



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ENTENDER LA NATURALEZA Y
ESTRUCTURA DE LAS SOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS DE CONSERVACIÓN DE
ESPECIES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

IGNACIO ANDRÉS ORELLANA TRONCOSO

PROFESOR GUÍA:
ANDRES WEINTRAUB POHORILLE

PROFESOR CO-GUÍA:
EDUARDO ÁLVAREZ MIRANDA

COMISIÓN:
VIRGILIO HERMOSO LÓPEZ

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
POR: IGNACIO ANDRÉS ORELLANA TRONCOSO
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE
PROF. CO-GUÍA: EDUARDO ÁLVAREZ MIRANDA

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ENTENDER LA NATURALEZA Y ESTRUCTURA DE LAS SOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS DE CONSERVACIÓN DE ESPECIES

Entendiendo el contexto de crisis medioambiental global, el deterioro de la biodiversidad y los ecosistemas que se tiene actualmente, cobran relevancia las medidas que se toman para combatir esta situación y que ayudan a las especies en su lucha por sobrevivir. El presente trabajo pretende entregar un apoyo a los tomadores de decisiones de planes de conservación en su trabajo de entendimiento de las condiciones del territorio en el cual tienen que actuar, para así tomar decisiones con mayor conocimiento.

Para esto, se utilizan los datos asociados al caso de estudio de la cuenca del río Mitchell que contiene 45 especies de peces de agua y se encuentra al norte de Australia, estos datos son entregados por investigadores del Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC).

Se inicia este trabajo con una introducción del tema a trabajar, justificando la relevancia de enfocar los esfuerzos en materia de conservación de especies, identificando el espacio de oportunidad que motiva el desarrollo del trabajo de título, donde existe un ámbito muy estudiado en torno a la optimización y creación de modelos que resuelven el problema de conservación de especies, en el cual se seleccionan unidades de un territorio que se deberían intervenir con mecanismos de conservación, pero que no indagan en el estudio de la naturaleza y estructura de estas soluciones.

Para estudiar esto, se explicitan los datos a utilizar en este trabajo, para así dar paso a la metodología que permitirá desarrollar la temática, a través de un análisis de la instancia y del espacio de soluciones factibles del problema de conservación con y sin fragmentación espacial, para así comparar los resultados encontrados en cada tipo de problema e identificar los factores que caracterizan a las soluciones de manera transversal.

Como resultado se obtiene que las soluciones del problema de conservación pueden ser caracterizadas a partir de las especies que están presentes en las distintas unidades del territorio, así como también del área que estas unidades cubren, ya que el costo de implementar los planes de conservación está fuertemente relacionados a estos factores. Además, se tiene que la estructura de las soluciones cambia rápidamente al incorporar la variable de fragmentación espacial en el problema, sacrificando calidad en las soluciones por conectividad. Finalmente, se identifican algunos espacios de mejora al momento de definir y construir la metodología que permitiría entender la naturaleza y estructura de las soluciones del problema de conservación de mejor forma.

Algo de esta feliz conjunción de atributos debe poseer el investigador: temperamento artístico que le lleve a buscar y contemplar el número, la belleza y la armonía de las cosas, y sano sentido crítico capaz de refrenar los arranques temerarios de la fantasía y de hacer que prevalezcan, en esa lucha por la vida entablada en nuestra mente por las ideas, los pensamientos que más fielmente traducen la realidad objetiva.

- Santiago Ramón y Cajal

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
2. Marco Teórico	3
2.1 Problema de conservación	3
2.2 Espacio de soluciones factibles	4
3. Propuesta Metodológica	6
3.1 Caso de estudio.....	6
4. Resultados	8
4.1 Análisis de la instancia	8
4.1.1 Caracterización de las especies de la cuenca del río Mitchell	9
4.1.2 Caracterización de las unidades	11
4.2 Análisis de las soluciones del problema sin fragmentación espacial.....	12
4.2.1 Caracterización de las soluciones sin fragmentación espacial.....	12
4.2.2 Análisis a través de regresión logística	16
4.3 Análisis de las soluciones del problema con fragmentación espacial.....	18
4.3.1 Caracterización de las soluciones con fragmentación espacial.....	19
4.4 Comparación a partir de la representación gráfica de las soluciones en el mapa de la cuenca del río Mitchell	28
5. Discusión y Conclusión	32
6. Bibliografía	36
7. Anexos	38

