (km ²)	Precip. anual media (mm)
Río Renaico En Longitudinal	La Araucanía	Malleco	688.2	2465
Río Toltén En Teodoro Schmidt	La Araucanía	Cautín	7926.8	2365
Río Collin En Codahue	La Araucanía	Cautín	254.6	2300
Río Rahue En Forrahue	Los Lagos	Osorno	5603	1844

Nota. Se describen las 24 unidades de análisis a partir de sus estaciones fluviométricas de cierre. Los datos de área aportante y precipitación media anual provienen de la base oficial CAMELS-CL (CR2). El área de estudio se extiende desde la Región del Maule hasta La Araucanía e incluye la cuenca del río Rahue, en Los Lagos, para ampliar la variabilidad hidroclimática y paisajística analizada.

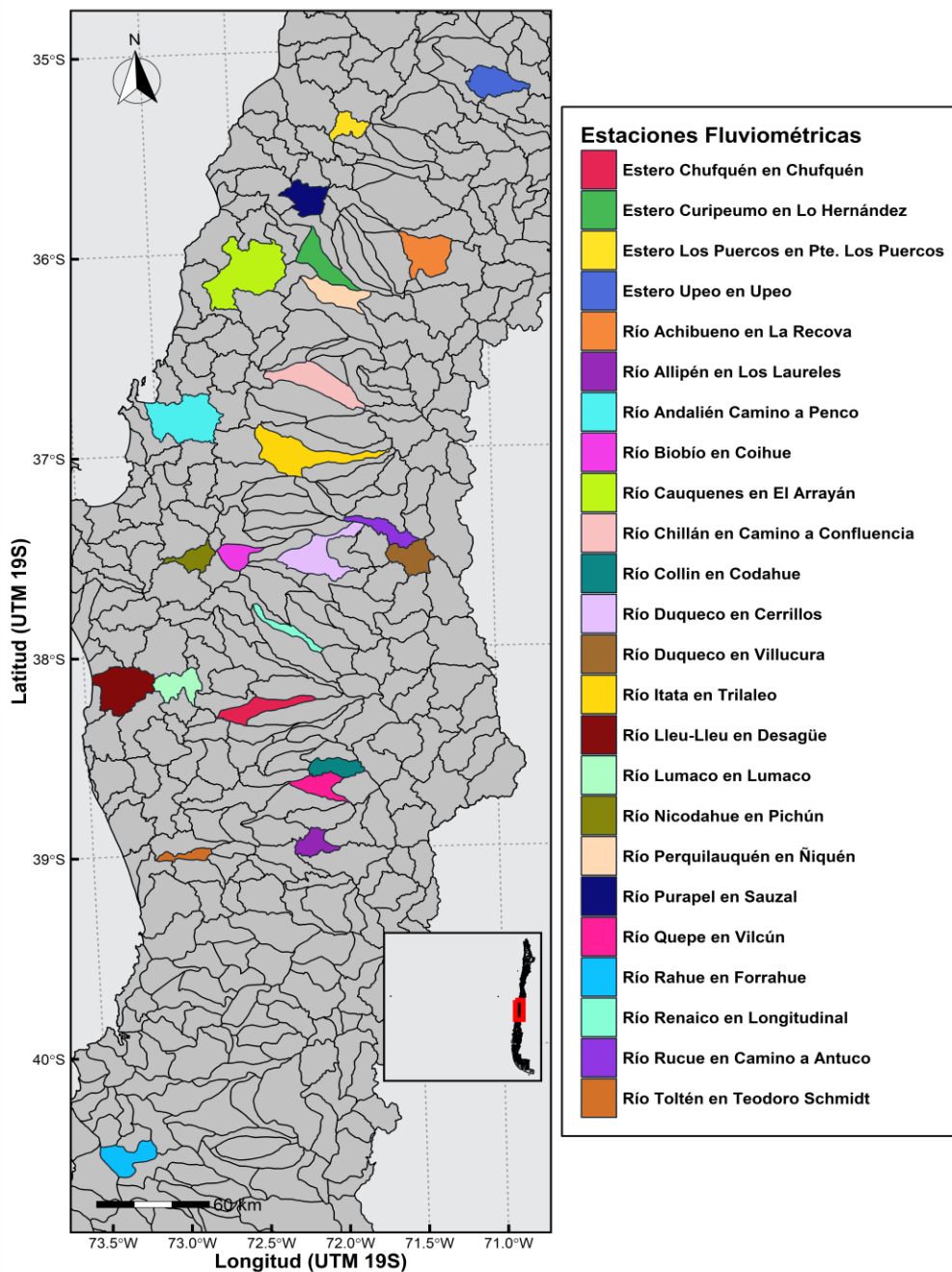


Figura 1: Localización del área de estudio y delimitación de las 24 cuencas hidrográficas seleccionadas en el centro-sur de Chile.

2. Fuentes de información y recolección de dato

Se integraron tres pilares de información oficial y de investigación:

- **Datos de Caudal:** Series diarias del explorador CAMELS-CL (CR2).
- **Uso de Suelo:** Cartografía digital de alta resolución (30 m) generada en el marco del proyecto **FONDECYT**: *"Linking landscape patterns and water availability. Towards Nature-Based Solutions to integrated river basin management and climate change adaptation"*, liderado por el Prof. Mauricio Aguayo.
- **Cartografía Base:** Archivo vectorial de Sub-subcuencas de Chile (SubSubCuencas_BNA.shp), extraído de la Mapoteca Digital de la Dirección General de Aguas (DGA) (<https://dga.mop.gob.cl/mapoteca-digital/>).

Para el desarrollo de la investigación, se estableció un flujo de trabajo multietapa que integra el procesamiento de series temporales hidrológicas y espaciales (figura N°2). Este proceso abarca desde la adquisición de datos primarios hasta la modelación estadística final.

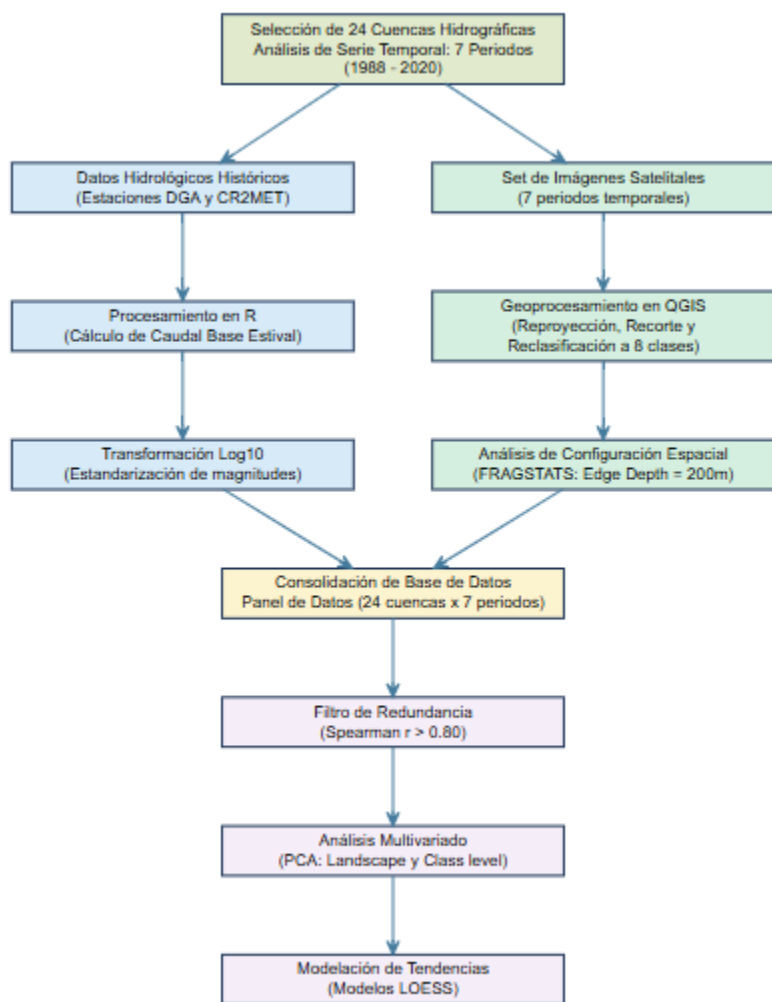


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico para la relación entre configuración espacial del paisaje y caudal base. Se detallan las ramas de procesamiento hidrológico (azul) y geoespacial (verde), junto con las etapas de integración y análisis estadístico multivariado.

3. Procesamiento hidrológico de series de caudal

3.1 Tratamiento de series hidrológicas mediante programación en R.

Para la caracterización del régimen hídrico de cada una de las 24 cuencas, es que se realizó un tratamiento estadístico de los datos extraídos de la base de CAMELS-CL. El flujo de procesamiento se realizó mediante un script en el software R que siguió los siguientes pasos.

Escala de datos: se trabajó con series de caudales diarios(m³/s). Estos registraron en primera instancia pasado por una limpieza para asegurar la continuidad de la información en cada ventana temporal. Luego se clasifico los periodos estacionales para medir el caudal, estos son:

- **Verano (Caudal Base):** Se definió como el promedio de los meses de enero, febrero y marzo. Esta ventana se seleccionó por representar el periodo de estiaje crítico, donde la respuesta del río depende principalmente de las reservas subterráneas y la regulación del suelo.
- **Invierno:** Se calculó mediante el promedio de los meses de junio, julio y agosto, capturando la respuesta máxima ante eventos de precipitación.
- **Anual:** Se obtuvo el promedio de la serie completa para cada ventana de observación. El criterio estadístico utilizado es el promedio aritmético para poder trabajar con los caudales diarios a escala estacional y anual. Esto permite suavizar la variabilidad climática extrema y por consiguiente obtener un comportamiento hídrico representativo del estado de las cuencas para cada periodo.

El script de procesamiento de caudales, se le aplico un filtro para asegurar que solo se consideran los meses previamente nombrados. Gracias a esto se pudo llevar a cabo la vinculación del paisaje con la hidrología, para esto se integró mediante el software R la función Left Join cruzando la base de datos de métricas de FRAGSTATS con la base de caudales procesada. El criterio de unión fue la coherencia temporal absoluta: las métricas de una capa cartográfica (ej. M3 2008-2010) se vincularon únicamente con el promedio de caudal observado en esos mismos años.

3.2 Justificación de segmentación temporal y ventanas de observación.

Para asegurar la coherencia temporal entre el paisaje y la respuesta hídrica, el marco temporal (1988–2020) se segmentó en siete ventanas de observación donde se utilizaron series de caudales medios diarios (m^3/s). Para asegurar la calidad de los datos, se exigió un mínimo de 90% de registros válidos por periodo. Los datos faltantes no se imputaron y los años incompletos se excluyeron del cálculo de los promedios.

- **Línea Base (1988–1998):** Periodo de 10 años utilizado para establecer el comportamiento hidrológico histórico o "normal" de las cuencas antes de la intensificación del cambio de uso de suelo y el inicio de la megasequía.
- **Periodos de Seguimiento desde 1988 a 2020:** Se establecieron seis ventanas adicionales de entre 2 y 3 años de duración cada una que responde a la disponibilidad de las capas de uso de suelo del proyecto FONDECYT ("*Linking landscape patterns and water availability...*"). Cada ventana funciona como una unidad de análisis donde se cruza la configuración espacial del paisaje de ese periodo con el caudal observado en el mismo intervalo.

Esta metodología buscar evaluar la sensibilidad inmediata de la cuenca al comparar periodos cortos, se puede aislar el impacto que tuvo una configuración espacial específica sobre efecto del proceso hidrológico en las cuencas de estudio, como lo es la infiltración durante los periodos verano, especialmente relevante bajo el contexto de estrés hídrico extremo observado desde el 2010.

Tabla 3: Definición de las ventanas temporales de observación (1988-2020)

Periodo	Intervalo de Años	Caracterización Metodológica
M0	1988 – 1998	Línea Base Histórica: Establece el comportamiento referencial del paisaje y caudales previo a la megasequía.
M1	2000 – 2002	Seguimiento I: Primer periodo de observación post-línea base.
M2	2004 – 2006	Seguimiento II: Ventana de observación intermedia.
M3	2008 – 2010	Seguimiento III: Periodo que captura el inicio de la megasequía en Chile central.
M4	2012 – 2014	Seguimiento IV: Observación bajo condiciones de estrés hídrico consolidado.
M5	2016 – 2018	Seguimiento V: Intensificación del déficit hídrico; periodo clave para la calibración del <i>Edge Depth</i> .
M6	2019 – 2020	Seguimiento VI: Cierre del ciclo de observación de 32 años.

Nota: Tabla explicativa de las ventanas temporales de datos de caudales procesada en el software Rstudio.

4. Procesamiento geoespacial en QGIS

4.1 Preparación y tratamiento de la información espacial en QGIS

El tratamiento de información cartográfica (uso de suelo) se realizó en el software Qgis 3.40, su paso a paso fue el siguiente:

- **Re proyección, homogenización y control de calidad espacial:** En primera instancia, todas las capas de coberturas y uso de suelo fueron re-proyectada al sistema de coordenadas UTM zona 18S, datum WGS84, con una resolución espacial estandarizada de 30 m por píxel. Este procedimiento es necesario para poder integración de los archivos ráster en el software FRAGSTATS v4.2, ya que la unificación espacial permite mitigar las inconsistencias derivadas de diferencias en la proyección, escala o tamaño de celda entre los insumos originales. Posterior a eso se realizó un control de calidad para verificar la correcta correspondencia espacial entre capas, evaluando la continuidad territorial y coherencia geométrica entre cobertura y los límites geográficos de las 24 cuencas, asegurando la ausencia de desplazamiento vacíos (gaps) en la matriz de paisaje.
- **Delimitación de las coberturas por cuenca y extracción de máscara:** Una vez estandarizadas las capas de uso de suelo provenientes del proyecto FONDECYT ("*Linking landscape patterns and water availability...*"), el siguiente paso consistió en aislar la información correspondiente estrictamente al área de drenaje de cada una de las 24 estaciones fluviométricas. Para llevar a cabo lo descrito anteriormente, es que se aplicó la herramienta "Cortar ráster por capa de máscara", disponible en la caja de herramienta de GDAL de Qgis, se utilizó el archivo vectorial (*shapefile*). Como insumo de corte, se empleó la cartografía oficial de Sub-subcuencas de Chile (SubSubCuencas_BNA.shp), obtenida de la Mapoteca Digital de la Dirección General de Aguas (DGA). Previo a la ejecución, este archivo vectorial fue filtrado para seleccionar exclusivamente las poligonales de las 24 unidades hidrográficas del centro-sur de Chile contempladas en el estudio. Durante el proceso, se activó la opción de "*Ajustar la extensión del ráster cortado a la extensión de la capa de máscara*" para optimizar el peso de los

archivos de salida. Es importante este paso para que al procesar los datos en el software Fragstasts, el cálculo de métricas del paisaje tales como los de conectividad, proximidad y área núcleo se realice únicamente sobre la superficie que drena físicamente hacia la estación de monitoreo. Al realizar el *clip*, se eliminan las coberturas externas que no influyen en el análisis de las cuencas seleccionadas, evitando sesgos en la relación paisaje-caudal y asegurando que cada métrica represente fielmente la realidad física de la unidad hidrológica de estudio.

- **Reclasificación funcional de coberturas:** Una vez ya obtenidas las 24 capas recortadas por cuenca, se procedió a simplificar las leyendas originales provenientes del proyecto FONDECYT. Por lo cual en el software Qgis se utilizó la herramienta de a “Reclasificar por tabla” (*Reclassify by table*) en QGIS, quedando las categorías de uso de suelo de esta forma.
 - a. **Agrícola:** Terrenos destinados a cultivos anuales y permanentes.
 - b. **Praderas:** Áreas de pastizales y vegetación herbácea.
 - c. **Matorrales:** Zonas de vegetación arbustiva y renovales jóvenes.
 - d. **Plantaciones Forestales:** Monocultivos industriales de especies exóticas.
 - e. **Bosque Nativo:** Formaciones boscosas primarias y secundarias de especies autóctonas.
 - f. **humedales y Cuerpos de Agua:** Ecosistemas acuáticos y zonas saturadas.
 - g. **Áreas Urbanas:** Superficies construídas e infraestructura antrópica.
 - h. **Suelo Desnudo y Nieves:** Áreas sin cobertura vegetal o cumbres con nieve persistente.

Para optimizar el procesamiento en Fragstats y asegurar la robustez del análisis estadístico es que, la investigación se focaliza el análisis en tres usos de suelo que han experimentado las transformaciones más drásticas en su distribución y configuración espacial dentro del centro-sur de Chile durante el periodo de estudio (1988-2020). Las clases seleccionadas son Bosque Nativo (BN), Plantaciones Forestales (PFT) y Agricultura (AGR). Esto se sustentó debido a su mayor relevancia funcional dentro de la dinámica hidrológica regional, al concentrar los principales cambios de cobertura con potencial incidencia sobre la regulación del flujo base. Al trabajar exclusivamente con estas tres clases para el cálculo de métricas espaciales, se reduce la dimensionalidad del modelo y excluyendo categorías con baja representatividad o influencia marginal en la respuesta hídrica de las cuencas (Aguayo et al., 2022; Martínez-Retureta et al., 2020).

- **Exportación de capas para análisis de paisaje:** Finalmente, las capas procesadas fueron exportadas en formato GeoTIFF (.tif), asegurando compatibilidad con FRAGSTATS v4.2. Cada archivo fue organizado según cuenca, periodo temporal y tipo de cobertura, con el fin de mantener trazabilidad en el flujo de trabajo y facilitar la posterior integración con las bases de caudales y análisis estadísticos.

5. Cuantificación del paisaje con FRAGSTATS v4.2

5.1 Fundamentos y aplicación de métricas del paisaje en FRAGSTATS.

Para realizar la cuantificación de la estructura espacial de las cuencas, se utilizó las capas por cuenca obtenidas anteriormente del software QGis, la cuales cumplen con el formato requerido para ser procesadas en el software FRAGSTATS v4.2. Esta herramienta constituye el estándar metodológico en la ecología del paisaje para el cálculo de índices espaciales, permitiendo analizar cuantitativamente tanto la composición como la configuración de los ecosistemas (McGarigal & Marks, 1995). La elección de aplicar este software se basa en la evidencia científica reciente que demuestra cómo se vincula las métricas del paisaje con los componentes hidrológico. Autores como Boongaling et al. (2018) y Wei et al. (2023) han utilizado FRAGSTATS para demostrar cómo la conectividad, forma y densidad de parches condicionan el escurrimiento

y la retención de agua en las cuencas.

En el ámbito nacional, estudios recientes (Alvarez-Garreton et al., 2019; Hernández-Sosa et al., 2025; Martínez-Retureta et al., 2020) han demostrado que formas robustas de la distribución geométrica de las coberturas forestales y agrícolas condicionan la variabilidad del ciclo hidrológico por consecuente la regulación de los caudales.

5.2 Parámetros de implementación técnica (Batch Processing y Reglas de vecindad).

Para la ejecución de las capas ráster en el software FRAGSTATS v4.2 (McGarigal & Marks, 1995), es que se configuro dicho programa, con el fin de tener un protocolo que garantiza la comparabilidad entre las 24 cuencas y las ventanas de temporales analizadas. Los parámetros técnicos fueron los siguientes:

- **Procesamiento por lotes (batch processing):** por factor del volumen de información geoespacial obtenida, que consiste en un total de 168 mapas, que son las 24 cuencas en sus 7 periodos correspondientes, es que se utilizó la modalidad de procesamiento por lotes, esto permitió automatizar el cálculo de las métricas tanto a nivel de clase, paisaje y parche. Esto aseguro que cada archivo GeoTIFF fuera analizado bajo criterios operativos idénticos, asegurando la comparabilidad en la evaluación de la dinámica espaciotemporal del paisaje y minimizando el margen de error asociado a la manipulación manual de grandes volúmenes de datos (Martínez & Herrera, 2023).
- **Regla de vecindad de 8 vecinos:** Se configuro el software para ejecutar la regla de conectividad de 8 vecinos que, a diferencia de la regla de 4 vecinos, este ajuste permite capturar la conexión tanto laterales como diagonales de cada celda de un mismo tipo de cobertura. La aplicación de esta configuración es fundamental para definir con precisión la continuidad estructural de los fragmentos y sus límites (Alonso-F. et al., 2017), proporcionando una representación más realista de la conectividad hídrica que condiciona la retención de agua en el suelo.

- **Tratamiento de borde:** Los límites de cada subcuenca se trataron como un borde real como si se tratara de un tipo de isla, asumiendo que no existe información relevante fuera del polígono de drenaje, es decir técnicamente, las áreas geográficas externas a la máscara de la cuenca fueron catalogadas por el modelo como celdas sin datos (*NoData*) o fondo (*Background*), excluyéndolas automáticamente de la matriz (Martínez & Herrera, 2023; McGarigal & Marks, 1995). La aplicación de este criterio metodológico es fundamental para interpretar el territorio como un mosaico cerrado (Lang et al., 2008), ya que evita la interacción con las coberturas externas que podrían sesgar el cálculo de métricas de paisaje que calcula el aislamiento como lo son las métricas de División, proximidad y área núcleo. Todo esto con el fin de que se represente la realidad física de las cuencas hidrográficas de estudio.
- **Resolución espacial y formato:** Se mantuvo la resolución espacial estandarizada en 30 metros por pixel, ya que es coherente con los insumos cartográficos de donde se obtuvo (proyecto FONDECYT). Esta resolución permite un análisis idóneo para el cálculo de métricas de fragmentación a nivel de cuenca (Silva Varela, 2022), debido a que permite un nivel de detalle adecuado para la captura de la geometría de cada tipo de cobertura sin perder la representatividad física de los balances hídricos territoriales (Alvarez-Garretón et al., 2019; Barrientos et al., 2020).

5.3 Calibración científica del Edge Depth.

En la ecología del paisaje, la profundidad de borde (Edge Depth) corresponde al parámetro que define la distancia a la cual los efectos externos influyen sobre la unidad geográfica de estudio; a partir de este valor es posible estimar su área núcleo funcional, es decir, la porción interna del parche que permanece relativamente libre de influencia de borde (Gurrutxaga & Lozano, 2006). En lugar de asumir un valor teórico para esta investigación es que se realizó un análisis de sensibilidad la cual se realizó de la siguiente manera:

- **Procedimiento de Prueba:** Se evaluaron tres profundidades de borde las cuales son 100 m, 200 m y 300 m. Estos valores fueron seleccionados en fundamento en primera

instancia a las normativas nacionales e internacionales sobre zonas de amortiguamiento y protección de ribera. Para el caso de Chile Ley N° 20.283 establece fajas de protección con anchos típicos de 15 a 30 metros, en contraste para los casos de Australia y España definen establece distancia y manejo de cauce que pueden alcanzar hasta los 100 metros (Romero et al., 2014). Es por aquello que comparar estos tres valores, nos da la oportunidad de evaluar los efectos de borde mucho más allá de lo establecido por las normas vigentes, para así comprender en estricto rigor la magnitud de la degradación ecológica hacia el interior de cada parche de cada cobertura presente en las cuencas hidrográficas.

Con respecto a la lo periodos seleccionados para esta prueba de sensibilidad, se seleccionaron dos ventanas temporales de la serie total de datos. Se seleccionaron los periodos M0 (1988–1998) y M5 (2016–2018). El primero se definió como línea base por representar la condición histórica de referencia del paisaje, mientras que el segundo se eligió por la disponibilidad completa de información y por coincidir con la consolidación del déficit de precipitaciones asociado a la megasequía en Chile central (Garreaud et al., 2019).