Índice de tablas

Tabla 4.1: Umbral de unidades para los percentiles que determinan la rareza de las especies.	9
Tabla 4.2: Asignación del parámetro de rareza según presencia a las especies del mapa. ..	10
Tabla 4.3: Muestra de 5 unidades con la asignación de los distintos Rarity Index.....	12
Tabla 4.4 : Información asignada a las unidades: ID de la unidad, n° veces que es seleccionada como solución y el porcentaje de veces que es seleccionada en las 500 soluciones.	13
Tabla 4.5: Unidades con especies de mínima rareza 1 y su costo de intervención, junto con el porcentaje de veces que esas unidades son seleccionadas entre las 500 soluciones.	14
Tabla 4.6: Desglose de la capacidad de clasificación del modelo logístico con un treshold de 0.5.	18
Tabla 4.7: Información asociada a las unidades, el número de veces que es seleccionada como solución y el porcentaje de veces que es seleccionada en las 500 soluciones.	19
Tabla 4.8: Clasificación del tipo de unidades del mapa y cantidad de unidades que forman parte de estas.....	25
Tabla 4.9: Información detallada de las unidades fundamentales de la cuenca.....	25
Tabla 4.10: Información detallada de las unidades buenas de la cuenca.....	26

Índice de ilustraciones

Figura 2.1: "Reserve selection problem" - Modelo que es usado comúnmente para resolver el problema de conservación en Marxan.	3
Figura 2.2: Operador que calcula la distancia de Hamming entre dos vectores binarios.	4
Figura 2.3: Ejemplo del cálculo de la distancia de Hamming entre dos vectores A y B.	5
Figura 2.4: Modelo utilizado para explorar el espacio de soluciones factibles.	5
Figura 3.1: Cuenca del río Mitchell dividida en 2.316 unidades de territorio.	7
Figura 4.1: Distribución de las especies de peces en el mapa de la cuenca del río Mitchell.	8
Figura 4.2: Capacidad de predicción del modelo logístico para la etiqueta siempre selecciono.	17
Figura 4.3: Representación gráfica del tipo de unidades que conforman la cuenca del río Mitchell, definidas a partir de la probabilidad de seleccionar cada unidad.....	28
Figura 4.4: Representación gráfica de la solución óptima del problema de conservación sin fragmentación espacial.	29
Figura 4.5: Representación gráfica de las unidades con mínima rareza igual a 1, identificando cuál es la especie de rareza 1 que está presente en estas.	30
Figura 4.6: Representación gráfica de las primeras 40 soluciones del problema con y sin fragmentación.	31
Figura 5.1: Representación gráfica de la solución alternativa n°2 del problema con fragmentación.	34

Gráfico 4.1: Porcentaje de veces que es seleccionada una unidad según cada uno de los cinco Rarity Index con los que se calcula la rareza de las unidades del mapa.....	13
Gráfico 4.2: Observación de los parámetros de área y mínima rareza de las unidades que son y no son seleccionadas en el espacio de 500 soluciones factibles analizado.	14
Gráfico 4.3: Probabilidad de seleccionar siempre una unidad en función del área y mínima rareza de esta	16
Gráfico 4.4: Evolución del número de unidades seleccionadas para el problema con y sin fragmentación espacial.	20
Gráfico 4.5: Evolución del costo de las soluciones con y sin fragmentación espacial.	20
Gráfico 4.6: Evolución del beneficio ecológico para las soluciones con y sin fragmentación.	21
Gráfico 4.8: Evolución del costo y beneficio ecológico de las primeras 20 soluciones de los problemas con y sin fragmentación espacial.	22
Gráfico 4.9: Probabilidad promedio de selección de unidades.	23
Gráfico 4.10: Probabilidad promedio de selección de las primeras 40 soluciones de ls problemas con y sin fragmentación.	24
Gráfico 4.11: Evolución de la cantidad de unidades que es seleccionada para cada tipo de unidad.	26
Gráfico 4.12: Muestra del porcentaje del tipo de unidad que es seleccionado en las primeras 40 soluciones del problema con fragmentación espacial.....	27
Gráfico 5.1: Caracterización del tipo de unidad que es seleccionada en el problema con fragmentación espacial.	33

Capítulo 1

Introducción

Entendiendo el contexto de crisis medioambiental global, asociada al deterioro de la biodiversidad y su constante disminución, donde existe una creciente tasa de extinción (Pimm et al., 2014), cobran relevancia las medidas que se toman para combatir esta situación y que ayudan a las especies en su lucha por sobrevivir.