- **Análisis de Sensibilidad y depuración de datos:** Como se definió anteriormente se analizó la métrica de Área de Núcleo (CORE) para comparar cómo variaba la calidad de los parches entre los periodos M0(1988-1998 y M5(2016-2018). Se obtuvo que aproximadamente el 98% de los parches correspondiente a la cobertura bosque nativo presentan un área núcleo igual a cero cuando se aplicó los criterios rigurosos de borde. Por lo cual se evidencia de forma empírica y coherente con la teoría de la ecología del paisaje, que afirma, que, en ecosistema altamente divididos, el efecto borde penetra hasta consumir la totalidad de la superficie del fragmento, impidiendo la existencia de un hábitat interior funcional (Gurrutxaga & Lozano, 2006).

Con respecto a lo anterior es que se determinó que los valores de profundidad menores como los postulados por la normativa nacional (30 metros) e internacional (100 metros), tienden a inflar la métrica Core, por ende, genera falso parche intactos al no capturar el avance real de la degradación de borde. Para evitar esto es que se aplicó un filtro (CORE > 0) aislando solo aquellos fragmentos que poseían un núcleo genuino

- **Criterio de Selección:** A partir de los resultados de la prueba de sensibilidad, se seleccionó una profundidad de borde (*Edge Depth*) de 200 metros como el "punto de inflexión" metodológico. Para esto se comprobó de forma estadística que este valor permite identificar la pérdida de núcleo sin subestimar la fragmentación extrema del sistema, por lo cual representa la mayor estabilidad y representatividad estructural del paisaje.

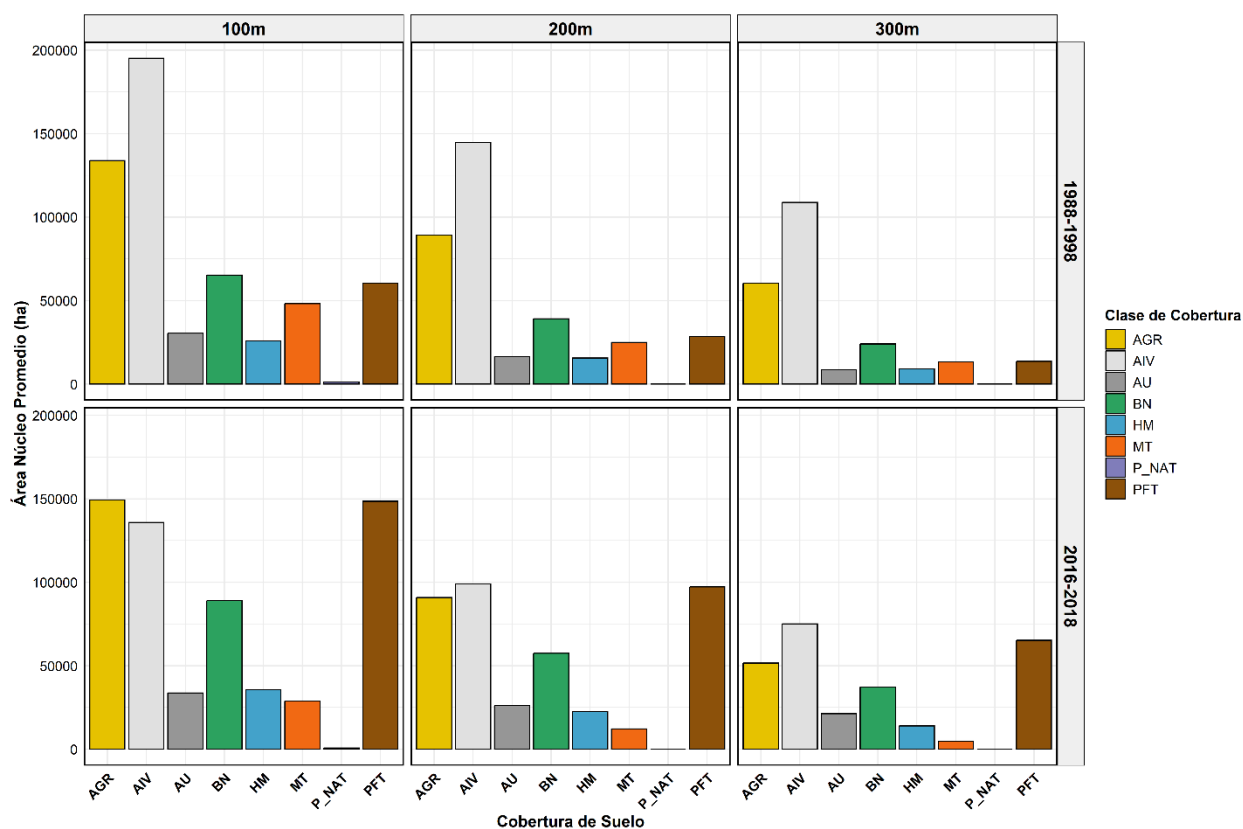


Figura 3. Análisis de sensibilidad temporal y espacial del Área Núcleo (CORE) ante variaciones en la profundidad de borde. La evaluación comparativa entre los periodos 1988-1998 y 2016-2018 permitió justificar la adopción metodológica del umbral de 200 m.

5.4 Parametrización de la Matriz de Contraste de Borde.

Para evaluar la interacción funcional entre distintas coberturas adyacentes, se definió una matriz de contraste de borde (*Edge Contrast Matrix*). Se debe asignar un valor para cada borde, este enfoque permite diferenciar la permeabilidad ecológica entre distintas coberturas, es decir la facilidad con la que los flujos (puede ser agua, de animales o energía) pueden atravesar las fronteras entre distinto tipo de suelo. Por ende, esta matriz asigna un peso de diferencia ecológica entre distintas coberturas.

Para asignar los valores se basó en la teoría de efectos de borde y gradiente de heterogeneidad en la ecología del paisaje (McGarigal et al., 2012; Forman & Godron, 1986). Bajo este criterio para transiciones naturales suave se asignaron valores bajos que van de los 0,2 a 0,4, este sería el caso de un paso de coberturas como pradera a matorral. En el caso de el paso a través de fronteras productivas como lo es el caso de la interacción de bosque nativo y plantaciones forestales, los valores asignados fueron moderados (0,4-0,7). Finalmente, los valores máximos fueron para aquellas interacciones que tienen como característica una discontinuidad estructural por ejemplo áreas urbanas con humedales, podemos asumir que existe una pérdida total de la permeabilidad de suelo. Esta calibración técnica es fundamental, ya que permite que el software pueda cuantificar la fragmentación funcional del paisaje, evaluando la permeabilidad de la cuenca hidrográfica más allá que solo la delimitación geográfica (Kupfer, 2012).

Tabla 4. Matriz de pesos de contraste de borde utilizada para el cálculo de métricas en FRAGSTATS

Cobertura	Agrícola	Praderas	Matorral	Forestal	Nativo	Humedal	Urbano	Improductivo
Agrícola	0.0	0.6	0.7	0.6	0.8	0.9	0.9	0.6
Praderas	0.6	0.0	0.2	0.5	0.4	0.5	0.9	0.7
Matorral	0.7	0.2	0.0	0.4	0.3	0.5	0.9	0.7
Forestal	0.6	0.5	0.4	0.0	0.4	0.7	0.9	0.7
Nativo	0.8	0.4	0.3	0.4	0.0	0.6	0.95	0.8
Humedal	0.9	0.5	0.5	0.7	0.6	0.0	1.0	0.9

Urbano	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9 5	1.0	0.0	0.8
Improdu ctivo	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	0.0

Nota. Elaboración propia. La matriz simétrica representa el grado de diferencia estructural y funcional entre dos coberturas adyacentes en una escala de 0 a 1. Un valor de 0 indica ausencia de contraste, mientras que valores cercanos a 1 representan barreras ecológicas e hidrológicas drásticas

5.5 Niveles de métricas (Landscape, Class, Patch).

Para cuantificar la estructura espacial de las 24 cuencas hidrográficas estudiadas es que a se seleccionaron métricas presentes en el software FRAGSTATS v4.2, en el cual hay tres niveles de organización jerárquicas y cada uno de esos niveles contiene métricas de paisaje. Estos tres niveles son paisaje (*Landscape*), clase (*Class*) y parche (*Patch*) (McGarigal & Marks, 1995). La selección de las métricas de cada nivel jerárquico no fue de forma aleatoria, más bien se fundamentó en la literatura de estudios similares que buscan explicar la alteración de los procesos hidrológico y su interacción con las cuencas hidrográficas (Boongaling et al., 2018; Hernández-Sosa et al., 2025).

- **Nivel Paisaje (Landscape):** Describe la estructura de la cuenca como una unidad total, evaluando la heterogeneidad general de los usos de suelo.
- **Nivel Clase (Class):** Analiza el comportamiento de coberturas específicas. La investigación se focaliza en **Bosque Nativo (BN)**, **Plantaciones Forestales (PFT)** y **Agricultura (AGR)** por su relevancia funcional en el ciclo hidrológico.
- **Nivel Parche (Patch):** Evalúa la geometría de fragmentos individuales, permitiendo el cálculo de áreas núcleo (CORE) y complejidad de forma.

6. Integración y análisis estadístico en R.

6.1 Preparación, integración y estructuración de datos en R.

Para evaluar de forma empírica la relación entre la configuración del paisaje y dinámica hidrológica, es que, para procesar los datos y el análisis estadístico de esta investigación, se ejecutaron se ejecutaron íntegramente en el entorno de programación R (R Core Team, 2021). Se optó por este lenguaje de programación debido a su eficiencia en el procesamiento de un gran volumen de información y que permite desarrollar análisis reproducibles a través de scripts.

En este caso, se utilizó tidyverse, el cual es un conjunto de paquetes ampliamente empleado en la limpieza, organización y visualización de datos, lo que permitió la integración de fuentes diversa, como lo es los resultados obtenidos de FRAGSTATS y las series hidrológicas de CAMELS-CL. A partir de esta herramienta es que se construyó un flujo de trabajo que fue de manera secuencial con el fin de transformar los resultados espaciales brutos en modelos analítico robusto. Para ello, se aplicaron funciones de unión como `left_join`, y técnicas que permiten un análisis multivariado que aseguran la integración y coherencia temporal de los datos. Las etapas metodológicas seguidas se presentan a continuación:

6.2 Consolidación de bases de datos y coherencia temporal.

Como parte del análisis estadístico, se comenzó en primera instancia en elaborar una base de datos maestra, la cual reunió la información espacial continua con la respuesta hídrica observada en las 24 cuencas. Este proceso se desarrolló mediante las siguientes rutinas de programación:

- **Unificación de registros:** Para poder ordenar los resultados generados por FRAGSTATS v4.2, es que se aplicaron rutinas de interacción y el uso de funciones `list.files()` y `bind_rows()`, se agruparon de forma masiva los archivos con extensiones `.class`, `.patch` y `.land` generados por FRAGSTATS v4.2. Lo anterior se realizó de manera independiente para cada escala, lo que permitió ordenar la información geométrica en tres bases de datos separadas para los niveles de Clase, Parche y Paisaje.

- **Focalización del Objetivo 2 (Nivel Clase):** Con el fin de abordar el segundo objetivo de esta investigación, el cual es “Caracterizar la configuración espacial del bosque nativo, las plantaciones forestales y la agricultura en los periodos 1988 a 2020, utilizando métricas de paisaje a nivel de clase, parche y paisaje”, es que se correlación exclusivamente a las métricas espaciales a nivel de clase, esto debido a que a dicha escala se permite evaluar la distribución y las propiedades agregadas de una cobertura específica al interior del paisaje (McGarigal & Marks, 1995). Bajo este criterio, el estudio se enfocó en Bosque Nativo, Plantaciones Forestales y Agricultura, se fundamenta con que estas coberturas concentran las transformaciones territoriales y ejercen una influencia sobre la infiltración, la retención hídrica y la regulación del caudal base a escala de cuenca (Hernández-Sosa et al., 2025; Martínez-Retureta et al., 2020).
- **Armonización hidrológica:** De acuerdo con las series diarias de caudal extraídas desde el explorador hidrológico CAMELS-CL, provisto por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) (Alvarez-Garretón et al., 2018), se calcularon los promedios tanto estacionales (invierno-verano) y anuales correspondiente a cada periodo desde 1988 a 2020, los cuales se distinguen en siete periodos cartográfico, de modo que la respuesta hídrica analizada para cada una de la cuenca, coincide con el estado de la cobertura de suelo para cada intervalo.
- **vinculación mediante *Left Join*:** La integración final se hizo mediante la función `left_join()`, principalmente se aplicó para la consolidación a nivel de clase y la base de caudales . para ellos se buscó resguardar que las métricas espaciales de cada periodo se vincularan solo con caudales del mismo intervalo, por lo cual las respuestas hidrológicas fueran consistentes con el estado de la cobertura de suelo para cada cuenca hidrográfica. Esta decisión metodológica permitió aislar y capturar la sensibilidad inmediata de la cuenca ante la degradación estructural de la vegetación (Boongaling et al., 2018; Martínez-Retureta et al., 2020)

6.3 Preparación, limpieza y estandarización de variables.

Una vez consolidadas las bases maestras tanto para los tres niveles de métricas espaciales y los datos de caudales diarios, se procedió en R una etapa de depuración y estandarización de

los datos. Con el fin de asegurar la consistencia del análisis, se aplicaron tres rutinas principales:

- **Depuración de cadenas de texto (Strings):** En los archivos que contienen los datos de las métricas espaciales, se detectaron espacio en blanco y algunos caracteres no deseados en las columnas categóricas. Por lo tanto para corregir esto, se utilizó la función `str_trim()` del paquete `stringr` (Wickham et al., 2019). Esto permitió estandarizar los nombres de las coberturas y evitar errores durante la agrupación de los datos espaciales. Todo esto con el fin de evitar errores de duplicación o clasificación durante la organización espacial de los datos
- **Corrección de formatos numéricos (Métrica CORE):** se detectó que algunos de los valores de la métrica Core fueron importados como texto debido al formato de origen del archivo, el cual usaba los puntos como separadores de miles y la coma como delimitadores de decimal. Por lo cual se implementó en el software Rstudio las funciones de `gsub()` y `str_replace()`, lo que permitió remover los puntos y normalizar la coma a un punto decimal estándar. Esta limpieza fue indispensable para lograr la conversión efectiva a tipo numérico mediante la función `as.numeric()`, garantizando que las operaciones matemáticas posteriores reconocieran la magnitud real de la superficie funcional de los parches
- **Estandarización paramétrica (Z-scores):** Debido a que las métricas de paisaje se presentan en distintas unidades y escales es que se optó por la estandarización mediante la función base `scale()`, transformando cada observación empírica en un valor de z-score, mediante la siguiente ecuación:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde x representa el valor observado, μ la media poblacional de la variable y σ su desviación estándar. Esta ecuación permite la transformación de todas las variables en una misma escala, con media 0 y desviación estándar de 1 evitando que las variables con magnitudes numéricas mayores (como el área) influyeran de forma desproporcionada en el Análisis de Componentes Principales (PCA) (Jackson, 2005).

6.4 Tratamiento de redundancia y selección de variables.

En primera instancia del proceso de configuración del software FRAGSTAST v4.2 se seleccionaron todas la métricas mencionadas y fundamentadas teóricamente en el apartado de antecedentes del presente estudio. Pero dada la alta dimensionalidad de la base de datos generadas y la presente dependencia matemática (colinealidad) entre índices del paisaje. Esta colinealidad la explica Boongaling en su estudio del año 2018, donde advierte que la multicolinealidad puede ser redundante y producir resultados engañosos (Boongaling et al., 2018). Por lo cual se debió aplicar un protocolo riguroso con el fin de reducir este tipo de resultados, para los cual se utilizó los resultados obtenidos de todos los índices procesado, los cuales fueron analizados a través del lenguaje de programación de RStudio, con el cual obtendremos los siguientes análisis estadísticos:

- **Evaluación de redundancia (Coeficiente de Pearson):** el primer paso fue el cálculo de la matriz de correlación para identificar aquellas métricas con asociaciones lineales muy altas ($r > 0.80$). El objetivo de ese procedimiento fue encontrar variables altamente redundantes y conservar solo aquellas que representan un descriptor representativo y robusto por cada dimensión estructural del paisaje. (fragmentación, aislamiento, conectividad y forma).
- **Análisis de Componentes Principales (PCA):** Para el conjunto de datos de métricas previamente depurado, se aplicó un PCA utilizando la librería FactoMineR en R. Este análisis multivariado da la facilidad para sintetizar la varianza del paisaje y seleccionar las métricas más representativas según su aporte en las primeras dos dimensiones del biplot (Jackson, 2005) asegurando que las variables escogidas representan de manera consistente las características y diferencian entre bosque nativo, plantaciones forestales y agricultura

Finalmente, se revisó y verifíco que todas las métricas significativas seleccionadas estuvieran estandarizadas correctamente por el proceso descrito anteriormente (Z-score), para que la varianza explicada por el modelo dependiera exclusivamente de los patrones espaciales (Jackson, 2005).

Tabla 5.. Set preliminar de métricas del paisaje evaluadas y su dimensión ecológica asociada.

Nivel	Métrica del Paisaje	Sigla (FRAGSTATS)	Dimensión Ecológica
Paisaje	Índice de Diversidad de Shannon	SHDI	Diversidad / Heterogeneidad
Paisaje	Índice de Equidad de Shannon	SHEI	Equidad / Distribución
Clase	Número de Parches	NP	Fragmentación
Clase	Densidad de Parches	PD	Fragmentación
Clase	Índice de Forma Promedio	SHAPE_MN	Forma / Complejidad
Clase	Dimensión Fractal Promedio	FRAC_MN	Complejidad de Forma
Clase	Índice de Proximidad Promedio	PROX_MN	Aislamiento / Cercanía
Clase	Índice de Similitud Promedio	SIMI_MN	Agregación / Contagio
Clase	Índice de Cohesión de Parches	COHESION	Conectividad Física
Clase	Índice de División del Paisaje	DIVISION	Aislamiento / Fragmentación

Nivel	Métrica del Paisaje	Sigla (FRAGSTATS)	Dimensión Ecológica
Parche	Área del Parche	AREA	Área / Extensión
Parche	Perímetro del Parche	PERIM	Borde
Parche	Índice de Forma	SHAPE	Forma
Parche	Dimensión Fractal	FRAC	Complejidad de Forma
Parche	Índice de Contigüidad	CONTIG	Conectividad Espacial
Parche	Área Núcleo	CORE	Calidad de Hábitat / Área Núcleo
Parche	Número de Áreas Núcleo	NCORE	Fragmentación Interna
Parche	Índice de Proximidad	PROX	Aislamiento Contextual
Parche	Índice de Similitud	SIMI	Composición Contextual
Parche	Índice de Contraste de Borde	ECON	Efecto Borde

Nota. Se presenta el conjunto inicial de métricas espaciales calculadas en FRAGSTATS a nivel de paisaje, clase y parche. Posteriormente, estas variables fueron evaluadas mediante PCA y análisis de colinealidad (ver Anexo 12) para detectar redundancias y definir un grupo final de indicadores más

sinéptico para el análisis del caudal base. En paralelo, la métrica de parche Área Núcleo (CORE) se utilizó únicamente para calibrar la profundidad del efecto borde (Edge Depth).

6.5 Pruebas estadísticas y análisis de correlación (Spearman).

La relación entre la configuración espacial del paisaje y la respuesta hidrológica de las cuencas, expresadas a través de caudales estacionales y anuales, se abordó mediante un análisis de correlación bivariada. Con anterioridad, se examinó la distribución de los datos con el fin de seleccionar el estadístico más adecuado. El procedimiento fue desarrollado de manera secuencial en el entorno de programación R.

- **Evaluación de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilk):** en esta etapa se evaluó si las variables continuas cumplían con el supuesto de normalidad paramétrica, esto mediante la prueba del test de Shapiro-Wilk mediante la función base `shapiro.test()` (Shapiro & Wilk, 1965). Los resultados dieron cuenta que una proporción importante de las series hidrológicas y de las métricas de paisaje no seguía una distribución normal, ya que presentaba una asimetría significativa ($p < 0,05$). Este comportamiento es esperable en análisis de variables ambientales y caudales, debido a la variabilidad climática interanual y la heterogeneidad espacial propia de las cuencas (Martínez-Retureta et al., 2020).
- **Correlación no paramétrica (Coeficiente de Spearman):** ya que no se cumplió con el supuesto de normalidad en las variables mencionadas anteriormente, es que se descartó el uso del coeficiente lineal de Person para evitar sesgo analítico y se optó por el método no paramétrico de Spearman, por lo cual se ocupó la función `cor.test(method = "spearman")` presente en el software R. La elección de este método se fundamenta en su alta robustez frente a valores atípicos y su capacidad para evaluar las relaciones monótonas de carácter no lineal. Su uso ha sido respaldado por estudios hidroecológicos, especialmente para evaluar como los cambios en la estructura del paisaje, como es el caso de la fragmentación o la pérdida de conectividad, se relaciona con las variaciones del caudal (Barrientos et al., 2020; Boongaling et al., 2018; Hernández-Sosa et al., 2025; Shi et al., 2013; Wei et al., 2023).

La unidad de muestral se construyó a partir de las 24 cuencas y los 7 periodos evaluados,

generando un total de 168 observaciones por cada cobertura analizada. Se adoptó un nivel de significancia de $p < 0,05$, priorizando la detección de patrones generales en un contexto de alta variabilidad climática. Esto permitió identificar qué dimensiones estructurales del paisaje se asocian de manera significativa con la regulación hídrica de las cuencas en estudio. Para la evaluación visual de multicolinealidad entre las matrices, es que se utilizó el paquete ggcorrplot en el entorno R, así representar de forma gráfica y simultánea las agrupaciones (clústeres) de variables redundantes que superaron el umbral crítico establecido de correlación ($|r| > 0.80$), facilitando la toma de decisiones para su posterior discriminación del modelo. Para la síntesis e interpretación visual de los resultados hidrológicos, los coeficientes de Spearman (Rho) resultantes fueron representados mediante un mapa de calor (Heatmap). Este formato permitió contrastar gráficamente la sensibilidad estacional del sistema hídrico (verano, invierno y anual) frente a la configuración de las distintas clases de uso de suelo

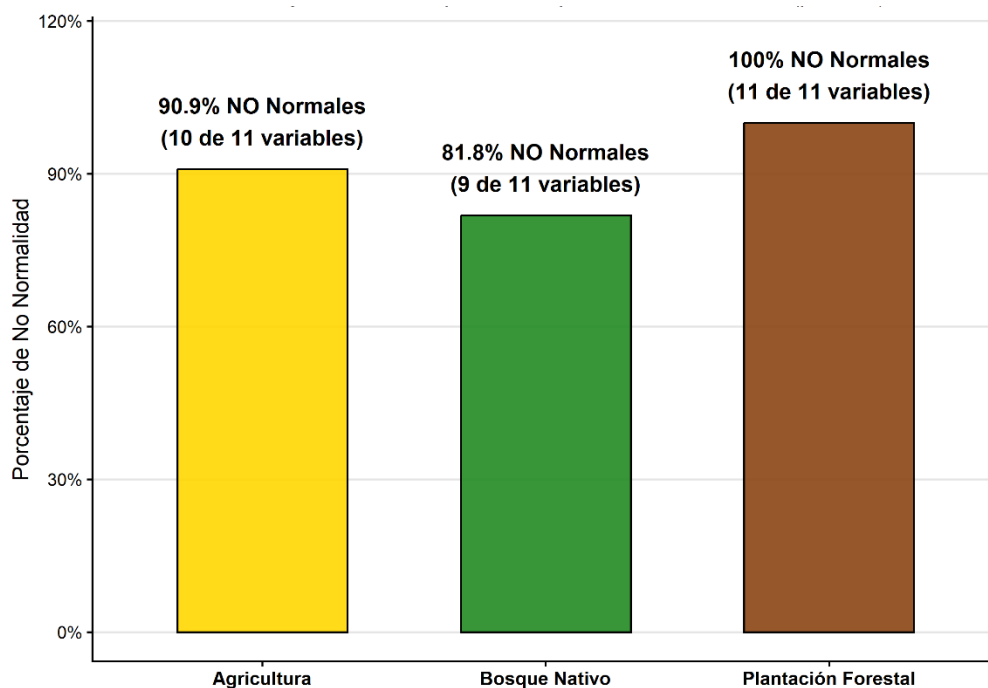


Figura 4. Análisis exploratorio y justificación del estadístico de correlación. La evidencia de asimetría en la distribución de los datos hidro-espaciales y la presencia de relaciones monótonas no lineales sustentan la elección del coeficiente no paramétrico de Spearman por sobre aproximaciones paramétricas tradicionales.