El cuidado de la biodiversidad y los ecosistemas está siendo cada vez más relevante en las discusiones alrededor del mundo, donde se entiende que la degradación de la naturaleza no es un problema puramente ambiental. Abarca la economía, la salud, la justicia social y los derechos humanos. Jefes de Estado y de Gobierno de todo el mundo, así como líderes de las Naciones Unidas expresaron en una cumbre de la ONU, su compromiso para acordar en 2021 un nuevo marco de protección de la biodiversidad. Más de un millón de especies animales y vegetales están amenazadas en el mundo y la pandemia de COVID-19 ha recalcado aún más la “relación disfuncional” de los humanos con la naturaleza (ONU, 2020). Sin embargo, debido a la limitación de recursos disponibles para la conservación ecológica (James et al., 1999), emerge la necesidad de priorizar sitios y planes de gestión para las intervenciones de conservación que combatan las amenazas que ponen en riesgo ciertas especies (Nel et al., 2007, Butchart et al., 2010).

El número de publicaciones relativas al desarrollo y aplicación de técnicas de priorización espacial ha aumentado rápidamente en las últimas tres décadas. Con un creciente interés en las técnicas cuantitativas, una abundancia de principios y términos rodeando el campo de la priorización de la conservación ha surgido (Kerrie A. Wilson, 2009). Por lo que el problema de optimización que permite resolver los planes de conservación ha sido estudiado y resuelto a través de múltiples mecanismos y modelos.

Actualmente, persisten las amenazas a la biodiversidad. La pérdida de hábitat continúa en muchos países (Polasky et al., 2005) y el calentamiento global progresa rápidamente (UNEP, 2011). Ante esto, habrá una demanda generalizada de métodos y modelos mediante los cuales los recursos de conservación puedan asignarse espacialmente de manera eficaz (Aija Kukkala and Atte Moilanen, 2008).

Uno de los modelos más utilizados para el diseño de planes de conservación de especies, corresponde al “reserve selection problem” (RSP) donde el objetivo general es alcanzar una representación mínima de rasgos de la biodiversidad con el menor costo posible (McDonnell et al.,

2002). Aunque hay muchas variaciones en la forma en que han planteado los problemas de optimización de planes de conservación, la mayoría se deriva de este problema (Beyer et al., 2016).

Considerando lo anterior se tiene la oportunidad de aportar valor a los tomadores de decisión de los planes de conservación en el entendimiento de los problemas de conservación que son resueltos y así colaborar en las medidas de respuesta que son diseñadas para propiciar el cuidado de la biodiversidad y los ecosistemas del planeta.

Dado lo anterior, el estudiante desarrolla su trabajo de memoria en el estudio de la naturaleza de las soluciones de un problema de conservación asociado a un caso de estudio de la cuenca del río Mitchell, ubicado en Australia, que cuenta con información sobre distintas especies de peces, esto con datos suministrados por investigadores del Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC).

Se plantea como objetivo general el desarrollo de una metodología que permita a los tomadores de decisión entender la naturaleza y estructura de las soluciones del problema de conservación de especies que se obtienen con el uso de herramientas de optimización para el diseño de planes de conservación.

Con el fin de alcanzar el objetivo general planteado, se determinan los siguientes objetivos específicos que permiten definir la estructura del trabajo a desarrollar en la memoria:

1. Analizar el espacio de soluciones factibles a través de programas computacionales.
2. Entender cómo afecta la incorporación de la variable de fragmentación espacial al problema. (Criterio de fragmentación para explorar las soluciones).
3. Identificar la naturaleza y estructura de las soluciones del problema de conservación.

La estructura del documento es la siguiente: el capítulo 2 presenta el marco teórico, en el capítulo 3 se presenta la metodología a desarrollar y el caso de estudio, en el capítulo 4 se presentan los resultados de aplicar la metodología planteada, analizando las soluciones del problema de conservación con y sin fragmentación espacial, finalmente en el capítulo 5 se discute y concluye.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Problema de conservación

Con el propósito de dar a la investigación un sistema coherente de conceptos y proposiciones que permitan abordar el problema, se detallan a continuación los aspectos teóricos relevantes para entender los distintos elementos del informe.

El trabajo que se presenta aborda la temática asociada a los planes de conservación de especies, los cuales corresponden al proceso de localizar, configurar, implementar y mantener áreas que se gestionan para promover la persistencia de la biodiversidad y otros valores naturales. Los planes de conservación son inherentemente espaciales (Pressey et al., 2007).

Para apoyar el proceso de localización de áreas los planes de conservación utilizan modelos matemáticos, uno de los modelos más utilizados para el diseño de planes de conservación de especies, corresponde al “reserve selection problem” (RSP) (Beyer et al., 2016), que tiene como objetivo minimizar los costos de implementación de estos planes, entendiendo que los recursos y presupuestos asignados para estos propósitos son escasos y limitados (James et al., 1999).

Marxan es un software de planificación detrás de grandes proyectos de conservación y proporciona ayuda a los planificadores en la toma de decisiones para el diseño de sistemas de reservas (Ball et al., 2009; Watts et al., 2009). Este resuelve una forma del RSP mediante la cual las unidades de planificación se seleccionan para cumplir con los objetivos por un costo total mínimo. En la Figura 2.1 se muestra el modelo que se utiliza comúnmente para resolver el RSP en Marxan.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^N c_i x_i + b \sum_{i=1}^N \sum_{j=1; i \neq j}^N x_i (1 - x_j) v_{ij} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N r_{ik} x_i \geq T_k, k \in K \\ & x_i \in \{0, 1\}, i \in N \end{aligned}$$

Figura 2.1: "Reserve selection problem" - Modelo que es usado comúnmente para resolver el problema de conservación en Marxan.

El modelo de optimización que se muestra considera dos elementos en su función objetivo, la cual busca minimizar el costo de implementar el plan de conservación. Primero se incluye una función de costo por unidades que son incluidas en la solución del problema, donde c_i es el costo de seleccionar la unidad i , N es el número de unidades de planificación, K es el número de características de interés (por ejemplo, especies) y x_i es la variable de decisión binaria que determina si se selecciona un sitio ($x_i=1$) o no ($x_i=0$). En segundo lugar, se le suma una penalización por fragmentación entre unidades. La función objetivo incluye una penalización de costo por seleccionar unidades de planificación no adyacentes basada en una propiedad que cuantifica la relación espacial entre dos unidades (v_{ij}), como la longitud del límite compartido entre ellas, y un parámetro de escala b que se ajusta para controlar la fuerza de la penalización influyendo así en la agregación de unidades de planificación en la solución (Wattset et al., 2009) en casos donde la conectividad no es relevante se asume este factor como 0. La restricción asegura que se cumplan los target u objetivos mínimos (T_k) para cada una de las k características de interés, donde r_{ik} es el valor o la contribución de la unidad i a la característica k . Existe una flexibilidad considerable en la implementación de las variables c , v y r , lo que significa que esta formulación se puede utilizar de manera innovadora para resolver muchas variaciones del problema de RSP.

Si bien, a partir de este modelo es posible encontrar una solución que minimice el costo de implementación de un plan de conservación, esta solución registra las unidades que deben formar parte de este plan, pero no entrega información sobre porque se eligen ciertas unidades por sobre otras en el problema de conservación. Por lo que se decide explorar un espacio de soluciones factibles correspondiente a soluciones similares en rendimiento, pero distintas en cuanto a las unidades seleccionadas para así identificar qué similitudes se encuentran en estas soluciones y de esta forma poder entender su estructura.

2.2 Espacio de soluciones factibles

El año 2016 se publica el trabajo de Beyer, uno de los primeros trabajos en los que se propone la resolución del problema de conservación utilizando resolución exacta usando herramientas de programación matemática. A partir de esto es que se utilizarán las soluciones de un modelo de programación matemática para explorar el espacio de soluciones factibles del caso de estudio a tratar (cuenca del Río Mitchell) y así analizar las soluciones del problema.

El modelo que se utiliza para explorar el espacio de soluciones factibles utiliza el concepto de la *distancia de Hamming*, correspondiente a un operador matemático que encuentra distancia entre vectores binarios (Bookstein et al., 2002). En la Figura 2.2 se muestra el operador que calcula la distancia de Hamming entre dos vectores binarios x y x^0 , mientras que la Figura 2.3 ejemplifica cómo se realiza este cálculo.

$$H(x, x^0) = \sum_{i=1}^n |x_i - x_i^0|$$

Figura 2.2: Operador que calcula la distancia de Hamming entre dos vectores binarios.

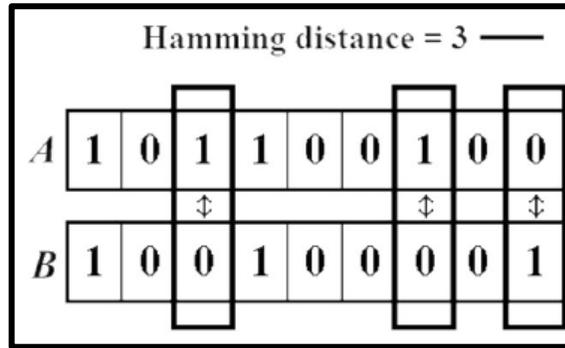


Figura 2.3: Ejemplo del cálculo de la distancia de Hamming entre dos vectores A y B.

Debido a que la solución del problema de conservación corresponde a un vector binario que representa las unidades que se deben incluir en el plan de conservación, se puede utilizar la distancia de Hamming para comparar distintas soluciones del problema de conservación a través de estos vectores y así encontrar soluciones que sean diferentes entre ellas.