6.6 Modelación de tendencias y visualización multivariada.

Para la investigación de las interacciones espacio-temporal entre las métricas de paisaje y sus respectivas dinámicas hidrológicas de las 24 cuencas de estudio, es que a través del software R se construyó una visualización analítica (R Core Team, 2021), para lo cual se utilizaron los siguientes paquetes *ggplot2*, *FactoMineR* y *factoextra* (Wickham et al., 2019). Esta fase de modelación visual se estructuró en tres enfoques metodológicos fundamentales:

- **Caracterización Multivariada (PCA):** para evaluar el comportamiento del conjunto de las cuencas y su evolución a lo largo de la línea temporal, es que se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA), sobre las métricas espaciales definitivas que fueron estandarizada mediante la función de Z-score previamente, para asegurar que todas tuvieran el mismo peso estadístico y evitar que aquellas de mayor magnitud dominaran la varianza (Jackson, 2005). La generación de biplots (Círculo de Correlaciones y Gráfico de Individuos), otorgo el poder identificar agrupamientos espaciales y sintetizar en dos dimensiones principales, como los cambios de uso de suelo han reconfigurado la matriz de paisaje en la zona centro sur de Chile.
- **Modelación de Tendencias no Lineales (LOESS):** Con el fin de poder representar las correlaciones entre métricas de paisaje y sus caudales correspondientes, es que se construyeron a través del software Rstudio, gráficos de dispersión (scatter plots). Debido a que las variables ambientales no presentan un comportamiento lineal o paramétrico, fue que se adjuntaron curvas de regresión local ponderada (LOESS - *Locally Estimated Scatterplot Smoothing*). Se aplicó esta técnica a razón de que permite visualizar de forma fluida la trayectoria y los umbrales de las respuestas hídricas ante la alteración de las coberturas presentes en las cuencas. Adicionalmente, debido a la alta varianza en la magnitud de las descargas entre las distintas cuencas, el eje de respuesta hídrica fue transformado a una escala logarítmica base 10 (*Log10*), optimizando la legibilidad gráfica de los caudales extremos sin introducir sesgos en el modelo (Koch & Smillie, 1986). Para el análisis en profundidad del periodo crítico de estiaje (verano), se construyó un panel multiparamétrico (Faceted Plot). Este diseño permitió contrastar simultáneamente las respuestas no lineales del caudal base frente a las dinámicas de fragmentación (PD),

aislamiento (PROX_MN) y complejidad de forma (SHAPE_MN) a través de las tres coberturas principales (BN, PFT, AGR)

- **Análisis de Evolución Temporal por Cuenca:** Para evaluar la trayectoria histórica específica de cada unidad espacial, se generaron 24 gráficos de evolución comparativa (uno por cada cuenca hidrográfica). Estas representaciones visuales permitieron contrastar de manera directa las fluctuaciones del régimen hídrico estival frente a las transformaciones estructurales de las coberturas de suelo (bosque nativo, plantaciones forestales y agricultura) a lo largo del periodo de estudio, dando respuesta directa al objetivo de caracterización temporal de la investigación.

IV. Resultados y discusión

1. Caracterización general de las unidades de análisis

Para comenzar, se describió las características físicas y geográficas de cada una de las 24 cuencas hidrográficas, que se encuentran distribuidas en la zona centro sur de Chile, (específicamente entre las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía y Los Lagos; ver figura 1 en Metodología), podemos observar la existencia de una alta heterogeneidad latitudinal y longitudinal. En esta zona del país se comprenden clima mediterráneo hasta condiciones templada lluviosa se encuentran entre más al sur ubicada la cuenca, manteniendo en toda la zona una marcada estacionalidad, con inviernos predominantemente húmedos y veranos secos (Alvarez-Garretón et al., 2018; Garreaud et al., 2017). Desde un punto de vista topográfico, es que observamos que la distribución de las cuencas es un amplio gradiente altitudinal, es decir abarca desde la Cordillera de los Andes hasta la Cordillera de la costa, lo que da a regímenes hidrológicos diversos, desde sistemas nivopluviales principalmente en sectores andinos, hasta regímenes pluviales en cuencas ubicadas en el sector costero (Barrientos et al., 2020).

En las últimas décadas esta dinámica hídrica se ha visto afectada por una fuerte mega sequía, lo cual ha intensificado el estrés hídrico en la zona centro-sur de Chile (Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2020). Esto a nivel de análisis de cobertura, se puede explicar con la transformación territorial drástica analizada en los periodos de 1988 a 2020, época que ha estado marcado por la pérdida y degradación del bosque nativo, el cual ha sido sustituido por una expansión de característica homogénea y constante de plantaciones forestales de especie exóticas como solo son el *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. y, en paralelo, por el mantenimiento de áreas destinadas a la Agricultura intensiva (Aguayo et al., 2009; Alvarez-Garretón et al., 2019; Heilmayr et al., 2016). Estos cambios no solo modifican la composición del paisaje, sino también su configuración espacial, favoreciendo a el aumento de fenómenos como lo son la favoreciendo la fragmentación, reduciendo la conectividad ecológica y afectando la capacidad de regulación hídrica de las cuencas (Hernández-Sosa et al., 2025; Martínez-Retureta et al., 2020).

Como se observa en la Tabla 6, el paisaje presenta una notable heterogeneidad espacial y una dinámica de cambio centrada en las tres clases de cobertura dominantes: Bosque Nativo (BN), Plantaciones Forestales (PFT) y Agricultura (AGR)

Tabla 6. Composición porcentual promedio de las coberturas de suelo en los periodos clave del estudio

Periodo	Cobertura	% (Promedio)	Composición
M0 (1988 - 1998)	Bosque Nativo (BN)	18.63 %	
	Plantaciones Forestales (PFT)	34.56 %	
	Agricultura (AGR)	19.67 %	
M3 (2008 - 2010)	Bosque Nativo (BN)	19.95 %	
	Plantaciones Forestales (PFT)	30.53 %	
	Agricultura (AGR)	22.21 %	
M6 (2019 - 2020)	Bosque Nativo (BN)	19.29 %	
	Plantaciones Forestales (PFT)	32.87 %	
	Agricultura (AGR)	20.43 %	

Nota: El porcentaje de composición corresponde al valor promedio de la métrica PLAND (Percentage of Landscape) calculada para las 24 unidades de análisis. La suma no totaliza el 100% debido a la presencia de coberturas menores no integradas en el análisis principal.

Al analizar la trayectoria temporal, se destaca que la superficie de bosque nativo se mantiene alrededor de un 19% de ocupación promedio. Notamos que, al no variar de forma drástica, las alteraciones en la disminución del caudal de los últimos 30 años, no solo se explican por la superficie total y su composición, de hecho, la literatura nos advierte que la configuración espacial ya sea la forma, conectividad y fragmentación de los parches es una de las condicionante para proceso hidrológicos como la infiltración, retención y escorrentía (Boongaling et al., 2018; Shi et al., 2013). Por consiguiente, la alteración del caudal base respondería fuertemente a una reestructuración física de la matriz del paisaje, aspecto que se profundiza y fundamenta mediante el análisis multivariado en las secciones siguientes (Hernández-Sosa et al., 2025; Wei et al., 2023).

1.1 Descripción geográfica de las unidades de análisis.

Para obtener una caracterización de las coberturas, es que se presenta la tabla el detalle de la superficie total analizada para cada una de las cuencas hidrográficas. Se compara el estado inicial (1988-1998) y el estado final (2020) permite observar la consistencia espacial de las unidades de análisis a lo largo de los 32 años de estudio.

Tabla 7. Caracterización geográfica e hidrológica de las unidades de análisis (Estaciones Fluviométricas)

Región	Unidad de Análisis (Estación Fluviométrica)	Código Estación	Macroforma Principal	Régimen Hidrológico
Maule	Estero Upeo en Upeo	7116001	Cordillera de los Andes	Pluvio-nival
Maule	Estero Los Puercos en Puente Los Puercos	7381001	Valle Central / Secano	Pluvial
Maule	Río Purapel en Sauzal	7343001	Cordillera de la Costa	Pluvial
Maule	Estero Curipeumo en Lo Hernández	7335002	Cordillera de la Costa Oriental	Pluvial
Maule	Río Achibueno en La Recova	7354002	Cordillera de los Andes	Pluvio-nival

Región	Unidad de Análisis (Estación Fluviométrica)	Código Estación	Macroforma Principal	Régimen Hidrológico
Maule	Río Cauquenes en El Arrayán	7336001	Cordillera de la Costa	Pluvial
Maule	Río Perquillauquén en Ñiquén	7332001	Valle Central	Pluvial
Ñuble	Río Chillán en Camino a Confluencia	8117005	Cordillera de los Andes	Pluvio-nival
Ñuble	Río Itata en Trilaleo	8124002	Valle Central	Pluvio-nival
Biobío	Río Andalién Camino a Penco	8220001	Cordillera de la Costa	Pluvial
Biobío	Río Rucue en Camino a Antuco	8376001	Cordillera de los Andes	Pluvio-nival
Biobío	Río Duqueco en Cerrillos	8323001	Valle Central	Pluvio-nival
Biobío	Río Duqueco en Villucura	8323002	Cordillera de los Andes	Pluvio-nival
Biobío	Río Nicodahue en Pichún	8362001	Valle Central / Costa	Pluvial

Región	Unidad de Análisis (Estación Fluviométrica)	Código Estación	Macroforma Principal	Régimen Hidrológico
Biobío	Río Biobío en Coihue	8334001	Valle Central	Pluvio-nival
Biobío	Río Lleu-Lleu en Desagüe Lago Lleu-Lleu	8910001	Cordillera de la Costa	Pluvial
La Araucanía	Río Renaico en Longitudinal	8342001	Cordillera de los Andes	Pluvio-nival
La Araucanía	Río Lumaco en Lumaco	9102001	Cordillera de la Costa	Pluvial
La Araucanía	Estero Chufquén en Chufquén	9107001	Valle Central	Pluvial
La Araucanía	Río Collin en Codahue	9126001	Valle Central	Pluvial
La Araucanía	Río Quepe en Vilcún	9131001	Precordillera	Pluvio-nival
La Araucanía	Río Allipén en Los Laureles	9404001	Cordillera de los Andes	Pluvio-nival
La Araucanía	Río Toltén en Teodoro Schmidt	9437002	Valle Central	Pluvio-nival

Región	Unidad de Análisis (Estación Fluviométrica)	Código Estación	Macroforma Principal	Régimen Hidrológico
Los Lagos	Río Rahue	10364001	Valle Central	Pluvio-nival

Nota. Identificación de las 24 estaciones fluviométricas analizadas, su macroforma de origen y régimen hidrológico. El área de estudio abarca un continuo territorial desde la región del Maule hasta La Araucanía, con la excepción del Río Rahue (región de Los Lagos), incluido estratégicamente para ampliar el gradiente de *evaluación paisajística*.

2. Depuración y selección de métricas del paisaje (Objetivo 1 - Fase 1)

Debido a que el software FRAGSTATS genera una gran cantidad de indicadores de métricas, existe la posibilidad de una redundancia estadística es decir una multicolinealidad, por lo cual se aplicó un protocolo de depuración en dos fases, con el fin de permitir asegurar que las métricas finales representan de forma clara los aspectos ecológicos, evitando repeticiones o sesgo en los análisis posteriores con relaciones a los caudales.

2.1 Análisis de redundancia mediante matriz de Pearson:

En la primera etapa de análisis estadístico, se aplicó una matriz de correlación de Pearson a las métricas del a nivel de parche, clase y paisaje, esto con el fin de identificar aquellas variables que fueran altamente redundantes ósea un $r > 0.80$. En la literatura de ecología del paisaje, es ampliamente reconocido que las métricas espaciales derivadas de usos de suelo exhiben una fuerte redundancia matemática; por lo tanto, omitir este filtro de depuración puede confundir los análisis correlacionales posteriores y generar resultados estadísticos engañosos (Boongaling et al., 2018; Shi et al., 2013).

A través de el grafico de Heatmap de correlación se identifican bloques de alta redundancia, como son los casos de NP y PD, esto se puede explicar porque NP es una métrica que depende

en demasía del tamaño total de cada cuenca, fue uno de los motivos por lo cual se optó por PD, ya que esta última funciona como un indicador estandarizado por área (parches/100 ha), lo que permite una comparación robusta, proporcional y equitativa entre cuencas de distinta magnitud superficial, por lo cual permite comparaciones más consistentes entre cuencas de distinta superficie (McGarigal & Marks, 1995).

Otro caso es el de métricas que analizan la forma y complejidad de las cuencas como es el caso entre SHAPE_MN y FRAC_MN, que también como el caso anterior presentaron alta redundancia estadística al medir atributos espaciales similares. Ante esto, se optó por mantener SHAPE_MN debido a que constituye un indicador directo y más intuitivo para representar el grado de intervención antrópica y la geometrización en los límites de los parches forestales y agrícolas.

Este filtrado permitió construir un conjunto final de métricas independiente y robustas, reduciendo los sesgos y mejorando la capacidad de los análisis multivariados posteriores

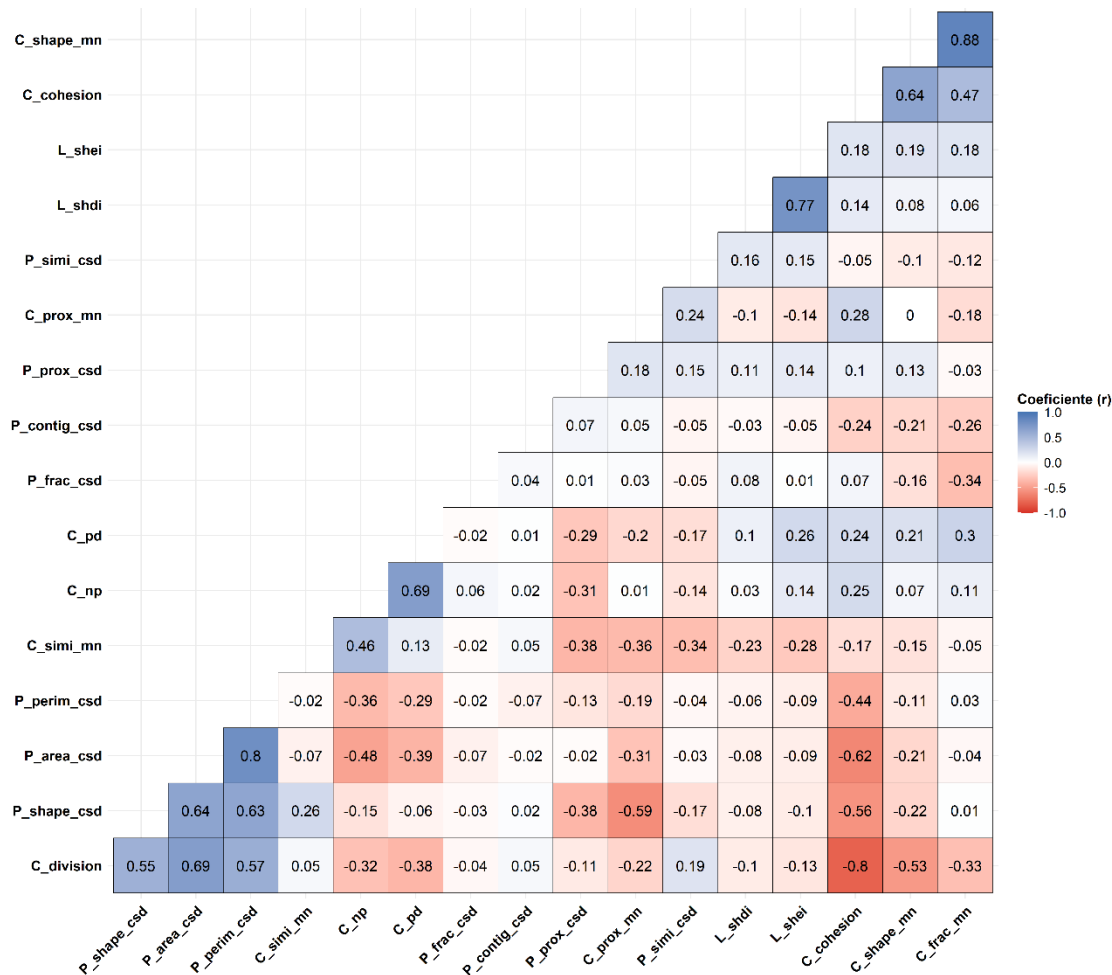


Figura 5. Matriz de correlación de Pearson para las métricas del paisaje. Los tonos rojizos indican correlaciones positivas fuertes, mientras que los tonos azulados representan correlaciones negativas. Las asociaciones críticas ($r > 0.80$) justificaron la exclusión de métricas redundantes.

Como se observa en la Matriz de Correlación (figura 5), el paisaje presenta altos niveles de redundancia interna. La selección final priorizó métricas de nivel de Clase (Class level) sobre las de Paisaje, debido a que permiten diferenciar el comportamiento específico del Bosque Nativo frente a las Plantaciones. La eliminación de variables con un coeficiente de Pearson $|r| > 0.80$ redujo el set de datos original de más de 40 indicadores a un grupo de 7 métricas independientes, evitando así la sobreestimación de procesos en el posterior Análisis de Componentes Principales (PCA).

Con el respaldo de la matriz de correlación (figura 5), existen un alto nivel de redundancia internas por ende la selección de métricas se priorizo en primera instancia a nivel de clase, esto porque permite diferenciar el comportamiento especie entre las tres coberturas de estudio y la eliminación de variables que variables con un coeficiente de Pearson $|r| > 0.80$ redujo el set de datos original de más de 40 indicadores a un grupo de 7 métricas independientes, evitando así la sobreestimación de procesos en el posterior Análisis de Componentes Principales (PCA).

Tabla 8. Criterios de depuración y selección de métricas representativas según análisis de colinealidad

Proceso Paisaje	Métrica(s) Redundante(s)	Métrica Seleccionada	Justificación Técnica
Fragmentación / Cantidad	NP (Número de Parches)	PD (Densidad de Parches)	NP depende del tamaño de la cuenca. PD estandariza el conteo a 100 ha, permitiendo comparar cuencas de distinto tamaño.
Complejidad de Forma	FRAC_MN (Dimensión Fractal)	SHAPE_MN (Índice de Forma)	Ambas miden irregularidad de bordes ($r > 0.9$). SHAPE_MN es más sensible a la transición de formas naturales a geométricas (humanas).
Conectividad Física	CONNECT (Índice de Conectividad)	COHESION	Presentan alta correlación. COHESION es más robusta para evaluar la continuidad de los parches de Bosque Nativo.
Aislamiento Cercanía	ENN_MN (Distancia al vecino más cercano)	PROX_MN (Índice de Proximidad)	PROX_MN considera tanto la distancia como el área de los parches vecinos, siendo un mejor descriptor ecológico.
Diversidad de Paisaje	SHEI (Equidad de Shannon)	SHDI (Diversidad de Shannon)	Se prefiere SHDI por ser el estándar más utilizado en

Proceso	del Métrica(s)	Métrica	Justificación Técnica
Paisaje	Redundante(s)	Seleccionada	ecología del paisaje.

Nota: Métricas de paisaje seleccionadas mediante análisis de redundancia realizado en el software Rstudio y su justificación técnica

2.2 Análisis de Componentes Principales (PCA).

Luego de la depuración de las variables redundantes mediante la matriz de correlación de Pearson, es que se ejecutó un Análisis de Componentes Principales (PCA) con las 10 métricas que presentaron mayor relevancia tanto teórica como estadística. Se realiza este PCA para poder comprender que variables explican la mayor parte de la varianza de la configuración espacial de las cuencas de estudio.

Con respecto a lo anterior, cabe destacar que antes de definir el modelo final, se analizaron todas las métricas mediante correlación de Spearman. Aunque algunos índices tales como Dimensión Fractal (FRAC_MN), Similitud (SIMI_MN) y Cohesión mostraron ser muy significativos individualmente, se decidió no incluirlos en el PCA. Esta decisión fue en base a que dichas métricas miden aspectos similares por lo cual habría una redundancia, lo que al incluirlas habría generado un ruido estadístico, es que es por eso que seleccionamos un grupo de variables de métricas independientes que representan con claridad procesos distintos, como lo son la fragmentación, el aislamiento y la conectividad, logrando así un modelo más sólido y con mayor capacidad, el cual evita la redundancia de información (Cushman et al., 2008).

En la siguiente figura N°6 (Biplot del PCA), las dos primeras dimensiones explican el 41.5% de la varianza total acumulada (26.2% en Dim.1 y 15.3% en Dim.2). Este resultado permite confirmar que el paisaje se estructura principalmente a través de un gradiente de fragmentación (Dim.1) y un gradiente de complejidad de forma y diversidad (Dim.2).

- **Bosque Nativo (BN):** En el PCA se ubica principalmente hacia el lado izquierdo, el cual está asociado a los índices de división, lo que indica que este tipo de cobertura presenta una condición más fragmentada y discontinua. Lo anterior ratifica que la forma del bosque nativo en el área de estudio ha perdido continuidad y se comporta como un "archipiélago" de parches aislados, lo que restringe su capacidad para sostener de forma óptima los procesos de infiltración (Hernández-Sosa et al., 2025; Wei et al., 2023).
- **Plantaciones Forestales (PFT):** En el caso de las plantaciones forestales, ocupan el lado opuesto, el cual se encuentra más ligado a las métricas vinculadas a mayores niveles de cohesión, por ende, es una estructura más continua y tiende a ser de índole homogénea, como si fuera bloques macizos y continuos, siendo las típicas de plantaciones intensivas, que tienden a simplificar el paisaje y modificar su regulación hídrica (Alvarez-Garretón et al., 2019; Huber et al., 2010; Martínez-Retureta et al., 2020).
- **Áreas Agrícolas (AGR):** Se ubican en una posición intermedia y central respecto al gradiente principal de fragmentación. Cuenta con una alta dispersión a lo largo de la dimensión 2, lo que indica un paisaje más heterogéneo con una clara transición espacial entre geometrías simple e intensivas propias de la agricultura industrial, pero también presenta formas de indoles irregulares que se pueden asociar a la actividad agrícola tradicional. (agricultura tradicional o de secano) (Boongaling et al., 2018).

El modelo confirma que el paisaje de las cuencas de estudio está polarizado: por un lado, un bosque nativo desarticulado y fragmentado por procesos históricos y antrópicos, y por otro, una matriz forestal productiva altamente conectada y homogénea. Las áreas agrícolas actúan como una zona de transición estructural con alta variabilidad en su complejidad de forma.

Tabla 9. Contribución porcentual de las métricas de paisaje a los componentes principales (Dim. 1 y Dim. 2).

Métrica de Paisaje	Sigla	Contribución Dim. 1 (%)	Contribución Dim. 2 (%)
Índice de División	C_DIVISION	16.6%	0.1%
Índice de Cohesión	C_COHESION	6.9%	0.2%
Desviación de Forma	P_SHAPE_CSD	8.0%	0.8%
Diversidad de Shannon	L_SHDI	5.2%	13.0%
Índice de Proximidad	P_PROX_MN	4.9%	12.9%

Nota: análisis de contribución de cada métrica a través de PCA elaborado a partir de los datos extraídos de Fragstast y procesados en el software Rstudio.