Utilizando la distancia de Hamming, se generan las distintas soluciones que se utilizan para formar el espacio de soluciones factibles a analizar en este trabajo. Se propone un modelo en el cual se encuentra un nuevo espacio de soluciones, seleccionando unidades de planificación en las que intervenir, donde la función objetivo busca maximizar la distancia de Hamming con respecto a las soluciones previamente encontradas para así encontrar soluciones distintas entre sí (las soluciones que tienen una distancia de Hamming ≥ 1 son soluciones distintas).

Para mantener en las soluciones alternativas una estructura similar a la solución óptima del RSP se utilizan las restricciones de: mantener el costo asociado a intervenir las unidades del plan de conservación menor a un valor flexibilizado con respecto a la solución óptima y mantener el beneficio ecológico asociado al target (T_k).

$$\begin{aligned} \max \quad & z^* = H(x, x^0) = \sum_{i=1}^n |x_i - x_i^0| \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N r_{ik} x_i \geq T_k, k \in K \\ & \sum_{i=1}^N c_i x_i + b \sum_{i=1}^N \sum_{j=1; i \neq j}^N x_i (1 - x_j) v_{ij} \leq M^* \end{aligned}$$

Figura 2.4: Modelo utilizado para explorar el espacio de soluciones factibles.

Donde M^* representa el costo encontrado en la solución óptima del problema de conservación multiplicado por un factor que indicará cuanto se flexibilizan los costos con respecto a la primera solución encontrada. Mientras que la función objetivo maximiza la distancia de Hamming de la nueva solución con respecto a la solución anterior.

Capítulo 3

Propuesta Metodológica

La metodología que se trabajará permitirá realizar el estudio y análisis de un espacio de soluciones factibles del problema de conservación de especies con y sin fragmentación espacial asociado a la cuenca del río Mitchell. Para lograr esto, la metodología a realizar considera como primera etapa un análisis de los datos asociados al mapa en el cual se desarrolla el problema, es decir, a la instancia, para estudiar y encontrar información relevante que permita caracterizar a las especies que se encuentran en el territorio, pudiendo determinar factores como coocurrencia de especies, rareza de especies y otros análisis que entreguen información relevante para entender la naturaleza y estructura de las soluciones encontradas en la exploración del espacio de soluciones factibles al problema de conservación de especies utilizando el modelo matemático anteriormente mencionado.

Luego, se realizará un análisis del espacio de soluciones para entender la relación que existe entre las distintas unidades seleccionadas y qué tipo de factores afectan a que algunas unidades sean seleccionadas y otras no. Para esto, se estudiarán dos sets de soluciones. El primero se realizará sin considerar la variable de fragmentación espacial en el modelo que explora el espacio de soluciones factibles, permitiendo identificar de esta forma las soluciones fundamentales del problema y así entender si estas soluciones permiten explicar la estructura de las soluciones que luego complejizan el problema, con esto se generará una clasificación de las unidades que permita medir la calidad de las soluciones, y así luego incorporar la variable de fragmentación espacial al modelo y realizar un análisis comparativo.

Finalmente, se considera una comparación de estos resultados y un análisis de las características que tienen las soluciones del problema de conservación, pudiendo diferenciar porque algunas unidades se seleccionan por sobre otras y así pasar a la etapa de discusión de los resultados encontrados para identificar la naturaleza y estructura de las soluciones del problema de conservación.

3.1 Caso de estudio

Para abordar el trabajo planteado anteriormente, se realizará un análisis del problema de conservación de especies asociado al caso de estudio de la cuenca del río Mitchell, un río ubicado al norte de Australia, con datos suministrados por investigadores del Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC). En el caso de estudio, se utilizan datos de la cuenca correspondientes a un archivo de distribución de 45 especies de peces de agua dulce en el territorio, donde se divide la cuenca del río en 2.316 unidades que suman un área total de 72.389 km², se tiene

además información sobre el área de cada una de estas unidades (31,3 km² de área promedio y 26,8 km² de desviación estándar). El área de cada una de estas unidades es el valor que se considerará como costo asociado al momento de determinar si la unidad forma parte o no de las soluciones del problema de conservación.

La figura 3.1 representa cómo está dividido el mapa de la cuenca en las 2.316 unidades.