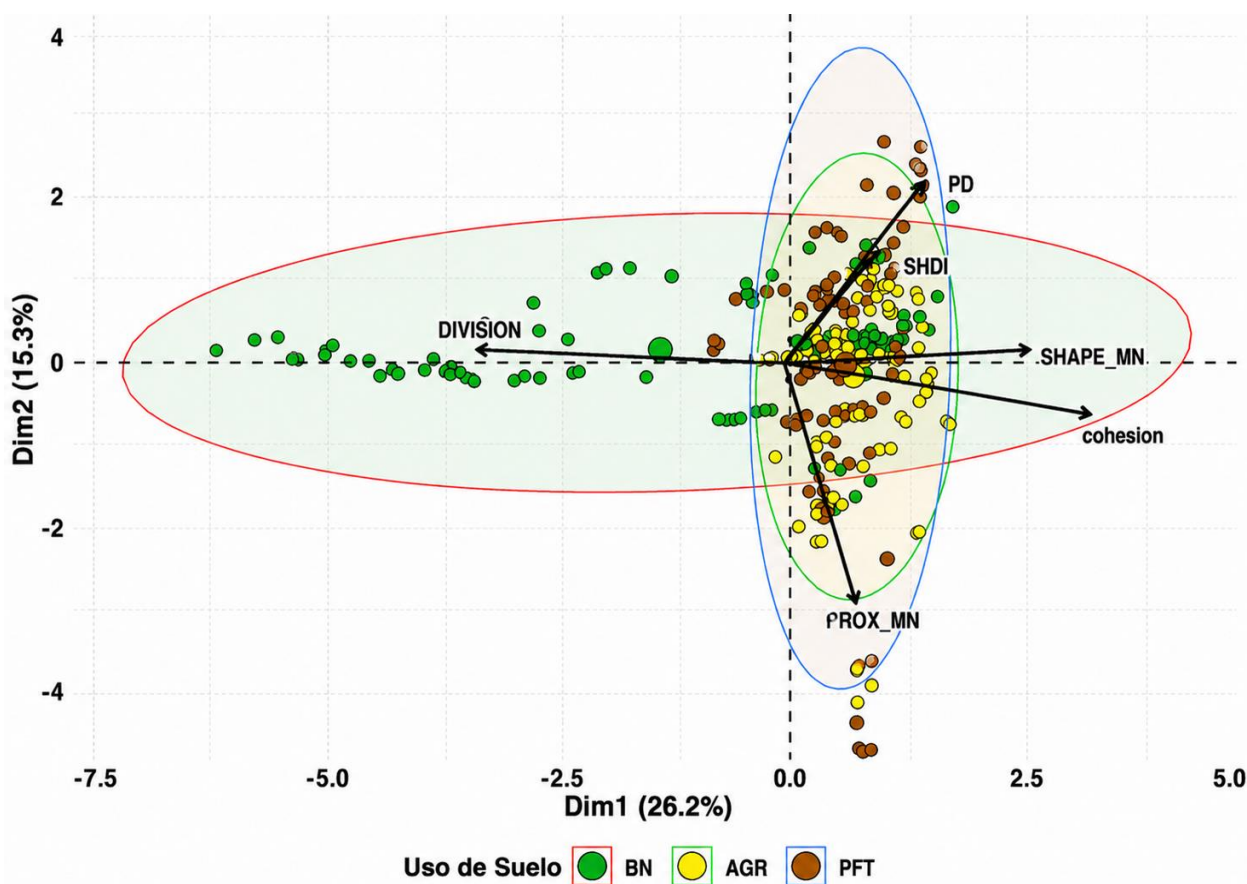


Figura 6. Ordenación espacial del paisaje mediante Análisis de Componentes Principales (PCA). > Distribución de las cuencas según cobertura (Bosque Nativo, Plantaciones Forestales y Áreas Agrícolas) en función de las principales métricas estructurales. El primer eje (Dimensión 1) ilustra un gradiente de fragmentación impulsado por la División y la Cohesión, mientras que el segundo eje (Dimensión 2) está traccionado por la diversidad (Índice de Shannon) y complejidad del parche. Las elipses indican el nivel de confianza del 95% por clase

2.3 Definición del set final de indicadores.

Posterior a aplicar los filtros de redundancia con la matriz de Pearson y evaluar la varianza explicada mediante el PCA, es que se determina un conjunto final de siete métricas espaciales representativas de la estructura del paisaje, disminuyendo la multicolinealidad y evitando los sesgo al momento del análisis hidrológico (Cushman et al., 2008; Fang et al., 2015)

- **Índice de División (DIVISION) e Índice de Cohesión (COHESION):** Ambas métricas se seleccionaron por su alta contribución al primer componente del Pca, y es que a su vez describen dos condiciones opuestas en el paisaje, la división refleja la fragmentación espacial, pero la cohesión representa la continuidad física entre parches, especialmente visibles en las plantaciones forestales (Hernández-Sosa et al., 2025). Ambas métricas han sido utilizadas y permiten interpretar si la configuración del paisaje favorece o no, a proceso hidrológico como es la escorrentía (Boongaling et al., 2018; Wei et al., 2023).
- **Densidad de Parches (PD):** se seleccionó por sobre métricas como NP, para evitar la redundancia analítica y cumplir con el principio de parsimonia en la modelación espacial (Cushman et al., 2008). Dado que PD expresa la fragmentación de una forma estandarizada de número de fragmentos por cada 100 hectáreas. Esto permite comparar cuencas de distinto tamaño sin que el área total distorsione los resultados. Estudios consideran la métrica PD como un descriptor más robusto y preciso para cuantificar la subdivisión física del paisaje y así poder evaluar su impacto sobre los procesos hidrológicos (Boongaling et al., 2018; Hernández-Sosa et al., 2025; Shi et al., 2013).
- **Índice de Forma Medio (SHAPE_MN):** La selección de esta métrica porque nos permite diferenciar formas simples y rectilíneas, asociadas a coberturas con mayor intervención, de borde con formas irregulares, propio de coberturas naturales. Además, según estudios a nivel hídrico, una mayor complejidad en la forma de los parches incrementa el perímetro de contacto por ende favorece a la retención hídrica por fricción superficial (Boongaling et al., 2018; Wu, 2013)
- **Proximidad Media (PROX_MN):** La selección de esta métrica se debe a su peso en el segundo componente del PCA. Este descriptor integra tanto la distancia física euclidiana entre los parches como el área de los mismo, definiendo el grado de aislamiento y permeabilidad real de la estructura del paisaje para evaluar la conectividad de los flujos superficiales y subsuperficiales (Hernández-Sosa et al., 2025)

A modo de síntesis, la Tabla 10 detalla el conjunto definitivo de indicadores que será utilizado

para modelar la respuesta hidrológica (Objetivo 2), integrando su definición geométrica y su interpretación teórica sobre la dinámica del caudal.

Tabla 10. Síntesis ecológica e hidrológica de las métricas de paisaje seleccionadas.

Nivel	Métrica (Sigla)	Función Ecológica
Clase	Densidad de Parches (PD)	Fragmentación: Subdivisión física del ecosistema (Fahrig, 2003).
Clase	Índice de División (DIVISION)	Aislamiento: Probabilidad de desconexión entre parches.
Clase	Índice de Cohesión (COHESION)	Conectividad: Continuidad e interconexión estructural.
Clase	Proximidad Media (PROX_MN)	Cercanía: Nivel de agrupación entre parches vecinos.
Clase	Forma Media (SHAPE_MN)	Geometría: Irregularidad en los bordes de un parche (Wu, 2013).
Paisaje	Diversidad de Shannon (SHDI)	Heterogeneidad: Diversidad y equidad de las coberturas.

Nota: Elaboración propia basada en las definiciones de FRAGSTATS (McGarigal & Marks, 1995) y literatura hidro-ecológica contemporánea

3. Comportamiento espaciotemporal de la cobertura de suelo (Objetivo 1 - Fase 2)

3.1 Evolución estructural por periodo (1988–2020)

Diversos autores han evidenciado, que, durante las últimas décadas, la dinámica a nivel global y regional ha estado sujeta a una pérdida progresiva de la diversidad del paisaje, pasando a una fuerte homogeneización de la estructura del paisaje. En el caso de Chile, en específico en el centro sur del país, se ha documentado como la acelerada sustitución de uso de tipo de suelo, en este caso el avance de monocultivos forestales y la agricultura intensiva, ha simplificado la complejidad natural de la estructura de las cuencas (Aguayo et al. 2009; Echeverría et al. 2012; Miranda et al. 2015). Uno de los efectos de esta pérdida de diversidad espacial es la pérdida de capacidad de amortiguamientos de los ecosistema frente a perturbaciones climáticas.

Para cuantificar objetivamente este cambio de uso del suelo, se ha adoptado el índice de diversidad de Shannon (SHDI) como una medida estándar en varios estudios en ecología del paisaje y de la hidrología. Autores como Lang et al. (2008), Shi et al. (2013) y Da Silva et al. (2015) han utilizado el SHDI para demostrar que paisajes heterogéneos regulan de manera más eficiente los procesos de infiltración, escorrentía y retención de sedimentos. En Chile, existen estudios aplicados a cuencas como el caso de Hernández-Sosa et al., (2025), en los cuales se registra el uso de esta métrica, ya que es un descriptor fundamental para comprender la resiliencia hídrica, demostrando que su disminución está directamente relacionada con las alteraciones en los procesos hidrológicos a escala de la cuenca.

Tabla 11. Escala de interpretación ecológica del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI).

Valor SHDI	Nivel de Diversidad	Interpretación Estructural y Ecológica
		* Dominancia absoluta de una sola cobertura.
Cercano a 0	Nula	* Nula capacidad de amortiguamiento. * Matriz territorial fuertemente simplificada.
0.1 – 0.5	Baja	* Alta vulnerabilidad a perturbaciones. * Coexistencia desigual de múltiples clases.
0.6 – 0.9	Media	* Paisaje en estado de transición activa. * Mosaico paisajístico rico y equitativo.
≥ 1.0	Alta	* Alta resiliencia hidrológica y ecológica.

Nota: Interpretación de los valores del índice de diversidad SHDI

Con respecto a lo anterior, se realizó el análisis de la trayectoria temporal del SHDI para las 24 cuencas de estudio, desde el año 1988 al 2020, en primera instancia la trayectoria temporal del SHDI promedio para las cuencas revela una tendencia hacia la homogeneización estructural como se observe en a la figura 7, se visualiza un declive sostenido de la diversidad de paisaje

pasando de un promedio cercano a la heterogeneidad (0,95) en los primeros periodos hasta un valor de 0,89 en los últimos periodos de estudios

Tabla 12. Análisis de fase de evolución de SHDI

Periodo	Fase de Evolución	SHDI	Implicancia Territorial
1988 - 2002	Primera caída	0.958 a 0.943	Inicio de la homogenización y alteración de las coberturas originales.
2004 - 2010	Punto de inflexión	0.946 a 0.939	Quiebre ecológico irreversible en 2008 que inicia un declive sostenido.
2012 - 2020	Homogenización consolidada	~0.893	Paisaje estancado en su mínima diversidad, dominado por matrices simplificadas.

Nota: Los valores del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) presentados corresponden al promedio espacial de las 24 cuencas analizadas para cada periodo.

Para confirmar que este declive de la diversidad en las cuencas del centro sur de Chile, es que se evaluó la trayectoria longitudinal para cada una de las cuencas figura 7. Podemos notar que en los periodos iniciales existía una alta heterogeneidad en la diversidad basal, por ejemplo, en cuencas como las siguientes Río Andalién camino a Penco o el Río Cauquenes en El Arrayán exhibían índices en el rango de "Diversidad Alta" (≈ 1.0), mientras que otras de carácter preandino, como el Río Toltén en Teodoro Schmidt o el Río Quepe en Vilcún, partían desde umbrales de diversidad media-baja. No obstante, independiente de la configuración espacial de origen de las cuencas, la mayoría experimentó un declive direccional hacia la homogenización hacia el último periodo

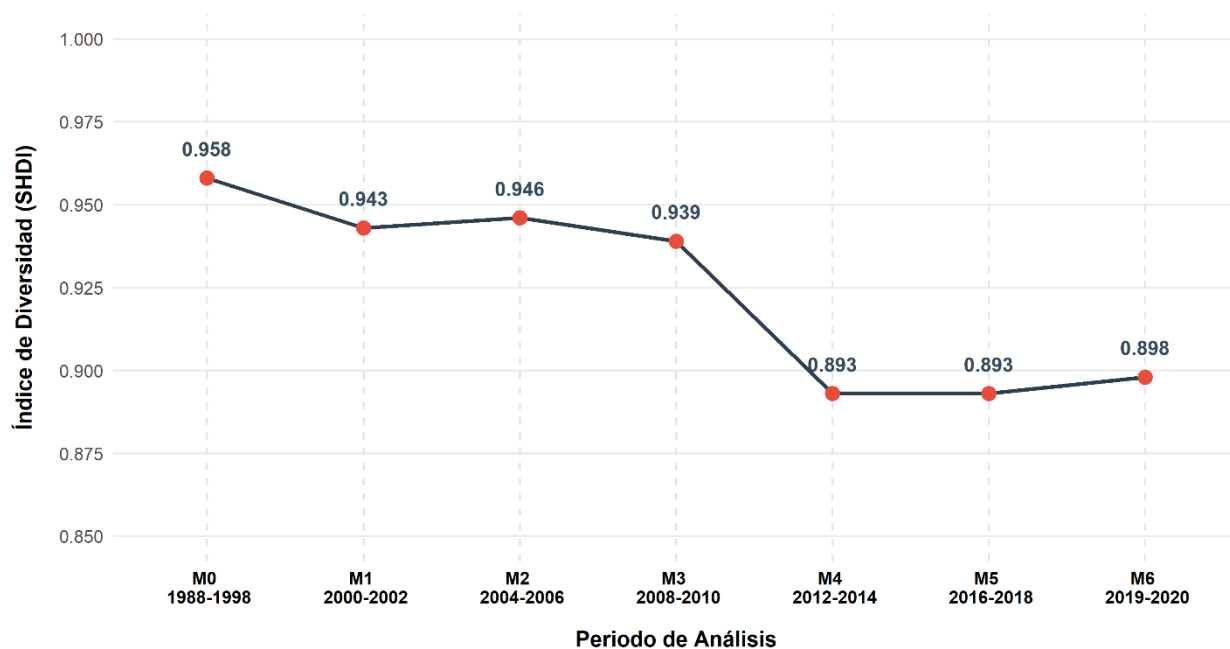


Figura 7. Trayectoria temporal de la diversidad del paisaje (1988-2020). Evolución del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) a nivel de paisaje. Se observa el punto de inflexión cercano a 2008 y la posterior estabilización del territorio en niveles de menor diversidad y mayor homogeneización estructural hacia el año 2020

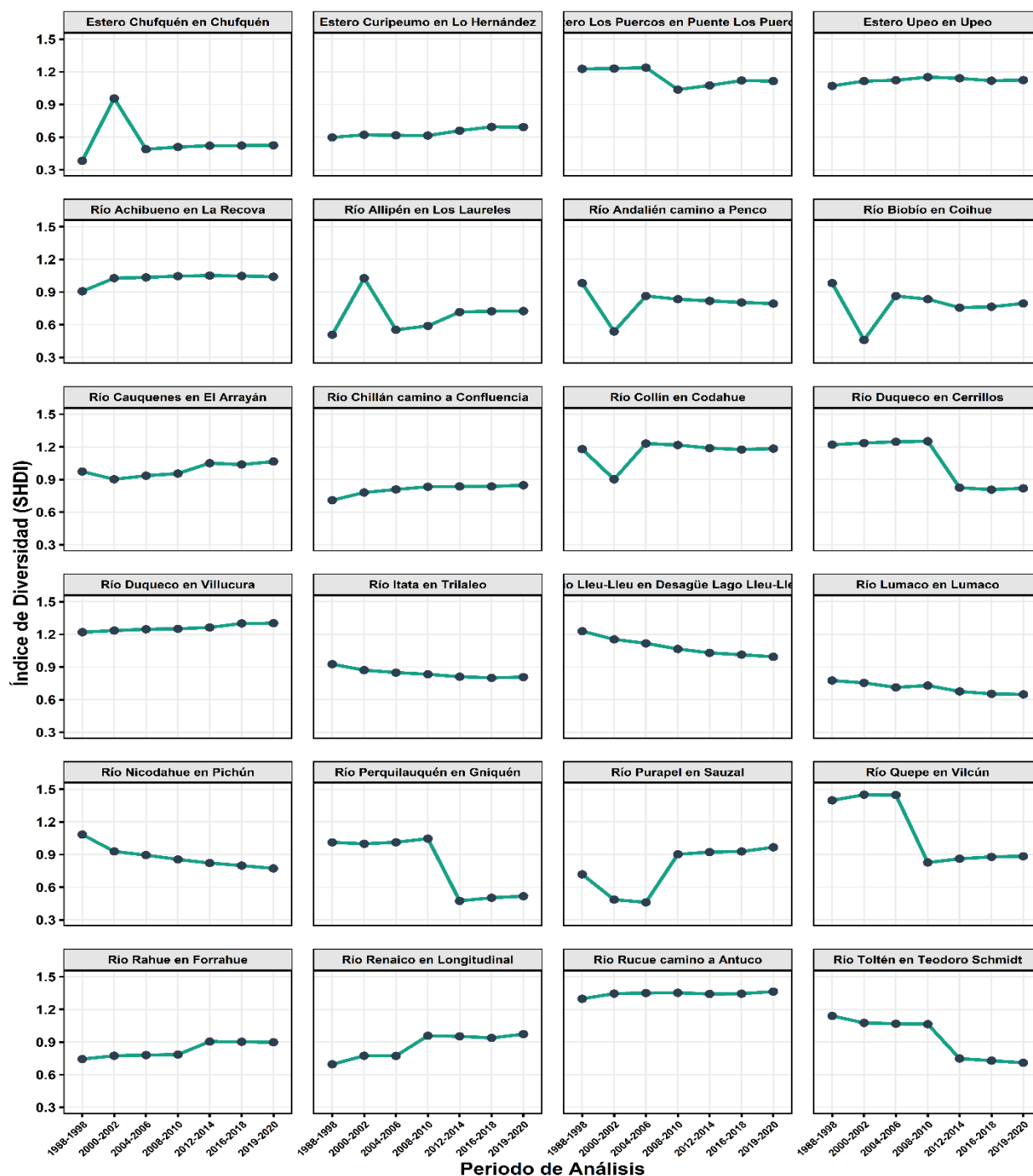


Figura 8. Evolución espacio-temporal desagregada del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) para las 24 cuencas de estudio (1988-2020). Los paneles individuales demuestran la caída generalizada de la diversidad estructural del paisaje a lo largo de las últimas tres décadas, independientemente de los niveles de heterogeneidad inicial de cada cuenca.

Este comportamiento que refleja un declive en la diversidad espacial coincide temporalmente con la consolidación de extensos bloques de plantaciones forestales y en paralelo la progresiva fragmentación física del bosque nativo. Esto interactuó de manera crítica en la década en la que se consolida el déficit pluviométrico característico de la megasequía (Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2017). Si bien la ausencia de lluvia responde a forzantes climática de escala global, la homogenización del paisaje actuó como un factor potenciador de la sequía local, ya que la estructura del paisaje al transformarse en grandes bloques continuos de monocultivos forestales perdió su capacidad natural para retener y almacenar agua (Alvarez-Garretón et al., 2019; Martínez-Retureta et al., 2020)

3.2 Variabilidad de la configuración espacial por clase de suelo

Podemos ver a nivel general las cuencas, a través de la métrica espaciales de la categoría Land, procesada en el software Fragstast, las cuales nos revelan la existencia de una pérdida de la diversidad, pero esto no es un fenómeno especialmente simétrico. Por lo cual un análisis por separado cada clase de uso de suelo, era pertinente, debido a que es de ayuda para comprender la configuración de los mosaicos de cada una de la cuenca hidrográfica, y su cambio al paso del tiempo (figura 8). Los estadísticos descriptivos de cada métrica y periodo, incluyendo medias y desviaciones estándar, se presentan en el anexo n° 11 que lleva por nombre “ilustraciones de trayectoria individual temporal por cuenca hidrográfica y métrica espacial”.

En síntesis, el análisis a nivel de clase evidencia que las cuencas de estudios, se han convertido en un territorio polarizado por actividades productiva forestales que tienen como característica que son altamente cohesionadas y geométricamente simple. Distinto a lo que sucede con los bosques nativos que tienden a ser relegado, que presentan una alta fragmentación en múltiples parches y confinado a geometrías complejas

- **Bosque nativo (BN):** El bosque nativo presenta los valores más altos para las métricas de densidad de parche (PD) y división (DIVISION), evidenciando que a medida que pasa el tiempo existe un proceso sostenido de fragmentación y pérdida de continuidad espacial, pasando a tener como característica que sea una red de fragmentos pequeños y fuertemente divididos como ya había sido evidenciado en estudios previos en Chile

(Altamirano et al., 2007; Echeverría et al., 2012; Miranda et al., 2015). Con respecto aquellas métricas que miden la forma y complejidad de la estructura del paisaje, es que se registraron los valores más altos, lo que indica que los parches remontan aun poseen geométricas más irregulares y complejas, asociadas a su permanencia en zonas de difícil acceso, frecuentemente refugiados en las redes de drenaje y topografías de laderas abruptas (Barrientos et al., 2020)

- **Plantaciones Forestales (PFT):** Para esta clase, se presentaron una configuración opuesta, ya que estaba caracterizada por bajos niveles de fragmentación y altos valores de proximidad media (PROX_MN) y cohesión (COHESION). Esto indico la presencia de bloques extensos, continuos y físicamente conectados, propios del modelo forestal intensivo (Aguayo et al., 2009; Heilmayr et al., 2016). Asimismo, se registraron los menores valores de SHAPE_MN, evidenciando formas más simples y rectilíneas, asociadas a una mayor artificialización del paisaje (Alvarez-Garreton et al., 2019).
- **Agricultura (AGR):** La agricultura se ubicó en una posición intermedia en términos de fragmentación y división, pero presentó una mayor variabilidad en las métricas de forma y cohesión. Este patrón sugirió la coexistencia de coberturas agrícolas más homogéneas e intensivas con otras más heterogéneas y dispersas, vinculadas a sistemas tradicionales o de secano adaptados a la morfología del terreno (Boongaling et al., 2018; Shi et al., 2013)

Tabla 13. Interpretación de métricas de configuración espacial

Métrica	Rango	Interpretación
		Min (0): Cobertura continua y sin fragmentación.
PD (Densidad)	> 0	Max (Indeterminado): Alta fragmentación (presencia de múltiples parches pequeños).

Métrica	Rango	Interpretación
SHAPE_MN (Forma)	> 1(o igual)	Min (1): Formas perfectamente geométricas y regulares (típico de intervención antrópica). Max (Indeterminado): Formas irregulares, sinuosas y complejas (característico de áreas naturales).
PROX_MN (Proximidad)	> 0	Min (0): Parches aislados y distantes entre sí. Max (Indeterminado): Parches de gran tamaño y muy cercanos (alta conectividad funcional).
COHESION (Cohesión)	0 - 100	Min (0): Desconectividad física total entre parches de la misma clase. Max (100): La clase forma una matriz continua y físicamente unificada.
DIVISION (División)	0 - 1	Min (0): La cobertura se presenta como un solo bloque sólido. Max (1): La clase está totalmente disgregada y separada en la cuenca.