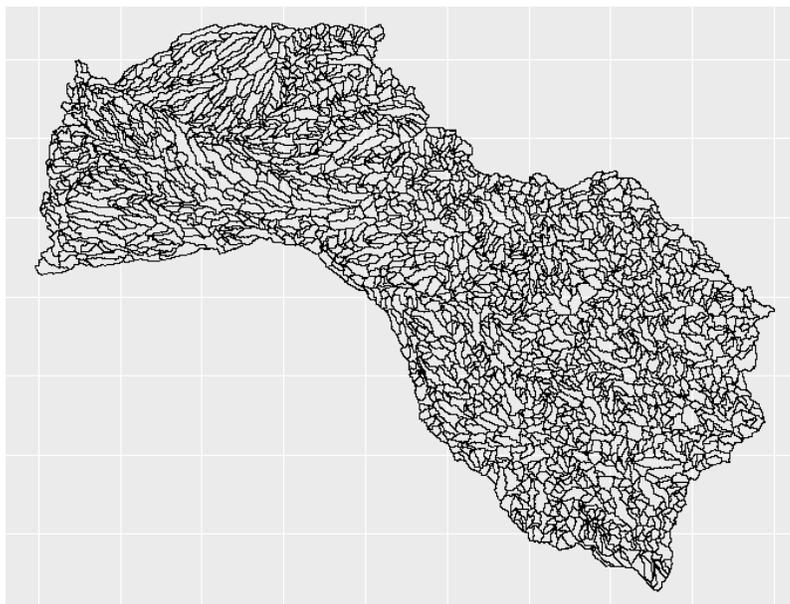


Figura 3.1: Cuenca del río Mitchell dividida en 2.316 unidades de territorio.

Para el análisis del espacio de soluciones factibles, se cuenta con soluciones del problema de conservación de especies suministradas por investigadores del CTFC, donde en cada una de estas soluciones se identifican las unidades que se deben seleccionar para cumplir con criterios de costo y beneficio ecológico del problema, para este caso, se utiliza como target de representación de especies el valor de 5 unidades, correspondientes al mínimo de unidades en las que deben estar presentes las especies. Esta información se analiza y estudia utilizando R Studio y Excel.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Análisis de la instancia

Como se ha mencionado anteriormente, las unidades de la cuenca presentan información correspondiente a la presencia de distintas especies y el área de superficie que tiene cada unidad. Con respecto a la presencia de especies en las unidades, se tiene que en promedio hay 15 especies en cada unidad, llegando a tener unidades con una alta coocurrencia de especies al alcanzar las 32 especies que coexisten en una unidad, como también hay unidades en las que no hay ninguna especie (histograma en Anexo A), la distribución de las especies en el mapa se presenta en la Figura 4.1. Al estudiar la relación entre la cantidad de especies que hay en una unidad y el área de esta, se tiene la existencia de una relación positiva entre el área de la unidad y la cantidad de especies que están presentes en esta (Anexo B).

Distribución Especies

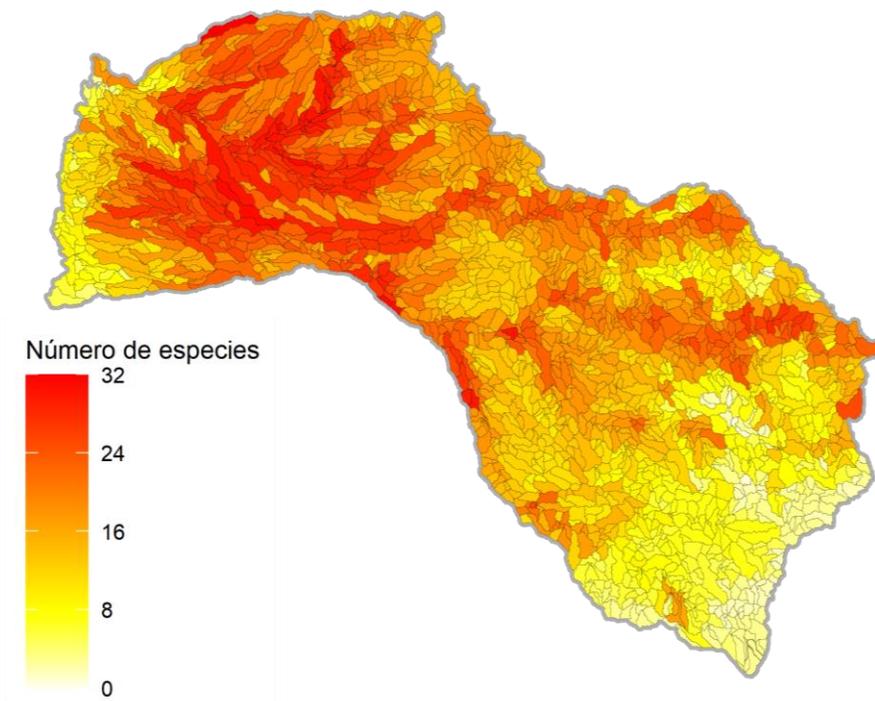


Figura 4.1: Distribución de las especies de peces en el mapa de la cuenca del río Mitchell.