Nota: interpretación del rango de las métricas seleccionadas

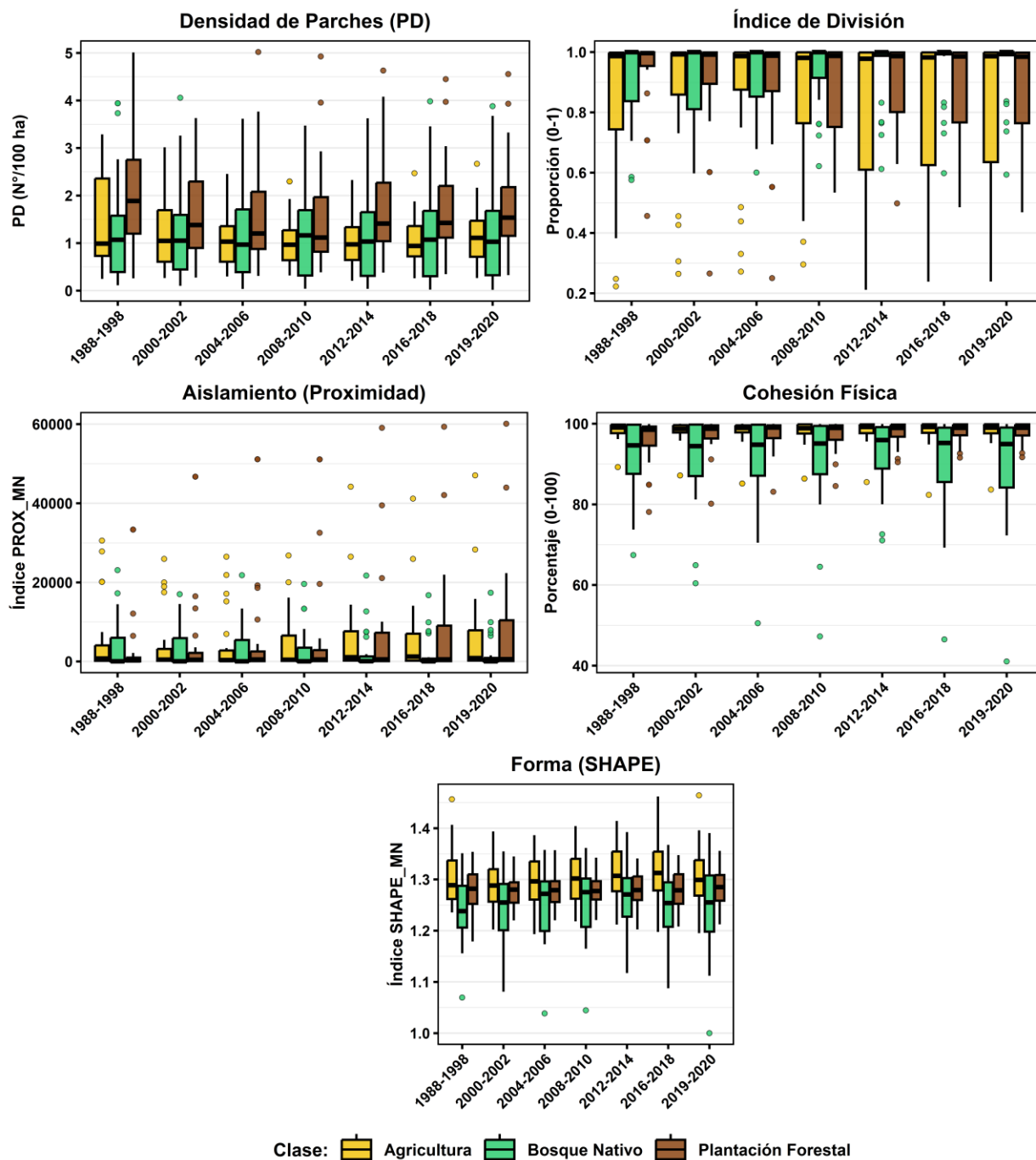


Figura 9. Trayectorias de configuración espacial según clase de cobertura (1988-2020). Distribución de las métricas de Densidad de Parches (PD), Índice de División, Proximidad Media (PROX_MN), Cohesión Física y Complejidad Geométrica (SHAPE_MN) para Agricultura (amarillo), Bosque Nativo (verde) y Plantaciones Forestales (café). Los diagramas evidencian el profundo contraste estructural entre la

fragmentación del bosque frente a la consolidación de bloques forestales masivos.

Este comportamiento estructural observado a nivel agregado es consistente con las trayectorias individuales de las 24 cuencas. Si bien existen variaciones en las magnitudes basales de cada territorio, la tendencia hacia la fragmentación del bosque nativo y la consolidación de bloques forestales se repite de manera sistemática en la red de drenaje (ver Anexo 11 de figuras de trayectoria individual por métrica y cuenca).

4. Relación entre la configuración espacial y el caudal base (Objetivo 2)

4.1 Evaluación de normalidad hidrológica y espacial:

Como etapa previa a la evaluación de la relación entre las métricas del paisaje y la respuesta hidrológica, es que se analizó la distribución estadística de los tres regímenes de caudales (anual, verano e invierno) registrado en las 24 cuencas de estudio, a lo largo del periodo de evaluación entre 1988 a 2020. De acuerdo con los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), las series hidrológicas rechazaron la hipótesis nula de normalidad ($p < 0,05$) en la mayoría de los periodos evaluados.

La existencia de una asimetría en la distribución de los datos, se evidencio visualmente en la figura 10, en la cual se observó en los diagramas de caja que los caudales presentaron medianas desplazadas con respecto al centro del rango intercuartílico, a esto se suma una presencia recurrente de valores atípicos.

Estos valores extremos reflejaron la alta variabilidad climática interanual característica de la zona centro-sur de Chile, al representar las fluctuaciones naturales entre años excepcionalmente húmedos y periodos prolongados de sequía severa (Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2017). Este patrón se observó de manera transversal en cuencas andinas y costeras, lo que permitió reconocer que la asimetría de los caudales no depende de la ubicación geográfica de la cuenca. En sistemas nivo-pluviales, como los de las cuencas de Río Achibueno en La Recova y Río Chillán en Confluencia, se registraron caudales de mayor magnitud, aunque igualmente marcados por una distribución sesgada hacia valores bajos y por la presencia de años extremos.

De forma similar, en cuencas de la Cordillera de la Costa y del secano interior, como las cuencas de Río Cauquenes en El Arrayán y Río Purapel en Sauzal, se observó el mismo comportamiento, aunque con volúmenes de agua considerablemente menores y bajo un régimen estrictamente pluvial.

Con este resultado al analizar tanto cuentas pluviales como niveo pluviales, exhibieron en ambas una latente vulnerabilidad en donde predomina los años secos interrumpidos por eventos de escorrentía excepcionales (Stehr et al., 2010). Esta estructura de los datos confirmó la no normalidad de las series hidrológicas y respaldó la aplicación del coeficiente de Spearman (ρ) en el análisis relacional posterior (Barrientos et al., 2020; Wei et al., 2023).

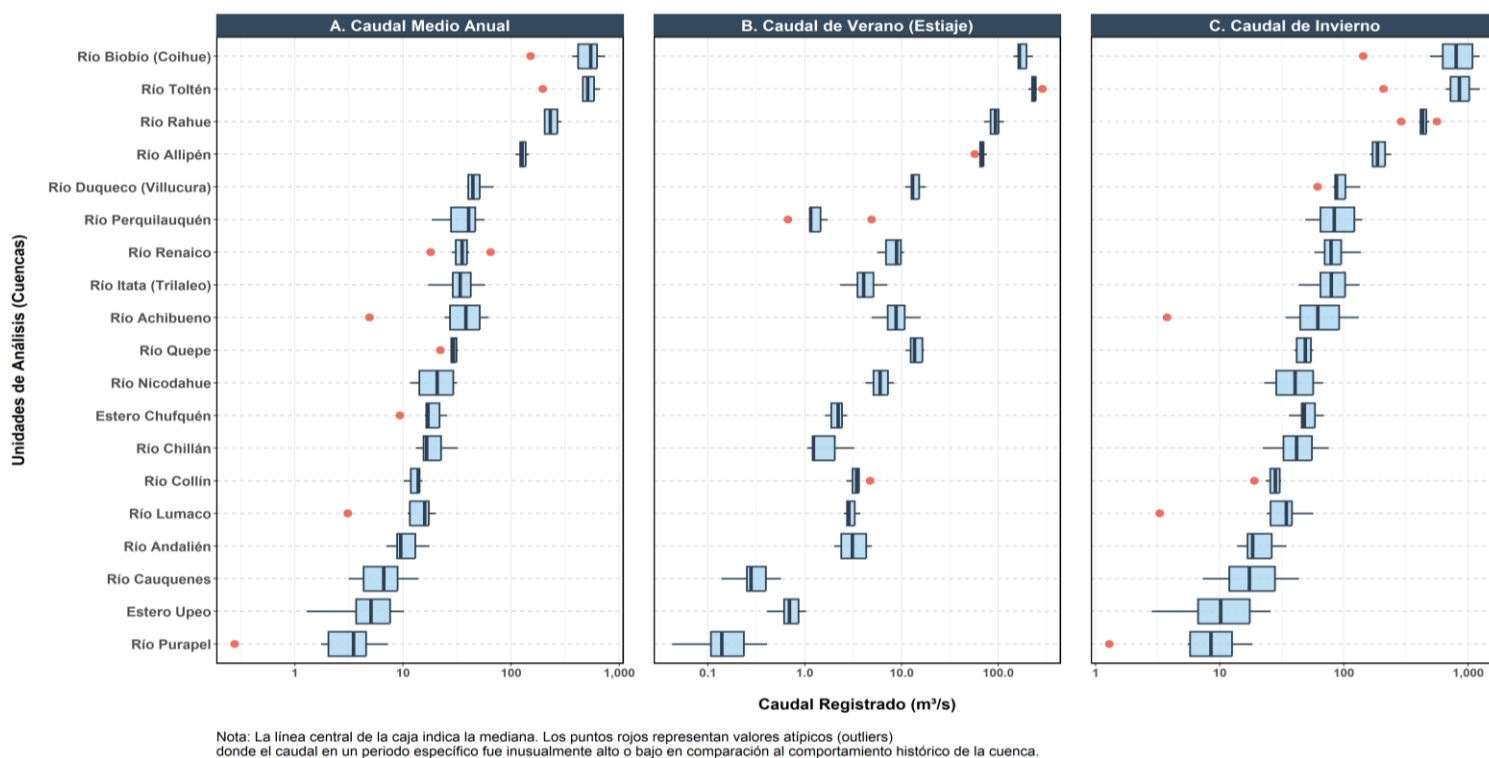


Figura 10. Diagramas de caja de los regímenes de caudal medio anual, estival e invernal, para la evaluación de la normalidad de los datos con respecto períodos desde el año 1988 a 2020, a escala logarítmica

4.2 Panorama general de correlaciones espacio-hidrológicas

Una vez confirmada que los datos de caudales son no paramétricos, es que evaluó la relación entre la configuración espacial del paisaje y la disponibilidad hídrica en las 24 cuencas hidrográficas de estudio. Para ello, se calcularon correlaciones de Spearman (ρ) entre las métricas del paisaje asociadas al Bosque Nativo (BN), Uso Agrícola (AGR) y Plantaciones Forestales (PFT), y los distintos regímenes de caudal. Los resultados significativos se presentaron en la Tabla 14, mientras que la figura 10 sintetizó el patrón general mediante diagramas de caja que representan la distribución de los regímenes de caudal medio anual, estival e invernal y en la figura 11 sintetizó el patrón general de relaciones mediante un mapa de calor basado en las correlaciones de Spearman.

En términos generales, se observó que las correlaciones más intensas se concentraron en el caudal estival, lo que indicó que existe una sensibilidad por parte del sistema hidrológico frente a la estructura del paisaje durante los periodos de menor disponibilidad hídrica, lo que sugirió que en condiciones de estiaje, que la configuración espacial de las coberturas adquirió un papel relevante en la regulación del agua, como lo señalan Hernández-Sosa et al. (2025), durante los meses de invierno los perfiles de suelo están saturados y la precipitación domina la respuesta de la cuenca; sin embargo, en los periodos secos, la arquitectura del territorio y la distribución de la vegetación se vuelven los factores críticos que regulan la retención y disponibilidad del agua. Al analizar el comportamiento por tipo de cobertura, se expone los contrastes entre las métricas evaluadas:

- **Plantaciones forestales:** Presentaron una tendencia negativa con respecto a métricas asociadas a continuidad (Cohesión) y conectividad espacial (PROX_MN), lo que indicó que formaciones más compactas y continuas se asociaron con una disminución del caudal base de verano. Estudios previos evidencian que las plantaciones extensas y continuas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. incrementaron la evapotranspiración y redujeron la infiltración profunda, lo que disminuyó la recarga del caudal base (Huber et al., 2010; Alvarez-Garretón et al., 2019; Hernández-Sosa et al., 2025)."

- **Bosque nativo:** El caso del bosque nativo es totalmente opuesto al anterior, ya que mostro principalmente correlaciones positivas con las métricas asociada a la forma y complejidad de los parches tales como SHAPE_MN y FRAC_MN, lo cual sugirió que una mejor capacidad en la regulación hídrica cuando los remanentes de bosque nativo tienden a tener estructuras de forma irregular y adaptado a la red de drenaje. Esto es respaldado por distintos autores que afirman que configuraciones naturales ramificadas, tienen como característica que incrementa el perímetro de contacto y la fricción reduciendo la escorrentía superficial y proporcionando una mayor infiltración hacia los acuíferos subterráneos. Además, Barrientos et al. (2020) sostienen que el bosque nativo en laderas altas y formas complejas presenta una regulación hídrica mucho más estable y resiliente frente a años de extrema sequía (Boongaling et al., 2018; Barrientos et al., 2020).

- **Agrícola:** Por su parte, la matriz agrícola muestra un comportamiento de índole intermedio, aunque con predominio de relaciones negativas en coberturas más agregadas y geométricamente simples, lo que reflejó una menor capacidad de retención hídrica y una respuesta más rápida del escurrimiento. Esto se explicó porque las formas agrícolas simples favorecieron una escorrentía rápida y menor retención hídrica, mientras que aquellas más adaptadas al relieve tendieron a atenuar ese efecto (Shi et al., 2013; Wei et al., 2023).

Tabla 14. Coeficientes de correlación de Spearman (Rho) y nivel de significancia (p-value) entre las métricas de paisaje y los caudales base. (Nota: Solo se muestran relaciones significativas con $p < 0,05$).

Cobertura	Métrica Espacial	Régimen de Caudal	Correlación (Rho)	p-value
Bosque Nativo (BN)	Complejidad de Forma (SHAPE_MN)	Verano	0.323	< 0.001
Bosque Nativo (BN)	Dimensión Fractal (FRAC_MN)	Verano	0.302	< 0.001
Bosque Nativo (BN)	Aislamiento (PROX_MN)	Verano	0.198	0.0009
Bosque Nativo (BN)	Complejidad de Forma (SHAPE_MN)	Anual	0.171	0.0042
Plantaciones (PFT)	Densidad de Parches (PD)	Verano	0.369	< 0.001
Plantaciones (PFT)	Densidad de Parches (PD)	Anual	0.357	< 0.001
Uso Agrícola (AGR)	Índice de Similitud (SIMI_MN)	Verano	-0.194	0.0011
Uso Agrícola (AGR)	Conectividad (COHESION)	Verano	0.120	0.0433

Cobertura	Métrica Espacial	Régimen de Caudal	Correlación (Rho)	p-value
Uso Agrícola (AGR)	Aislamiento (DIVISION)	Invierno	-0.217	0.0002

Correlación: Estructura del Paisaje vs Respuesta Hidrológica

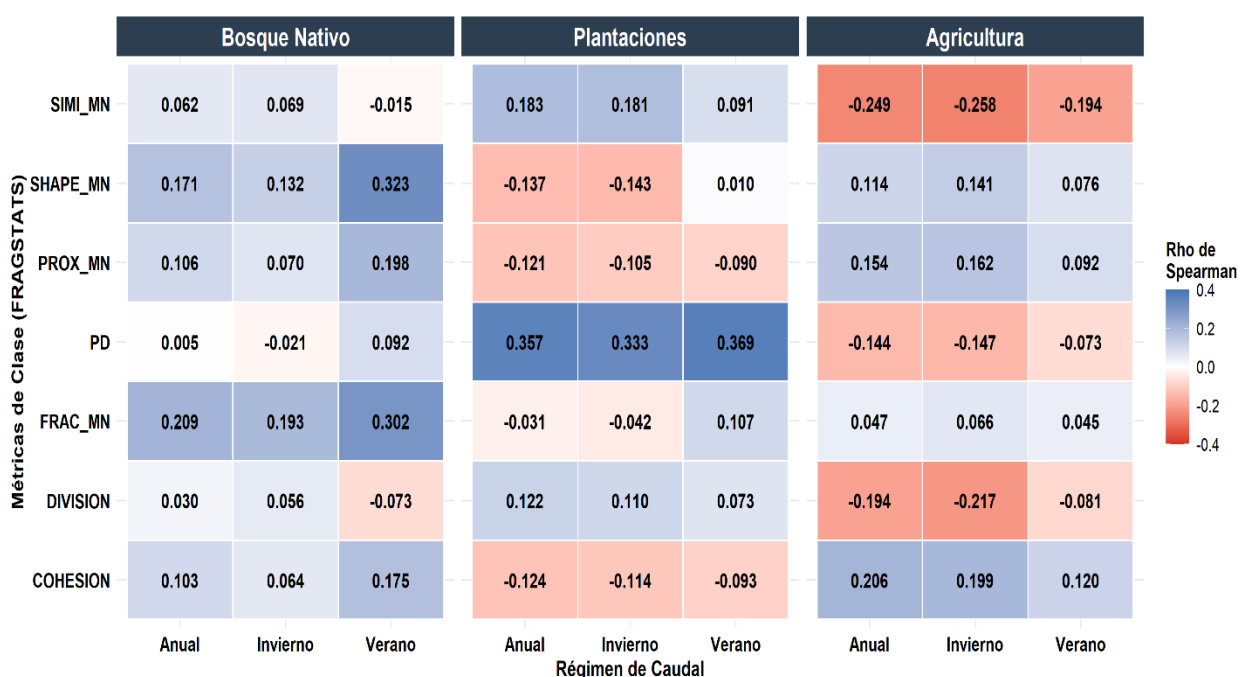


Figura 11. Síntesis de las correlaciones espaciales e hidrológicas mediante el estadístico de Spearman (Rho). El mapa de calor contrasta el impacto de la estructura de las distintas coberturas vegetales (BN, AGR, PFT) sobre la disponibilidad hídrica estacional en las 24 cuencas de estudio.

4.3 Influencia del paisaje sobre el caudal base anual:

A fin de profundizar en los patrones observados durante los periodos de estiaje, es que se aplicó un modelado LOESS, el cual permitió visualizar tendencias no lineales entre la configuración del paisaje y la retención hídrica. En este análisis se incorporaron métricas de fragmentación, complejidad de forma y aislamiento estructural. Los resultados se presentaron en la figura 12, en la cual se evidenció respuestas no lineales y contrastantes entre coberturas. En el caso del bosque nativo, las métricas de complejidad espacial (SHAPE_MN y FRAC) se asociaron positivamente con el caudal base de verano, mostrando un incremento sostenido a medida que aumentó la irregularidad y fractalidad de los parches, mientras que la densidad de parches (PD) presentó una tendencia positiva más suave. En agricultura, se observó un comportamiento similar, donde tanto SHAPE_MN como FRAC se relacionaron positivamente con el caudal, indicando una mayor retención hídrica en configuraciones más complejas, mientras que PD mostró una respuesta neutra a levemente positiva. En contraste, en plantaciones forestales, SHAPE_MN y FRAC evidenciaron relaciones negativas con el caudal base, con una disminución progresiva a medida que aumentó la complejidad espacial, mientras que PD presentó una tendencia débilmente negativa, sugiriendo que la configuración espacial no logra compensar el alto consumo hídrico característico de esta cobertura.

4.3.1 Plantaciones Forestales: El efecto del monocultivo continuo

- **Densidad de Parches (PD):** Presentó una relación positiva y significativa con el caudal de verano ($Rho = 0.369$), lo que indicó que una mayor fragmentación de las plantaciones tiende a reducir su presión hídrica sobre la cuenca. Esto sugirió que, al interrumpirse la continuidad del monocultivo, disminuyeron la intercepción y la evapotranspiración, favoreciendo la recarga hídrica (Alvarez-Garretón et al., 2019).
- **Aislamiento y Conectividad (PROX_MN):** Con respecto a esta métrica en cuestión, la curva de PROX_MN demuestra que a medida que las plantaciones forestales se vuelven más densa, cercana y conectada, se asociaron con una disminución sostenida del caudal de estiaje. Lo anterior confirma que las masas forestales

continúa actúan como esponja de alta demanda que agotan por su consumo sostenido de los recursos hídricos en las cuencas, en especial en los meses de déficit de precipitación (Huber et al., 2010)

- **Complejidad de Forma (SHAPE_MN):** La curva evidencia que las plantaciones tienden a estructurarse en formas geométricas simples (valores cercanos a 1). Cuando estos polígonos aumentan su regularidad (bloques industriales cuadrados), ejercen una mayor presión hídrica que cuando se adaptan a la topografía del terreno. (Martínez-Retureta et al., 2020).

4.3.2 Bosque Nativo: Corredores riparios y formas irregulares

- **Densidad de Parches (PD):** En el ecosistema nativo, presenta una correlación muy débil, casi neutra y no significativa ($Rho = 0.092$). Si bien una distribución heterogénea a lo largo de la cuenca ayuda a retener el agua, la teoría sugiere que un bosque nativo que se fragmenta excesivamente corre el riesgo de perder su capacidad de regulación microclimática, exponiendo los suelos a la evaporación directa (Shi et al., 2013).
- **Aislamiento (PROX_MN):** A diferencia del impacto negativo de las plantaciones, en el bosque nativo una mayor proximidad y conectividad es favorable para el río ($Rho = 0.198$, $p = 0.0009$). Por lo tanto, un bosque nativo conectado que facilita el proceso mencionado con anterioridad y a su vez modera el micro clima del suelo, lo que brinda protección a los flujos subterráneos de la radiación solar extrema durante el verano (Hernández-Sosa et al., 2025).
- **Complejidad de Forma (SHAPE_MN):** Exhibe la correlación positiva más fuerte y estabilizadora de este ecosistema con el agua de verano ($Rho = 0.323$). Lo que nos demuestra que los parches de bosque nativo presentan formas irregulares e intrincadas, son más eficiente y favorecen a procesos como la infiltración y contribuyeron a sostener el flujo hídrico durante el año (Barrientos et al., 2020; Boongaling et al., 2018).

4.3.3 Áreas Agrícolas: Dinámicas de riego y geometría

- **Densidad de Parches (PD):** Presenta una correlación negativa débil con el caudal de verano ($Rho = -0.100$). Aunque estadísticamente leve, esta tendencia indica que una mayor fragmentación agrícola se asocia con una disminución de los flujos estivales. Esto sugiere que la dispersión de predios tiende a intensificar la presión extractiva sobre la cuenca; este comportamiento se ejemplifica cuando múltiples parcelas independientes realizan extracciones de riego simultáneas y no coordinadas, mermando las reservas hídricas en los meses más críticos.
- **Aislamiento (PROX_MN):** Muestra una baja correlación, casi inexistente ($Rho=0.045$), por ende, no es una variable determinante, aunque lo que esta métrica y su resultado nos sugirió que la concentración espacial de las áreas agrícolas en sectores específicos permitió acotar su impacto y favorecer que otras zonas de la cuenca mantuvieran funciones de recarga hídrica natural (Martínez-Retureta et al., 2020).
- **Complejidad de Forma (SHAPE_MN):** Al igual que en el bosque nativo, muestra una relación positiva ($r=0.26$) Esto confirma que las formas agrícolas más complejas e irregulares, comúnmente asociadas a la agricultura tradicional tendieron a generar un impacto hídrico menor que aquellas con geometrías más rígidas e intensivas (Wei et al., 2023).

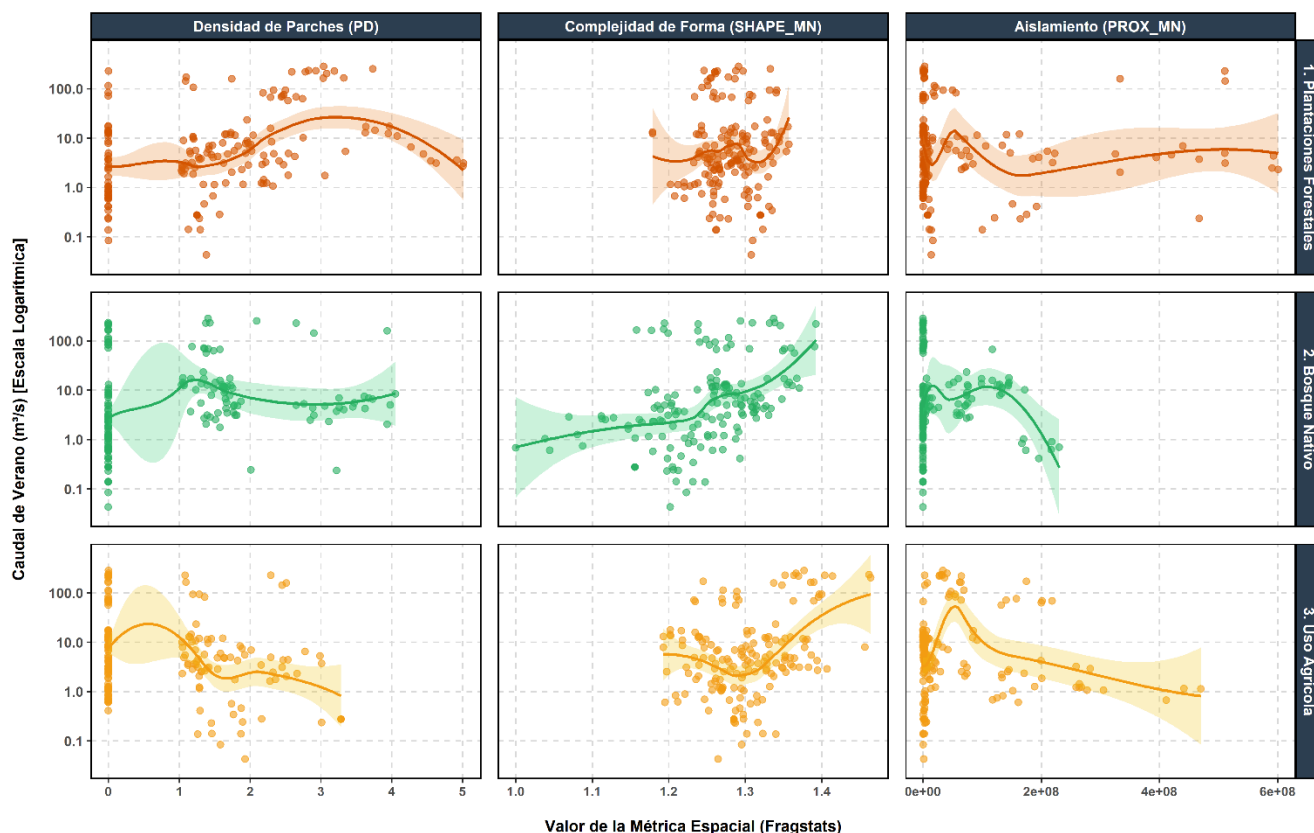


Figura 12. Panel de regresión local (LOESS) que ilustra la influencia empírica de la configuración espacial sobre el caudal base de verano (eje Y en escala logarítmica). Se contrastan tres métricas estructurales (Densidad de Parches, Complejidad de Forma y Aislamiento) a través de las coberturas de Plantaciones Forestales, Bosque Nativo y Uso Agrícola, evidenciando el efecto diferenciado de la fragmentación y la conectividad en la disponibilidad hídrica estival.

5. Discusión de resultados

5.1 La homogenización del paisaje y el agravamiento de la escasez hídrica

Los resultados de esta investigación demuestran una dinámica territorial que se caracteriza por la mega sequía que afectó a Chile, en donde podemos notar como fueron afectadas las zona centro sur del país, esta megasequía responde a causa climática de escala macro (Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2017), pero la configuración del paisaje es un factor a tomar en cuenta a escala nacional, ya que una configuración adecuada puede amortiguar o intensificar estos efectos sobre la disponibilidad hídrica (Barrientos et al., 2020; Martínez-Retureta et al., 2020).

Los hallazgos que son relevantes de tal efecto negativo se encuentran asociados a las plantaciones forestales exóticas (*Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp), no solo por la presencia de estas en la cuenca hidrográfica, sino en su configuración espacial como bloques continuos, que agotan los recursos hídricos, ya que actúan como una bomba de agua sincronizada (Alvarez-Garretón et al., 2019). En la forma que se presentan las plantaciones forestales son descrita a través de la cuantificación de la estructura del paisaje, que permite el software Fragstast, en donde métricas que miden la continuidad y proximidad entre parche de la misma cobertura, se encuentra con valores elevados como el caso de PROX_MN que confirman que estos bloques tienen característica de ser homogéneos favorecen una extracción intensiva de agua y terminan reduciendo el caudal de estiaje. Los resultados que se han obtenido coinciden con lo descrito con anterioridad por autores nacionales, que han advertido que la expansión continua de dichas coberturas incremento la evapotranspiración y redujo la capacidad de regulación hídrica de las cuencas (Alvarez-Garretón et al., 2019; Huber et al., 2010; Jullian et al., 2018; Pizarro et al., 2022).

Uno de los principales aportes de los resultados de este estudio es demostrar que el problema no depende netamente de la cobertura, sino también de su organización espacial, de hecho, se menciona en estudios realizados en el centro sur del país que, al fragmentar estos macizos territoriales, se interrumpe este consumo masivo y la cuenca recupera su capacidad de retener el caudal estival (Hernández-Sosa et al., 2025). Esto se reafirmó con los resultados obtenidos de las métricas del paisaje tales como el aumento del aumento en la densidad de parches (PD) de

las plantaciones, es decir, una mayor fragmentación, generó cierto alivio hidrológico al mitigar la disminución del caudal durante el verano, por ende al interrumpir la continuidad de estas coberturas se redujo su presión sobre el sistema y favoreció procesos como la infiltración (Boongaling et al., 2018; Hernández-Sosa et al., 2025; Shi et al., 2013; Wei et al., 2023).

Bajo este contexto es que se planteó que la homogenización del paisaje observada durante el espacio temporal de estudio y expresada en la disminución del índice de diversidad (SHDI), se asocia como un factor que agravo el déficit hídrico. La consolidación de estos bloques forestales continuos y homogéneos ha reducido la capacidad natural del suelo para retención hídrica, agudizando la escasez durante los meses de verano

5.2 Comportamiento complementario a escala anual e invernal

Al comparar la respuesta observada en periodo de estiaje con los regímenes anuales e invernal, se evidencio la existente influencia de la configuración espacial del paisaje sobre los recurso hídrico, la cual se marcó de forma estacional, para el invierno, en donde existe la mayor disponibilidad de precipitaciones y saturación de suelo se redujeron la capacidad explicativa de las métricas espaciales, ya que la respuesta hidrológica pasó a estar dominada principalmente por factores climáticos y topográficos (Hernández-Sosa et al., 2025).

En cambio, cuando consideramos el régimen anual, las correlaciones disminuyeron en intensidad con respecto al verano se mantienen estadísticamente significativas. La constante demanda hídrica de las plantaciones forestales durante los meses secos genera un déficit tan severo que logra arrastrar a la baja el balance hídrico de todo el año (Alvarez-Garretón et al., 2019; Huber et al., 2010) Por el contrario, los remanentes de bosque nativo con formas más irregulares tendieron a favorecer una regulación hídrica más estable en el largo plazo (Barrientos et al., 2020).

5.3 El rol mitigador del bosque nativo y la importancia de la forma

Al contrario la respuesta de estiaje con los regímenes anual e invernal, se observó la influencia del paisaje sobre la dinámica hídrica de las cuencas de estudio, dicha dinámica fue marcadamente estacional, es decir en invierno en donde se percata una alta disponibilidad de precipitaciones y la saturación de los suelo, tienden a reducir la capacidad explicativa de la

configuración espacial, ya que él ya que el comportamiento del sistema estuvo controlado principalmente por factores climáticos y topográficos. En estas condiciones, la arquitectura del paisaje perdió fuerza predictiva frente a la magnitud de los procesos hidrológicos mencionado con anterioridad.

Muy distinto es el caso cuando se evalúa en el régimen anual, en donde se identificó la influencia de la estructura del paisaje. Aunque las correlaciones fueron menores en comparación que el periodo de verano, siguieron siendo significativa, lo que indico que la presión ejercida durante los meses seco no se limitó al estiaje en sí, sino que siguió afectando la cantidad de agua disponible a lo largo del año. En particular, las plantaciones forestales continuas consumieron más agua y se relacionaron con una disminución más sostenida de su disponibilidad. En cambio, los sectores más irregulares de bosque nativo actuaron como una especie de amortiguador, ayudando a conservar un equilibrio hídrico más cercano al funcionamiento natural de la cuenca

5.4 Síntesis funcional: El modelo del "Mosaico Hidrológico"

En conjunto, los resultados obtenidos a partir de la distribución de los caudales, las correlaciones de Sperman y el modelado de LOESS, es que permitieron identificar un patrón espacial de característica consistente en las cuencas analizadas. De hecho, de forma general, se halló que las configuraciones homogéneas y continuas de plantaciones forestales se asociaron a una menor disponibilidad hídrica, principalmente en la época de verano, en cambio aquellas configuraciones de característica complejas e irregulares del bosque nativo se relacionaron con una mayor capacidad de retención y regulación del agua. En el caso de las coberturas agrícolas que presentaron un comportamiento intermedio, aunque tendieron a mostrar efectos más negativos cuando se distribuyeron bajo geometrías simples o configuraciones que intensificaron la presión hídrica sobre la cuenca. En conjunto, estos hallazgos indicaron que la respuesta hidrológica no dependió únicamente del tipo de cobertura presente, sino también de su disposición espacial. Así, la heterogeneidad del paisaje, la continuidad de las coberturas y la complejidad de su forma se reconocieron como atributos relevantes en la regulación del caudal base, particularmente bajo condiciones de menor disponibilidad hídrica.

V. Conclusiones

A partir de la evaluación de como la configuración espacial del paisaje condiciona la disminución del caudal en las 24 cuencas del centro sur de Chile entre el año 1988 al 2020 es que se establecieron las siguientes conclusiones:

- **Sensibilidad estacional del paisaje:** Notamos que la influencia del territorio sobre la disponibilidad hídrica vario de forma importante según la época del año. En el invierno , las lluvias aumentan provocando una saturación del suelo, por ende el efecto de la configuración del paisaje no fue un factor gravitante, ya que el sistema estuvo controlado por el proceso hidrológico mencionado, pero en cambio, durante el periodo de verano , la organización espacial dio un paso importante en su influencia sobre la disponibilidad hídrica, ya que un configuración adecuada al contexto de cada cuenca hidrográfica puede otorgar al sistema lograr retener sus reservas hídrica (Hernández-Sosa et al., 2025).
- **El impacto de la homogenización forestal:** Se comprobó empíricamente que las configuraciones homogéneas y continuas de plantaciones forestales se asocian a una menor disponibilidad hídrica, Esta estandarización geométrica continua actúa como un cómplice territorial que agrava severamente la escasez hídrica local durante la actual megasequía (Alvarez-Garreton et al., 2019; Huber et al., 2010).
- **El rol protector de la geometría del Bosque Nativo:** Se evidenció que la resiliencia hídrica no dependió solo de la cantidad de bosque nativo presente, sino también de su forma y disposición en el espacio. Se identificó que el bosque nativo presenta una relación positiva y significativa entre el caudal de verano y las métricas de complejidad de parche (como SHAPE_MN), es decir cuando este tipo de cobertura presento formas más complejas e irregulares, similares a corredores asociados a la red de drenaje, hubo efecto en la disminución de la escorrentía y aumento de la infiltración (Barrientos et al., 2020; Boongaling et al., 2018).
- **La variabilidad de la matriz agrícola:** Las áreas destinadas a uso agrícola exhibieron un comportamiento hidrológico intermedio, sino que dependió de la configuración

espacial, similar al caso de las cobertura de bosque nativo, las formas configuraciones compleja e irregulares se asociaron con una mayor capacidad de regulación hídrica, en cambio, las formas más regulares, compactas e intensivas se asociaron con una mayor presión sobre el agua, mientras que las configuraciones más irregulares y adaptadas a la topografía tendieron a generar un efecto menos agresivo sobre los flujos hídricos (Shi et al., 2013; Wei et al., 2023).

- **Implicancias para el ordenamiento territorial (El Mosaico Hidrológico):** A partir de estos resultados, es que se planteó que, para enfrentar mejor la escasez de agua, no conviene mantener paisajes homogéneos, sino promover una organización del territorio más diversa. Es decir, avanzar hacia un “mosaico hidrológico”, basado en la fragmentación de grandes bloques forestales y en la reconexión del bosque nativo en sectores clave, como una medida concreta de adaptación y una Solución Basada en la Naturaleza para proteger el caudal base y reducir la vulnerabilidad regional (Marquet & Rojas, 2021; Schneider-Valenzuela et al., 2023).

En respuesta a la interrogante central de este estudio, es que se puede confirmar que existe una relación significativa entre la configuración espacial del paisaje y la disminución del caudal base en las cuencas del centro-sur de Chile. La capacidad del territorio para retener agua depende en gran medida de su organización física y varía según la estación, ya que en invierno predominan los factores climáticos, esto es contrario en los meses de estiaje, en donde la configuración del paisaje se vuelve clave. En este contexto, variables como la Densidad de Parches (PD) y la Complejidad de Forma (SHAPE_MN) resultan determinantes. En definitiva, aunque las cuencas no pueden evitar el déficit hídrico asociado a la megasequía, los resultados de estas tres décadas muestran que la forma en que se organiza el territorio ya sea con grandes bloques forestales continuos o con paisajes más diversos y fragmentados puede agravar la escasez o, por el contrario, favorecer la resiliencia hídrica frente a futuros escenarios.

VI. Contribución a los ODS

Tabla 15: Contribución a las ODS

ODS	Meta específica	Aporte de la investigación
ODS 6	6.6: Proteger ecosistemas relacionados con el agua	El estudio mostró que la organización del paisaje influye en la regulación del caudal base y en la retención de agua (Alvarez-Garreton et al., 2019; Hernández-Sosa et al., 2025).
ODS 13	13.1: Fortalecer resiliencia climática	La investigación identificó configuraciones del paisaje que pueden mejorar la respuesta frente a sequías prolongadas (Garreaud et al., 2017; Marquet & Rojas, 2021).
ODS 15	15.1: Conservar ecosistemas terrestres y biodiversidad	Se destacó la importancia del bosque nativo y su conectividad para sostener funciones hidrológicas y servicios ecosistémicos (Barrientos et al., 2020; Jullian et al., 2018).

VII. Glosario

Área núcleo (*Core Area*)

Zona interior de un parche de hábitat que se encuentra libre de las perturbaciones físicas y bióticas asociadas al contacto con coberturas adyacentes.

Cambio Climático

Variación del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera y se suma a la variabilidad natural.

Caudal base

Fracción del flujo de un curso de agua que proviene primordialmente de la descarga de acuíferos y no de la escorrentía directa de lluvia.

Complejidad de forma (*SHAPE_MN*)

Índice que cuantifica la irregularidad geométrica de los parches; valores elevados indican perímetros más complejos y mayor interacción con el entorno circundante.

Conectividad del paisaje

Grado en el cual la estructura del territorio facilita o impide el flujo de agua y el movimiento de organismos entre parches de hábitat.

Cuenca hidrográfica

Unidad territorial delimitada por divisorias de aguas donde toda la escorrentía superficial drena hacia un punto común en un curso de agua principal.

Densidad de parches (*PD*)

Número de fragmentos de una cobertura específica por unidad de área; funciona como un indicador fundamental para medir el grado de fragmentación física.

Efecto borde

Alteraciones ambientales que ocurren en la franja de contacto entre dos coberturas distintas,

afectando las condiciones bióticas y físicas del interior del parche.

Fragmentación del paisaje

Proceso de ruptura de una cobertura vegetal continua en fragmentos más pequeños, numerosos y aislados debido a cambios drásticos en el uso del suelo.

Índice de cohesión (*COHESION*)

Métrica que cuantifica la conectividad física de una clase de suelo; indica qué tan conectados están los parches para permitir procesos de flujo.

Índice de división (*DIVISION*)

Métrica que mide la probabilidad de que dos puntos elegidos al azar no se encuentren en el mismo parche; refleja el grado de desintegración espacial.

Índice de proximidad (*PROX_MM*)

Métrica que cuantifica el aislamiento relativo de los parches, considerando tanto el tamaño como la distancia entre fragmentos de una misma clase de suelo.

Índice de Shannon (*SHDI*)

Medida de diversidad que considera la riqueza de clases de uso de suelo y la equidad en la distribución de sus áreas en el paisaje.

Métrica de paisaje

Índice matemático utilizado para cuantificar la composición o configuración espacial de los elementos que conforman la estructura física de un territorio determinado.

Mosaico del paisaje

Patrón complejo de parches de diferentes coberturas de suelo que interactúan entre sí y conforman la estructura espacial de una cuenca hidrográfica.

Multicolinealidad

Situación estadística donde dos o más variables presentan una correlación muy alta, lo que

genera redundancia y afecta la estabilidad de los modelos multivariados.

Nivel de Clase (*Class*)

Nivel de análisis intermedio que agrupa a todos los parches que poseen un mismo tipo de cobertura para evaluar su configuración espacial específica.

Nivel de Paisaje (*Landscape*)

Nivel jerárquico superior de análisis que considera la totalidad del mosaico espacial y la interacción entre todas las clases de uso de suelo presentes.

Nivel de Parche (*Patch*)

Unidad básica y mínima de análisis espacial. Superficie relativamente homogénea de un tipo de cobertura que difiere visual y estructuralmente de su entorno inmediato.

Parsimonia

Criterio científico que prioriza el uso de modelos más simples con menos variables, siempre que mantengan una alta capacidad para explicar los fenómenos observados.

Régimen hídrico

Patrón de variabilidad estacional y anual de los niveles de agua y caudales de una cuenca, influenciado por factores climáticos y la estructura del paisaje.

Uso de suelo

Conjunto de actividades humanas y formas de aprovechamiento del territorio que transforman la cobertura natural y afectan directamente los procesos de regulación hídrica.

VIII. Referencia bibliográfica

Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio de uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3), 361–374. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2009000300004>

Alvarez-Garreton, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Science*, 364(6444), 944–945. <https://doi.org/10.1126/science.aax1336>

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies—Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>

Barrientos, G., Herrero, A., Iroumé, A., Mardones, O., & Batalla, R. J. (2020). Modelling the effects of changes in forest cover and climate on hydrology of headwater catchments in south-central Chile. *Water*, 12(6), 1835. <https://doi.org/10.3390/w12061835>

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>

Boongaling, C. G. K., Faustino-Eslava, D. V., & Lansigan, F. P. (2018). Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. *Land Use Policy*, 72, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.042>

Cushman, S. A., McGarigal, K., & Neel, M. C. (2008). Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators*, 8(5), 691–703.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.12.002>

Da Silva, A. M., Huang, C. H., Francesconi, W., Saintil, T., & Villegas, J. (2015). Using landscape metrics to analyze micro-scale soil erosion processes. *Ecological Indicators*, 56, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.004>

Echeverría, C., Newton, A., Nahuelhual, L., Coomes, D., & Rey-Benayas, J. M. (2012). How landscapes change: Integration of spatial patterns and human processes in temperate landscapes of southern Chile. *Applied Geography*, 32(2), 822–831. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.014>

Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>

Fang, X., Zhao, W., Wang, L., Feng, Q., Ding, J., Liu, Y., & Zhang, X. (2015). Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(8), 3409–3420. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3409-2015>

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

Han, Y., Wang, J., & Li, P. (2021). Influences of landscape pattern evolution on regional crop water requirements in regions of large-scale agricultural operations. *Journal of Cleaner*

Production, 327, 129499. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129499>

Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., & Lambin, E. F. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.014>

Hernández-Sosa, M., Aguayo, M., Hurtado, J., & Llopart, O. (2025). The response of the water cycle to landscape configuration and composition in two Chilean basins. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26, 100629. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100629>

Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C., & Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 31(3), 219–230. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000300006>

Jackson, J. E. (2005). *A user's guide to principal components*. John Wiley & Sons.

Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de regulación hídrica ante escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 277–289. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277>

Kurzweil, J. R., Metlen, K., Abdi, R., Strahan, R., & Hogue, T. S. (2021). Surface water runoff response to forest management: Low-intensity forest restoration does not increase surface water yields. *Forest Ecology and Management*, 496, 119387. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119387>

Lang, S., Tiede, D., & Hölbling, D. (2008). Quantitative methods in landscape ecology: Tools for measuring landscape structure and pattern. En S. Lang, T. Blaschke, & P. O. de Pablos (Eds.), *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications* (pp. 451–467). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_25

Little, C., Lara, A., González, M., Saavedra, G., Rojas, Y., Quiroz, I., Sagardía, R., & Castañeda, A. (s.f.). *Áreas prioritarias de restauración de bosques nativos para la recuperación del servicio ecosistémico provisión de agua en cuencas forestales*. Instituto Forestal (INFOR).

Little, C., Lara, A., McPhee, J., & Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.011>

Marquet, P., & Rojas, M. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5736938>

Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., & Sánchez-Pérez, J.-M. (2020). Effect of land use/cover change on the hydrological response of a southern center basin of Chile. *Water*, 12(1), 302. <https://doi.org/10.3390/w12010302>

McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure* (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351>

Miranda, A., Altamirano, A., Cayuela, L., Lara, A., & González, M. (2015). Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: Revealing the evidence. *Regional Environmental Change*, 15(2), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0643-x>

Pizarro, R., Benítez, G. A., Farías, D. C., Jordán, D. C., Santibáñez, Q. F., Sangüesa, P. C., Flores, V. J. P., Martínez, A. E., & Román, A. L. (2005). Influencia de las masas boscosas en el régimen hídrico de una cuenca semiárida, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(1), 77–91. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000100008>

Pizarro, R., Valdés-Pineda, R., García-Chevesich, P. A., Ibáñez, A., Pino, J., Scott, D. F., Neary, D. G., McCray, J. E., Castillo, M., & Ubilla, P. (2022). The large-scale effect of forest cover on long-term streamflow variations in Mediterranean catchments of central Chile.

Sustainability, 14(8), 4443. <https://doi.org/10.3390/su14084443>

Schneider-Valenzuela, I., Brito-Escudero, C., Aguilera-Betti, I., Klock-Barría, K., Saldaña-Cortés, A., Celis-Díez, J. L., Ugalde, A., Jorquera-Martínez, L., Venegas-González, A., & Carvallo, G. O. (2023). *Soluciones de base natural (SbN) para conflictos de escasez hídrica en la Ecorregión Mediterránea de Chile*.

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>

Shi, Z. H., Ai, L., Li, X., Huang, X. D., Wu, G. L., & Liao, W. (2013). Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Journal of Hydrology*, 498, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.031>

Stehr, A., Aguayo, M., Link, O., Parra, O., Romero, F., & Alcayaga, H. (2010). Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1963–1977. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1963-2010>

Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J. P., Mendoza, P. A., Gómez, T., Vásquez, N., & Cepeda, J. (2014). Impacts of climate change on water resources in Chile. En *Climate Change Impacts on Water Resources* (pp. 387–410). Springer.

Wei, C., Dong, X., Ma, Y., Leng, M., Zhao, W., Zhang, C., Yu, D., & Su, B. (2023). Relationships between landscape patterns and hydrological processes in the subtropical monsoon climate zone of southeastern China. *Remote Sensing*, 15(9), 2290. <https://doi.org/10.3390/rs15092290>

Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., Takahashi, K., ... & Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686.