Si bien se conoce cómo se distribuyen las especies en el mapa y el valor del área de cada unidad, se considera relevante la creación de algunas variables que caractericen la instancia, considerando las distintas especies y las unidades del mapa que las contienen, para así tener más información que nos permita comprender de la estructura y naturaleza de las soluciones del problema de conservación.

4.1.1 Caracterización de las especies de la cuenca del río Mitchell

Ya que las unidades de la cuenca presentan distinta distribución de especies, es importante distinguir unas especies de otras, para así conocer si existen algunas que determinen la estructura que tendrá la solución del problema de conservación. Se crea entonces un parámetro de rareza para cada especie, ya que se considera importante determinar cuáles son las especies más raras de la instancia, entendiendo que las unidades que contienen a las especies más raras podrían de interés al momento de seleccionar cuales unidades deben ser incorporadas en un plan de conservación.

Se estudiaron tres criterios de rareza que permiten diferenciar las distintas especies entre sí:

- Rareza a partir de la presencia de la especie.
- Rareza a partir del área cubierta por la especie.
- Rareza a partir de la coocurrencia de una especie con otras.

A partir de la presencia de la especie, definida como el número de unidades en el mapa en el que se encuentra la especie, se asignan valores de rareza del 1 al 10 de acuerdo con el percentil que corresponda al número de unidades en las que está presente una especie con respecto al total de unidades de la cuenca, donde las especies más raras tienen asignado el valor de 1 y las menos raras un valor de 10. Así, si la presencia de una especie se sitúa en el percentil 10, significa que está presente en menos unidades que el 90% de las otras especies y su valor de rareza será 1.

Tabla 4.1: Umbral de unidades para los percentiles que determinan la rareza de las especies.

Percentil	Presencia (número de unidades)	Ranking rareza
0	5	1
10	12	2
20	84	3
30	277	4
40	412	5
50	583	6
60	709	7
70	1033	8
80	1575	9
90	1959	10

La Tabla 4.1 indica el número de unidades que determinan el umbral de los percentiles utilizados y la rareza que se asigna a las especies en base a este valor. Con esta asignación, se tiene que las especies que están presentes en menos de 12 unidades y en al menos 5 (mínimo valor de presencia dado por el target), serán asignadas con la rareza 1, mientras que las especies que tengan una presencia mayor a 12 y menor a 84 serán asignadas con la rareza 2 y así consecutivamente. De esta forma, la caracterización de las especies del mapa por su rareza se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Asignación del parámetro de rareza según presencia a las especies del mapa.

Especies	Rareza	Presencia (número de unidades)
mel_ni	1	5
mel_ss	1	6
chl_ra	1	10
hyp_co	1	10
var_la	1	11
amb_sp	2	15
glo_gi	2	26
iri_we	2	28
pse_te	2	48
syn_sa	3	94
meg_cy	3	203
neo_le	3	238
neo_gr	3	246
amb_ag	3	276
den_ba	4	282
zen_sp	4	301
syn_se	4	305
hep_ca	4	408
lat_ca	5	416
thr_sc	5	424
por_re	5	482
arr_sc	5	501
mog_mo	5	583
neo_be	6	622
str_kr	6	653
scl_ja	6	692
ano_da	6	698
oph_sp	7	727
neo_hy	7	819
glo_sp	7	868
neo_at	7	957
nem_er	8	1052
tox_ch	8	1241
glo_au	8	1354
amb_ma	8	1385
neo_pa	8	1567
cra_st	9	1611
oxy_se	9	1657
glo_ap	9	1865
sco_og	9	1882
mel_si	10	2011
lei_un	10	2018
oxy_li	10	2029
amn_pe	10	2113
hep_fu	10	2225

Para la asignación de las rarezas se exploraron otras dos alternativas como criterio que permitiera caracterizar a las especies. Considerando características del área cubierta por las especies y de la coocurrencia que las especies tenían con otras especies.

Para el parámetro de rareza que se relaciona con el área, se utilizó el porcentaje del área en el que se encontraban presentes las especies, entendiendo que hay especies que pueden estar en una menor cantidad de unidades, pero cubrir una mayor área del mapa. Para el criterio que considera la coocurrencia de una especie con otras, la rareza de una especie se asigna de acuerdo con la cantidad de especies distintas con las que la especie se encuentra en las distintas unidades (se pueden observar ambas asignaciones de rareza en Anexo C). Sin embargo, al estudiar el espacio de soluciones del problema de conservación se observa que estos parámetros de rareza no caracterizan de forma precisa a las unidades que se seleccionan como solución del problema de conservación de especies.