<https://doi.org/10.21105/joss.01686>

Wine, M. L., & Zou, C. B. (2012). Long-term streamflow relations with riparian gallery forest expansion into tallgrass prairie in the Southern Great Plains, USA. *Forest Ecology and Management*, 266, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.014>

Wu, J. (2013). Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop. *Landscape Ecology*, 28(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9836-y>

IX. Anexo

Anexo 1

Tabla 16: Autovalores y varianza explicada del Análisis de Componentes Principales (PCA)

Dimensión	Autovalor	% Varianza Explicada	% Varianza Acumulada
Dimensión 1	4.45	26.20 %	26.20 %
Dimensión 2	2.60	15.27 %	41.48 %
Dimensión 3	2.29	13.47 %	54.95 %
Dimensión 4	1.81	10.66 %	65.60 %
Dimensión 5	1.09	6.39 %	71.99 %

Dimensión	Autovalor	% Varianza Explicada	% Varianza Acumulada
Dimensión 6	1.03	6.07 %	78.06 %
Dimensión 7	0.80	4.71 %	82.77 %

Nota: La tabla detalla los autovalores y el porcentaje de varianza explicada y acumulada para cada dimensión del modelo PCA, justificando la selección de los ejes principales.

Anexo 2

Tabla 17: Estadísticos descriptivos de métricas a nivel Landscape

Periodo Evaluado	SHDI (Media)	SHDI Estándar)	(Desv. SHEI (Media)	SHEI Estándar)	(Desv.
M0 (1988-1998)	0.9579	0.2616	0.5154	0.1408	
M1 (2000-2002)	0.9434	0.2654	0.5021	0.1197	
M2 (2004-2006)	0.9464	0.2730	0.5087	0.1270	
M3 (2008-2010)	0.9392	0.2187	0.5069	0.1014	
M4 (2012-2014)	0.8935	0.2193	0.4842	0.1058	
M5 (2016-2018)	0.8934	0.2197	0.4802	0.1011	

Periodo Evaluado	SHDI (Media)	SHDI Estándar	(Desv.	SHEI (Media)	SHEI Estándar	(Desv.
M6 (2020)	0.8984	0.2223		0.4847	0.1033	

Nota: Valores de media y desviación estándar para los índices de diversidad (SHDI) y equidad (SHEI) a lo largo de los periodos evaluados.

Anexo 3

Tabla 18: Estadísticos descriptivos de métricas a nivel Class

Perio do Evalu ado	Tipo de Cober tura	PD (Me dia)	PD (SD)	SHA PE (Me dia)	SHA PE (SD)	PRO X (Me dia)	PRO X (SD)	COHE SION (Media)	COHE SION (SD)	DIVIS ION (Medi a)	DIVIS ION (SD)
M0 (1988 - 1998)	Agríco la (AGR)	1.42 93	0.9 772	1.30 50	0.05 92	5074 .90	9101. 64	98.036 5	2.9144	0.827 9	0.258 8
M0 (1988 - 1998)	Bosqu e Nativo (BN)	1.30 59	1.1 841	1.24 01	0.06 53	3906 .37	6633. 28	91.760 6	9.7035	0.918 5	0.137 6

Perio do Evalu ado	Tipo de Cober tura	PD (Me dia)	PD (SD)	SHA PE (Me dia)	SHA PE (SD)	PRO X (Me dia)	PRO X (SD)	COHE SION (Media)	COHE SION (SD)	DIVIS ION (Medi a)	DIVIS ION (SD)
M0 (1988 - 1998)	Plant. Forest ales (PFT)	2.08 64	1.2 548	1.27 77	0.04 42	3751 .04	9285. 74	95.706 4	5.6543	0.937 8	0.129 2
M1 (2000 - 2002)	Agríco la (AGR)	1.27 52	0.8 269	1.29 09	0.05 13	4265 .38	7701. 16	97.781 3	3.4607	0.856 1	0.237 5
M1 (2000 - 2002)	Bosqu e Nativo (BN)	1.32 14	1.1 403	1.24 67	0.06 55	3693 .66	5860. 93	91.421 5	10.847 5	0.914 6	0.137 0
M1 (2000 - 2002)	Plant. Forest ales (PFT)	1.63 23	0.9 360	1.27 87	0.03 27	5891 .69	1326 5.00	97.350 7	4.2300	0.897 0	0.180 7
M2 (2004 - 2006)	Agríco la (AGR)	1.12 42	0.6 359	1.29 46	0.05 65	4237 .63	7657. 40	97.599 7	4.0036	0.863 2	0.231 3

Perio do Evalu ado	Tipo de Cober tura	PD (Me dia)	PD (SD)	SHA PE (Me dia)	SHA PE (SD)	PRO X (Me dia)	PRO X (SD)	COHE SION (Media)	COHE SION (SD)	DIVIS ION (Medi a)	DIVIS ION (SD)
M2 (2004 - 2006)	Bosqu e Nativo (BN)	1.24 76	1.0 701	1.25 07	0.07 17	3549 .44	6112. 18	91.188 1	11.705 4	0.922 6	0.127 9
M2 (2004 - 2006)	Plant. Forest ales (PFT)	1.63 86	1.1 530	1.27 93	0.03 24	6823 .94	1469 1.80	97.480 4	3.6968	0.881 3	0.194 4
M3 (2008 - 2010)	Agríco la (AGR)	1.06 68	0.5 790	1.30 16	0.05 12	4517 .55	7361. 26	97.598 3	3.7376	0.843 7	0.231 3
M3 (2008 - 2010)	Bosqu e Nativo (BN)	1.22 49	1.0 047	1.25 44	0.07 12	3072 .91	5554. 85	90.770 0	12.878 7	0.932 4	0.118 8
M3 (2008 - 2010)	Plant. Forest ales (PFT)	1.55 66	1.1 380	1.28 07	0.03 22	7226 .49	1543 7.50	97.271 0	3.7378	0.890 1	0.161 4

Perio do Evalu ado	Tipo de Cober tura	PD (Me dia)	PD (SD)	SHA PE (Me dia)	SHA PE (SD)	PRO X (Me dia)	PRO X (SD)	COHE SION (Media)	COHE SION (SD)	DIVIS ION (Medi a)	DIVIS ION (SD)
M4 (2012 - 2014)	Agríco la (AGR)	1.03 96	0.5 312	1.31 29	0.05 37	6261 .91	1043 4.80	98.253 3	2.9939	0.807 2	0.251 9
M4 (2012 - 2014)	Bosqu e Nativo (BN)	1.17 91	1.0 280	1.26 44	0.06 85	2578 .18	5365. 71	91.982 2	8.9579	0.942 1	0.114 2
M4 (2012 - 2014)	Plant. Forest ales (PFT)	1.73 74	1.0 376	1.28 34	0.03 58	7020 .26	1424 9.40	97.642 0	2.7789	0.889 8	0.158 5
M5 (2016 - 2018)	Agríco la (AGR)	1.06 59	0.5 258	1.31 22	0.06 38	5945 .30	9880. 21	98.053 7	3.6248	0.810 5	0.249 8
M5 (2016 - 2018)	Bosqu e Nativo (BN)	1.19 11	1.0 817	1.24 42	0.07 20	2149 .95	4341. 47	89.665 0	13.041 4	0.946 6	0.110 8

Perio do Evalu ado	Tipo de Cober tura	PD (Me dia)	PD (SD)	SHA PE (Me dia)	SHA PE (SD)	PRO X (Me dia)	PRO X (SD)	COHE SION (Media)	COHE SION (SD)	DIVIS ION (Medi a)	DIVIS ION (SD)
M5 (2016 - 2018)	Plant. Forest ales (PFT)	1.74 23	1.0 105	1.28 17	0.03 63	7951 .71	1479 5.30	97.862 3	2.4763	0.874 4	0.177 1
M6 (2020)	Agríco la (AGR)	1.16 07	0.6 054	1.30 29	0.06 21	6407 .35	1111 7.30	98.095 0	3.3595	0.813 8	0.246 9
M6 (2020)	Bosqu e Nativo (BN)	1.21 38	1.0 933	1.24 57	0.08 97	2177 .06	4416. 25	89.480 0	13.667 1	0.947 0	0.110 0
M6 (2020)	Plant. Forest ales (PFT)	1.79 82	1.0 326	1.28 51	0.03 72	8328 .86	1526 6.10	97.908 5	2.4240	0.873 0	0.179 8

Nota: Resumen estadístico de las métricas de configuración espacial agrupadas por periodo y tipo de cobertura: Agrícola, Bosque Nativo y Plantaciones Forestales.

Anexo 4

Tabla 19: Estadísticos descriptivos de métricas a nivel Parche (Patch).

Periodo	Cobertura	Área (Media)	Área (SD)	SHAPE (Media)	SHAPE (SD)	PROX (Media)	PROX (SD)	COR E (Media)	COR E (SD)
M0 (1988-1998)	Agrícola (AGR)	608.70 50	9925.67 00	1687.29 00	9107.28 00	2427.33 00	9012.92 00	0.000 0	0.00 00
M0 (1988-1998)	Bosque Nativo (BN)	578.99 10	9895.00 00	1781.25 00	8989.14 00	2065.01 00	9093.66 00	0.000 0	0.00 00
M0 (1988-1998)	Plant. Forestal (PFT)	645.10 10	9902.99 00	1669.56 00	9115.63 00	2481.12 00	8861.84 00	0.000 0	0.00 00
M1 (2000-2002)	Agrícola (AGR)	601.29 50	9932.71 00	1749.03 00	9087.73 00	2250.30 00	9144.44 00	0.000 0	0.00 00
M1 (2000-2002)	Bosque Nativo (BN)	539.73 80	9901.03 00	1805.60 00	8968.48 00	2160.44 00	9110.69 00	0.000 0	0.00 00
M1 (2000-2002)	Plant. Forestal	622.51 40	9917.46 00	1552.31 00	9186.32 00	2559.43 00	8696.91 00	0.000 0	0.00 00

Periodo	Cobertura	Área (Media)	Área (SD)	SHAPE (Media)	SHAPE (SD)	PROX (Media)	PROX (SD)	COR E (Media)	COR E (SD)
es (PFT)									
M2 (2004-2006)	Agrícola (AGR)	737.03 90	9902.93 00	1784.21 00	9058.91 00	2392.33 00	9025.06 00	0.000 0	0.00 00
M2 (2004-2006)	Bosque Nativo (BN)	588.54 20	9893.22 00	1832.01 00	8946.60 00	2149.47 00	9083.24 00	0.000 0	0.00 00
M2 (2004-2006)	Plant. Forestal es (PFT)	613.94 60	9918.59 00	1639.52 00	9107.20 00	2449.80 00	8790.03 00	0.000 0	0.00 00
M3 (2008-2010)	Agrícola (AGR)	792.92 60	9886.00 00	1854.89 00	9025.86 00	2422.40 00	8952.35 00	0.000 0	0.00 00
M3 (2008-2010)	Bosque Nativo (BN)	604.40 50	9891.33 00	1830.68 00	8949.92 00	2191.60 00	9087.10 00	0.000 0	0.00 00

Periodo	Cobertura	Área (Media)	Área (SD)	SHAPE (Media)	SHAPE (SD)	PROX (Media)	PROX (SD)	COR E (Media)	COR E (SD)
M3 (2008-2010)	Plant. Forestales (PFT)	719.1330	9885.9600	1686.8900	9056.7300	2545.1500	8712.7900	0.0000	0.0000
M4 (2012-2014)	Agrícola (AGR)	754.2360	9892.5800	1797.6100	9038.1300	2448.8700	8897.1900	0.0000	0.0000
M4 (2012-2014)	Bosque Nativo (BN)	664.0970	9883.0900	1817.7300	8967.2400	2297.1500	9027.5700	0.0000	0.0000
M4 (2012-2014)	Plant. Forestales (PFT)	701.1380	9898.9700	1661.3400	9067.3900	2309.6800	8971.2800	0.0000	0.0000
M5 (2016-2018)	Agrícola (AGR)	735.5960	9893.5300	1808.5700	9049.7800	2425.1300	8914.6100	0.0000	0.0000

Periodo	Cobertura	Área (Media)	Área (SD)	SHAPE (Media)	SHAPE (SD)	PROX (Media)	PROX (SD)	COR E (Media)	COR E (SD)
M5 (2016-2018)	Bosque Nativo (BN)	699.9860	9868.9000	1782.8000	8979.9400	2320.7500	9006.2000	0.0000	0.0000
M5 (2016-2018)	Plant. Forestales (PFT)	682.6990	9906.3500	1640.6300	9074.5600	2363.5300	8918.6800	0.0000	0.0000
M6 (2020)	Agrícola (AGR)	720.5880	9899.3100	1797.1600	9031.5900	2398.6000	8998.9200	0.0000	0.0000
M6 (2020)	Bosque Nativo (BN)	687.3230	9859.4300	1796.4500	8960.3400	2294.9100	9013.2700	0.0000	0.0000
M6 (2020)	Plant. Forestales (PFT)	656.6700	9916.9000	1622.3800	9102.4000	2309.9400	8949.4100	0.0000	0.0000

Nota: Tabla de resumen estadístico a escala de parche. Los valores reflejan el formato estandarizado de la base de datos

Anexo 5.

Tabla 20: Resultados del coeficiente de Spearman (Rho) para la cobertura Agrícola (AGR).

Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
COHESION	Caudal Anual	0.206	0.0005	SI (*)
DIVISION	Caudal Anual	-0.194	0.0010	SI (*)
FRAC_MN	Caudal Anual	0.047	0.4341	NO
PD	Caudal Anual	-0.144	0.0157	SI (*)
PROX_MN	Caudal Anual	0.154	0.0095	SI (*)
SHAPE_MN	Caudal Anual	0.114	0.0550	NO
SIMI_MN	Caudal Anual	-0.249	0.0000	SI (*)
COHESION	Caudal de Invierno	0.199	0.0008	SI (*)
DIVISION	Caudal de Invierno	-0.217	0.0002	SI (*)
FRAC_MN	Caudal de Invierno	0.066	0.2679	NO
PD	Caudal de Invierno	-0.147	0.0135	SI (*)
PROX_MN	Caudal de Invierno	0.162	0.0064	SI (*)
SHAPE_MN	Caudal de Invierno	0.141	0.0175	SI (*)
SIMI_MN	Caudal de Invierno	-0.258	0.0000	SI (*)
COHESION	Caudal de Verano	0.120	0.0433	SI (*)
DIVISION	Caudal de	-0.081	0.1771	NO

Métrica Paisaje	de	Caudal	Rho Spearman	de	Valor P	Significativo (p<0.05)
		Verano				
FRAC_MN		Caudal de Verano	-0.006		0.9163	NO
PD		Caudal de Verano	-0.100		0.0931	NO
PROX_MN		Caudal de Verano	0.086		0.1481	NO
SHAPE_MN		Caudal de Verano	0.045		0.4497	NO
SIMI_MN		Caudal de Verano	-0.194		0.0011	SI (*)

Nota: La tabla detalla los valores de correlación (Rho) y su nivel de significancia (Valor P) entre las métricas de paisaje y los tres regímenes de caudal (Anual, invierno y verano) exclusivamente para la clase Agrícola. Se marca con 'SI (*)' aquellas relaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Anexo 6.

Tabla 21: Resultados del coeficiente de Spearman (Rho) para la cobertura de Plantaciones Forestales (PFT).

Métrica Paisaje	de	Caudal	Rho Spearman	de	Valor P	Significativo (p<0.05)
COHESION		Caudal Anual	-0.124		0.0371	SI (*)
DIVISION		Caudal Anual	0.122		0.0409	SI (*)
FRAC_MN		Caudal Anual	-0.031		0.6057	NO
PD		Caudal Anual	0.357		0.0000	SI (*)
PROX_MN		Caudal Anual	-0.121		0.0419	SI (*)
SHAPE_MN		Caudal Anual	-0.137		0.0216	SI (*)
SIMI_MN		Caudal Anual	0.183		0.0020	SI (*)

Métrica de Paisaje	Caudal	de	Rho Spearman	de	Valor P	Significativo (p<0.05)
COHESION	Caudal Invierno	de	-0.114		0.0566	NO
DIVISION	Caudal Invierno	de	0.110		0.0645	NO
FRAC_MN	Caudal Invierno	de	-0.042		0.4772	NO
PD	Caudal Invierno	de	0.333		0.0000	SI (*)
PROX_MN	Caudal Invierno	de	-0.105		0.0787	NO
SHAPE_MN	Caudal Invierno	de	-0.143		0.0162	SI (*)
SIMI_MN	Caudal Invierno	de	0.181		0.0022	SI (*)
COHESION	Caudal Verano	de	-0.139		0.0195	SI (*)
DIVISION	Caudal Verano	de	0.132		0.0264	SI (*)
FRAC_MN	Caudal Verano	de	-0.005		0.9329	NO
PD	Caudal Verano	de	0.369		0.0000	SI (*)
PROX_MN	Caudal Verano	de	-0.136		0.0223	SI (*)
SHAPE_MN	Caudal Verano	de	-0.116		0.0520	NO
SIMI_MN	Caudal Verano	de	0.165		0.0055	SI (*)

Nota: Correlación y significancia estadística entre métricas de paisaje y caudales bases para las Plantaciones Forestales. Valores marcados con 'SI (*)' indican una relación significativa ($p < 0.05$).

Anexo 7.

Tabla 22: Resultados del coeficiente de Spearman (Rho) para la cobertura de Bosque Nativo (BN).

Métrica de Paisaje	de Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo ($p < 0.05$)
COHESION	Caudal Anual	0.103	0.0876	NO
DIVISION	Caudal Anual	0.030	0.6157	NO
FRAC_MN	Caudal Anual	0.209	0.0005	SI (*)
PD	Caudal Anual	0.005	0.9383	NO
PROX_MN	Caudal Anual	0.106	0.0783	NO
SHAPE_MN	Caudal Anual	0.171	0.0042	SI (*)
SIMI_MN	Caudal Anual	0.062	0.3002	NO
COHESION	Caudal de Invierno	0.064	0.2856	NO
DIVISION	Caudal de Invierno	0.056	0.3542	NO
FRAC_MN	Caudal de Invierno	0.193	0.0013	SI (*)
PD	Caudal de Invierno	-0.021	0.7237	NO
PROX_MN	Caudal de Invierno	0.070	0.2462	NO
SHAPE_MN	Caudal de Invierno	0.132	0.0283	SI (*)
SIMI_MN	Caudal de Invierno	0.069	0.2514	NO

Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
	Invierno			
COHESION	Caudal de Verano	0.175	0.0034	SI (*)
DIVISION	Caudal de Verano	-0.046	0.4402	NO
FRAC_MN	Caudal de Verano	0.302	0.0000	SI (*)
PD	Caudal de Verano	0.092	0.1267	NO
PROX_MN	Caudal de Verano	0.198	0.0009	SI (*)
SHAPE_MN	Caudal de Verano	0.323	0.0000	SI (*)
SIMI_MN	Caudal de Verano	0.053	0.3797	NO

Nota: Relación estadística entre la configuración espacial del Bosque Nativo y los regímenes de caudal base. Los resultados significativos ($p < 0.05$) están señalados con 'SI (*)'.

Anexo 8.

Tabla 23: Síntesis completa de correlaciones significativas de Spearman por cobertura.

Cobertura	Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
BN	COHESION	Caudal Anual	0.103	0.0876	NO
AGR	COHESION	Caudal Anual	0.206	0.0005	SI (*)

Cobertura	Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
PFT	COHESION	Caudal Anual	-0.124	0.0371	SI (*)
BN	DIVISION	Caudal Anual	0.030	0.6157	NO
AGR	DIVISION	Caudal Anual	-0.194	0.0010	SI (*)
PFT	DIVISION	Caudal Anual	0.122	0.0409	SI (*)
BN	FRAC_MN	Caudal Anual	0.209	0.0005	SI (*)
AGR	FRAC_MN	Caudal Anual	0.047	0.4341	NO
PFT	FRAC_MN	Caudal Anual	-0.031	0.6057	NO
BN	PD	Caudal Anual	0.005	0.9383	NO
AGR	PD	Caudal Anual	-0.144	0.0157	SI (*)
PFT	PD	Caudal Anual	0.357	0.0000	SI (*)
BN	PROX_MN	Caudal Anual	0.106	0.0783	NO
AGR	PROX_MN	Caudal Anual	0.154	0.0095	SI (*)
PFT	PROX_MN	Caudal Anual	-0.121	0.0419	SI (*)
BN	SHAPE_MN	Caudal Anual	0.171	0.0042	SI (*)

Cobertura	Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
AGR	SHAPE_MN	Caudal Anual	0.114	0.0550	NO
PFT	SHAPE_MN	Caudal Anual	-0.137	0.0216	SI (*)
BN	SIMI_MN	Caudal Anual	0.062	0.3002	NO
AGR	SIMI_MN	Caudal Anual	-0.249	0.0000	SI (*)
PFT	SIMI_MN	Caudal Anual	0.183	0.0020	SI (*)
BN	COHESION	Caudal de Invierno	0.064	0.2856	NO
AGR	COHESION	Caudal de Invierno	0.199	0.0008	SI (*)
PFT	COHESION	Caudal de Invierno	-0.114	0.0566	NO
BN	DIVISION	Caudal de Invierno	0.056	0.3542	NO
AGR	DIVISION	Caudal de Invierno	-0.217	0.0002	SI (*)
PFT	DIVISION	Caudal de Invierno	0.110	0.0645	NO
BN	FRAC_MN	Caudal de Invierno	0.193	0.0013	SI (*)
AGR	FRAC_MN	Caudal de Invierno	0.066	0.2679	NO
PFT	FRAC_MN	Caudal de Invierno	-0.042	0.4772	NO

Cobertura	Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
BN	PD	Caudal de Invierno	-0.021	0.7237	NO
AGR	PD	Caudal de Invierno	-0.147	0.0135	SI (*)
PFT	PD	Caudal de Invierno	0.333	0.0000	SI (*)
BN	PROX_MN	Caudal de Invierno	0.070	0.2462	NO
AGR	PROX_MN	Caudal de Invierno	0.162	0.0064	SI (*)
PFT	PROX_MN	Caudal de Invierno	-0.105	0.0787	NO
BN	SHAPE_MN	Caudal de Invierno	0.132	0.0283	SI (*)
AGR	SHAPE_MN	Caudal de Invierno	0.141	0.0175	SI (*)
PFT	SHAPE_MN	Caudal de Invierno	-0.143	0.0162	SI (*)
BN	SIMI_MN	Caudal de Invierno	0.069	0.2514	NO
AGR	SIMI_MN	Caudal de Invierno	-0.258	0.0000	SI (*)
PFT	SIMI_MN	Caudal de Invierno	0.181	0.0022	SI (*)
BN	COHESION	Caudal de Verano	0.175	0.0034	SI (*)
AGR	COHESION	Caudal de Verano	0.120	0.0433	SI (*)

Cobertura	Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
PFT	COHESION	Caudal de Verano	-0.139	0.0195	SI (*)
BN	DIVISION	Caudal de Verano	-0.046	0.4402	NO
AGR	DIVISION	Caudal de Verano	-0.081	0.1771	NO
PFT	DIVISION	Caudal de Verano	0.132	0.0264	SI (*)
BN	FRAC_MN	Caudal de Verano	0.302	0.0000	SI (*)
AGR	FRAC_MN	Caudal de Verano	-0.006	0.9163	NO
PFT	FRAC_MN	Caudal de Verano	-0.005	0.9329	NO
BN	PD	Caudal de Verano	0.092	0.1267	NO
AGR	PD	Caudal de Verano	-0.100	0.0931	NO
PFT	PD	Caudal de Verano	0.369	0.0000	SI (*)
BN	PROX_MN	Caudal de Verano	0.198	0.0009	SI (*)
AGR	PROX_MN	Caudal de Verano	0.086	0.1481	NO
PFT	PROX_MN	Caudal de Verano	-0.136	0.0223	SI (*)
BN	SHAPE_MN	Caudal de Verano	0.323	0.0000	SI (*)

Cobertura	Métrica de Paisaje	Caudal	Rho de Spearman	Valor P	Significativo (p<0.05)
AGR	SHAPE_MN	Caudal de Verano	0.045	0.4497	NO
PFT	SHAPE_MN	Caudal de Verano	-0.116	0.0520	NO
BN	SIMI_MN	Caudal de Verano	0.053	0.3797	NO
AGR	SIMI_MN	Caudal de Verano	-0.194	0.0011	SI (*)
PFT	SIMI_MN	Caudal de Verano	0.165	0.0055	SI (*)

Nota: Resumen comparativo de todas las correlaciones evaluadas entre métricas de paisaje y caudales, agrupadas por cobertura (Bosque Nativo, Agrícola y Plantaciones Forestales).

Anexo 9.

Tabla 24: Coordenadas factoriales de las variables del Análisis de Componentes Principales (PCA)

Variable Métrica	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3	Dim. 4	Dim. 5
PD	0.6300	0.4146	-0.3348	0.5200	0.2209
SHAPE_MN	0.7657	-0.1174	-0.0329	-0.5727	0.2661
DIVISION	-0.8616	0.2702	-0.0091	-0.0867	0.4208

Variable Métrica	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3	Dim. 4	Dim. 5
PROX_MN	0.0544	-0.8740	0.2751	0.3335	0.2151
SHDI	0.2480	0.4395	0.8596	0.0730	0.0318

Nota: Cargas factoriales de las métricas de paisaje en las dimensiones del modelo multivariado, determinando su nivel de contribución en los gradientes espaciales.

Anexo 10.

Tabla 25: Resultados de sensibilidad del Edge Depth

Profundidad de Borde	Periodo Evaluado	Cobertura	Valor del Área Núcleo (CORE)
100 m	M0 (1988-1998)	Agrícola (AGR)	133.915,24
100 m	M0 (1988-1998)	Bosque Nativo (BN)	65.306,90
100 m	M0 (1988-1998)	Plant. Forestales (PFT)	60.447,91
100 m	M5 (2016-2018)	Agrícola (AGR)	149.395,32
100 m	M5 (2016-2018)	Bosque Nativo (BN)	88.958,25

Profundidad Borde	de	Periodo Evaluado	Cobertura	Valor del Área Núcleo (CORE)
100 m		M5 (2016-2018)	Plant. Forestales (PFT)	148.592,52
200 m		M0 (1988-1998)	Agrícola (AGR)	89.354,48
200 m		M0 (1988-1998)	Bosque Nativo (BN)	39.090,42
200 m		M0 (1988-1998)	Plant. Forestales (PFT)	28.626,98
200 m		M5 (2016-2018)	Agrícola (AGR)	90.867,82
200 m		M5 (2016-2018)	Bosque Nativo (BN)	57.517,91
200 m		M5 (2016-2018)	Plant. Forestales (PFT)	97.326,30
300 m		M0 (1988-1998)	Agrícola (AGR)	60.393,15
300 m		M0 (1988-1998)	Bosque Nativo (BN)	24.111,04
300 m		M0 (1988-1998)	Plant. Forestales (PFT)	13.666,62

Profundidad Borde	de	Periodo Evaluado	Cobertura	Valor del Área Núcleo (CORE)
300 m		M5 (2016-2018)	Agrícola (AGR)	51.579,94
300 m		M5 (2016-2018)	Bosque Nativo (BN)	37.223,63
300 m		M5 (2016-2018)	Plant. Forestales (PFT)	65.302,39

Nota: Esta tabla resume los resultados de las pruebas de sensibilidad para la definición del efecto borde a 100, 200 y 300 metros, justificando la elección de 200m para el estudio, ya que a distancias mayores el área núcleo disminuye drásticamente

Anexo 11: Figuras de trayectoria individual temporal por cuenca hidrográfica y métrica espacial

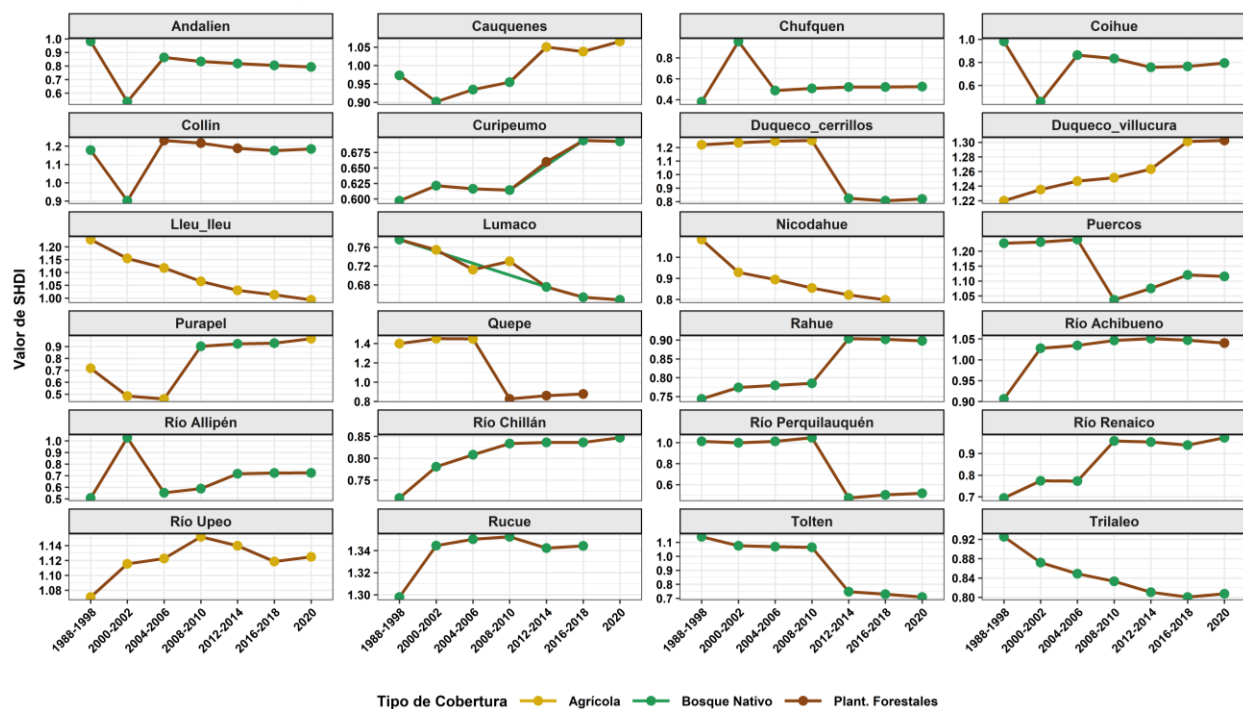


Figura 13: Trayectorias temporales del Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) a escala de paisaje (Landscape)

Nota: Resumen del índice de diversidad (SHDI) calculados para la totalidad del área de estudio en cada uno de los siete periodos evaluados (1988-2020).

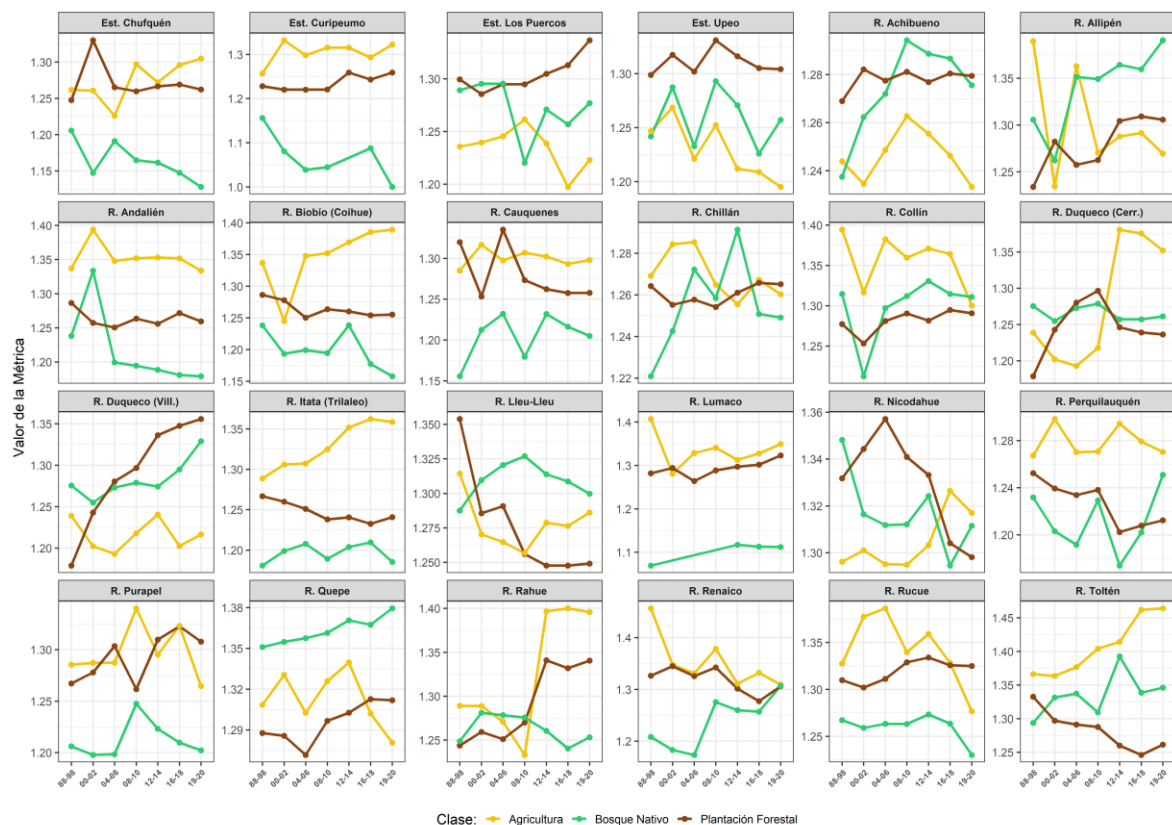


Figura 14: Trayectorias temporales de la Complejidad de Forma (SHAPE_MN) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).

Nota: Evolución de la complejidad geométrica de los parches. Valores más altos indican formas más irregulares y mayor perímetro de contacto con la matriz.

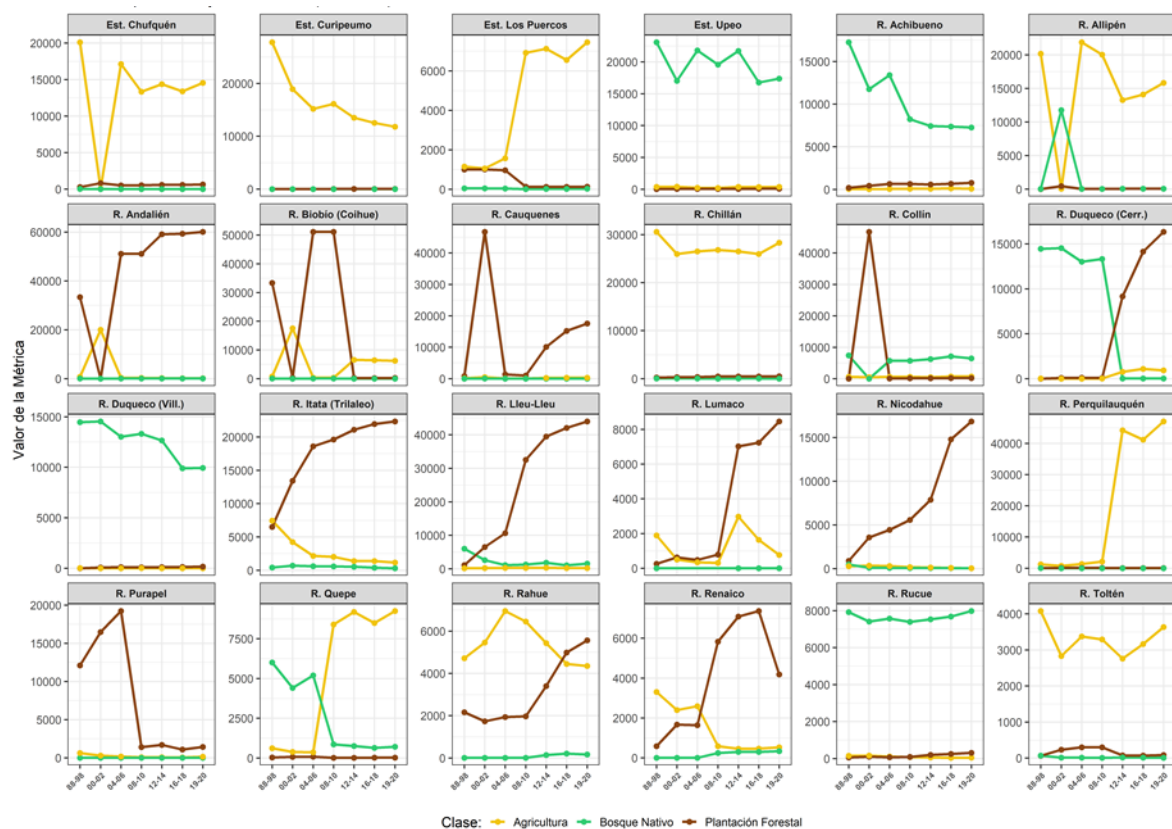


Figura 15: Trayectorias temporales de la Proximidad Media (PROX_MN) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).

Nota: Evolución del índice de proximidad, indicando el nivel de agregación o conectividad espacial entre parches de la misma clase.

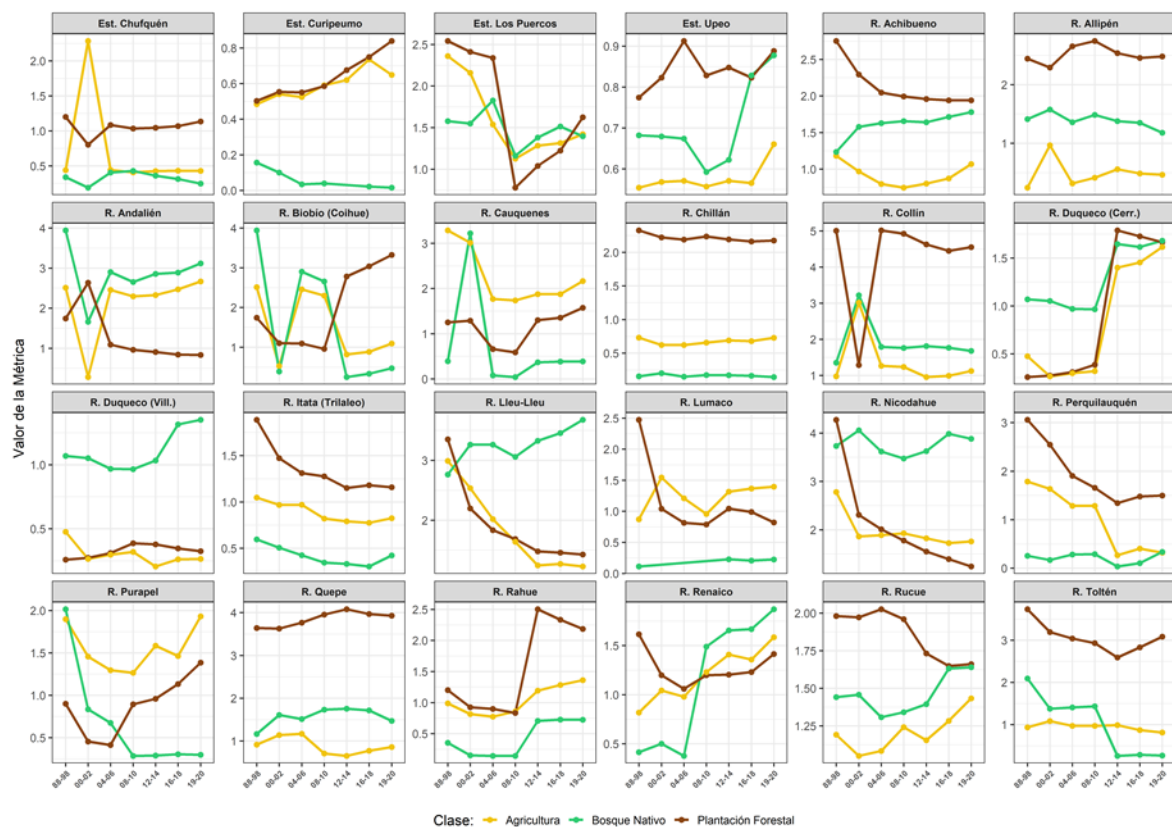


Figura 16: Trayectorias temporales de la Densidad de Parches (PD) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).

Nota: Evolución de la densidad de parches, un indicador directo de la fragmentación física de cada clase de uso de suelo.

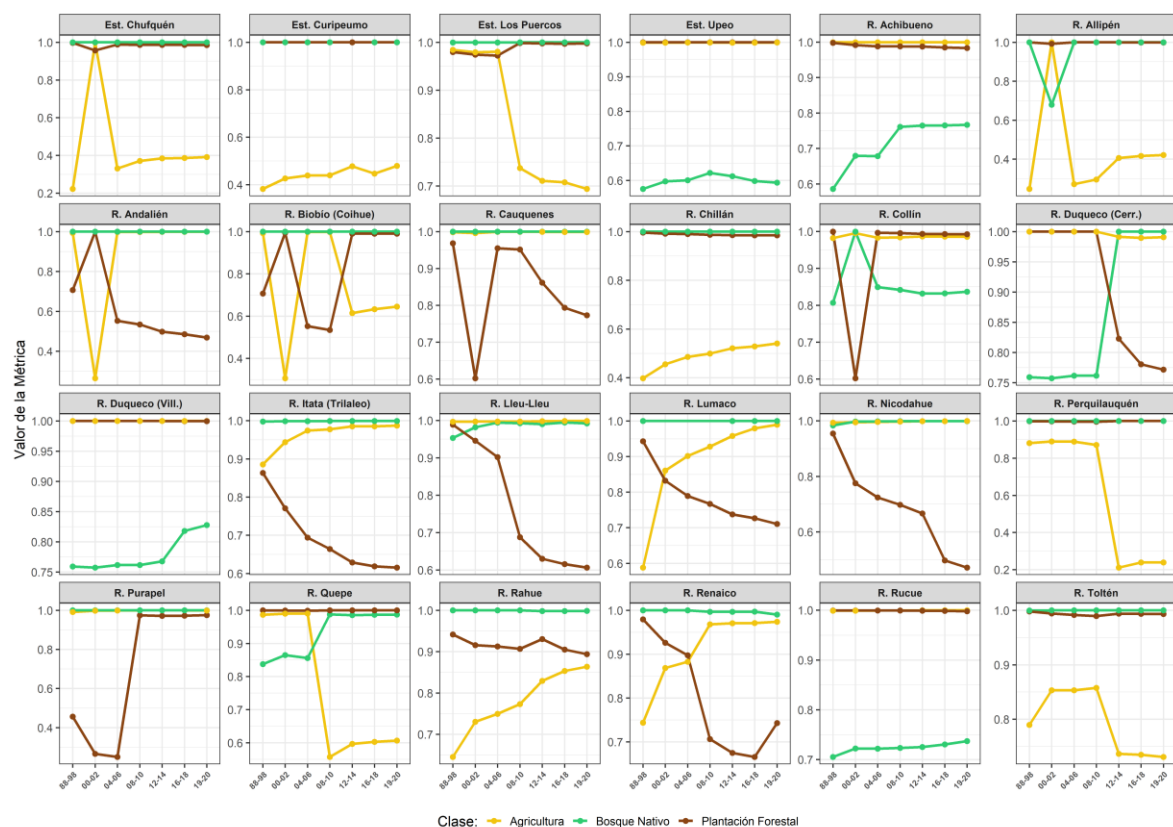


Figura 17: Trayectorias temporales del Índice de División (DIVISION) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).

Nota: Evolución del índice de división, reflejando el grado de aislamiento físico y desintegración espacial de cada uso de suelo

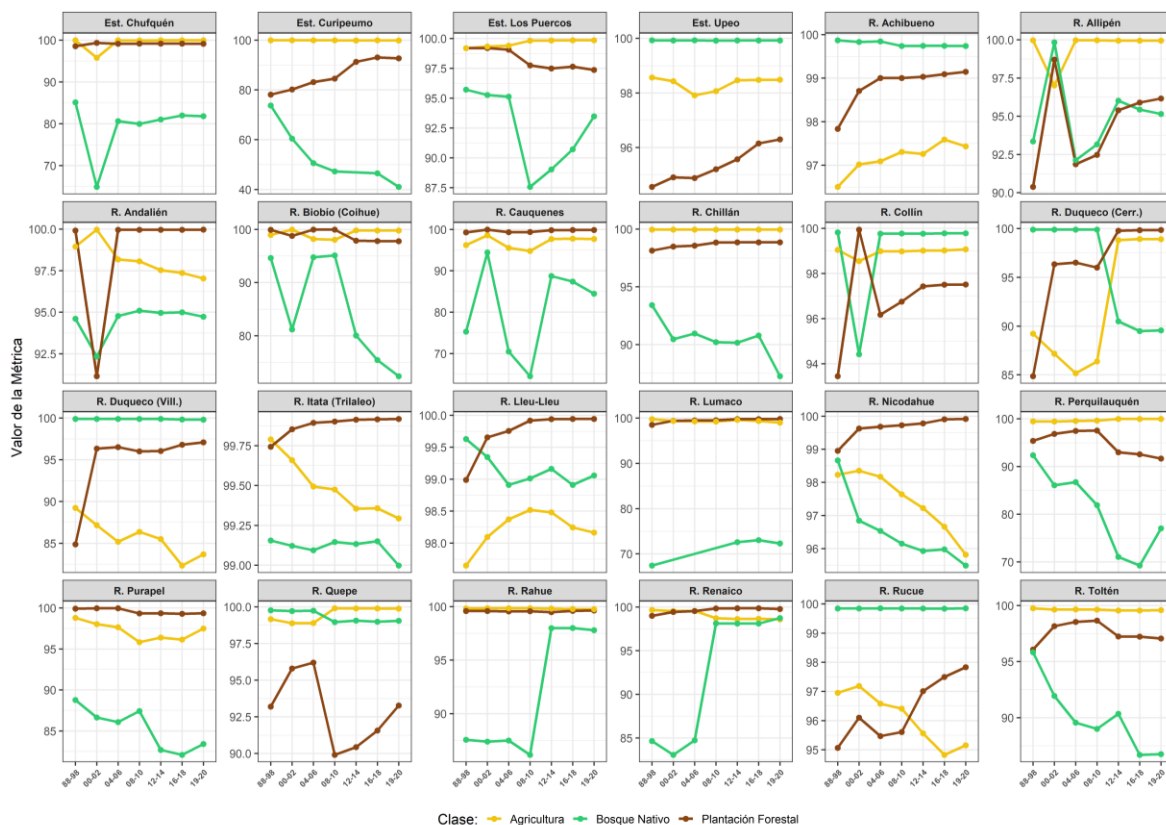


Figura 18: Trayectorias temporales del Índice de Cohesión (COHESION) segregadas por tipo de cobertura (AGR, BN, PFT).

Nota: Evolución del índice de cohesión, el cual cuantifica la conectividad física entre parches de una misma clase. Un aumento en la cohesión indica que los parches mantienen una mayor continuidad estructural, mientras que una disminución refleja una pérdida de contacto físico entre fragmentos, facilitando procesos de aislamiento del hábitat.

Anexo 12: Análisis de componentes principales (PCA) preliminar: Círculo de correlaciones de la totalidad de métricas de paisaje



Figura 19: Análisis de componentes principales (PCA) preliminar: Círculo de correlaciones de la totalidad de métricas de paisaje

Nota: Representación gráfica de la proyección de todas las métricas iniciales calculadas en Fragstats sobre el plano factorial de las dos primeras dimensiones. Este análisis exploratorio permite visualizar la redundancia matemática y la alta correlación entre variables (proximidad de los vectores), lo que fundamentó la selección final de un set de indicadores ortogonales y parsimoniosos para el modelo definitivo.