Se recuerda que las restricciones del problema apuntan a cumplir el target de representación ecológica de las especies y a minimizar el costo de intervenir en las distintas unidades, por lo que hace sentido que la definición de rareza más apropiada sea la rareza según la presencia de las especies, debido a que el target por especie se determina según la cantidad de unidades en las que esta especie se encuentra.

4.1.2 Caracterización de las unidades

- Especies

Se utiliza el parámetro que se tiene en los datos, el cual indica el número de especies que se encuentran en cada unidad para así diferenciar las unidades que concentran una mayor cantidad de especies y que por lo tanto podrían ser consideradas de mayor relevancia al realizar un plan de conservación debido a la oportunidad de aumentar la presencia de múltiples especies al seleccionar este tipo de unidades, pudiendo alcanzar los targets de las especies seleccionando una menor cantidad de unidades.

- Costo x Especie

Se construye la variable de *costo x especie* al dividir el valor del área de cada unidad del mapa en la cantidad de especies que esta contiene. Para esto, es útil recordar que existe una relación positiva entre el área de las unidades y la cantidad de especies que estas contienen, por lo que la selección de unidades puede pasar por tener un bajo costo por especie, esto podría explicar que existan unidades seleccionadas que sean más caras (por tener mayor área) que otra, porque esta aporta con un mayor número de especies y de esta forma aporta en alcanzar el target de especies de mejor manera que la otra unidad más barata. Al recordar la naturaleza del problema de conservación se observa que este apunta a reducir costos y esto se puede conseguir cubriendo una menor área, al seleccionar un menor número de unidades.

- Rarity Index

Entendiendo que cada una de las unidades en las que está dividida la cuenca del río Mitchell tiene una combinación de especies que coexisten en esa unidad, se determina que una forma de caracterizar las unidades es de acuerdo con la rareza de las especies que estas contienen. Para esto, se utilizan cinco formas de calcular el Rarity Index de las unidades:

- Promedio de la rareza de las especies que están en la unidad.
- Mediana de la rareza de las especies que están en la unidad.
- Promedio eliminando el máximo (especie menos rara).
- Mediana eliminando el máximo (especie menos rara).
- Mínimo entre todas las rarezas de las especies que están en la unidad.

Tabla 4.3: Muestra de 5 unidades con la asignación de los distintos Rarity Index.

GridID	Especies	Promedio Rarity	Mediana	Promedio sin max	Mediana sin max	Min rareza
59	14	7	8	6	5	1
68	19	7	8	7	7	2
126	10	6	7	6	6	2
141	13	5	4	5	4	1
146	13	7	7	6	5	2

Los valores para la unidad número 59 indican que esta unidad contiene 14 especies de peces, el promedio de la rareza de las especies es 7, pero dejando de lado el valor máximo (la especie menos rara de esa unidad) pasa a tomar el valor de 6, mientras la mediana pasa de tener un valor de 8 a 5 al no considerar la especie menos rara, finalmente, se observa que esa unidad contiene a una de las especies más raras del mapa, ya que su mínima rareza es igual a 1.

Estos índices se asignan a cada una de las unidades, para luego ser observados en el espacio de soluciones factibles del problema y así determinar si la frecuencia con la que se selecciona una unidad está relacionada de mayor manera con alguno de los cinco índices por sobre los otros.

4.2 Análisis de las soluciones del problema sin fragmentación espacial

4.2.1 Caracterización de las soluciones sin fragmentación espacial

Para estudiar que define la estructura de la solución de un problema de conservación se decide estudiar un espacio de soluciones factibles de un problema asociado a las especies de peces de la cuenca del río Mitchell, en este trabajo se cuenta con 500 iteraciones de soluciones, cada una de estas soluciones se compone de un mix de unidades del mapa que han sido seleccionadas por sobre otras unidades para resolver el problema de optimización planteado para esta etapa del trabajo y que ha sido descrito en una sección anterior de este documento. Es a partir de estas soluciones que se procede a analizar lo que caracteriza a las unidades del mapa que son seleccionadas.

Lo primero que se realiza para caracterizar las soluciones, es la identificación de las unidades del mapa que se seleccionan y dan forma a cada solución. Con esto, se asigna una variable que indica cuantas veces ha sido seleccionada una unidad como solución del problema de conservación y luego se crea otra variable asociada al porcentaje de veces que se selecciona una unidad con respecto a las 500 veces que podría ser seleccionada.

Tabla 4.4 : Información asignada a las unidades: ID de la unidad, n° veces que es seleccionada como solución y el porcentaje de veces que es seleccionada en las 500 soluciones.

GridID	isSolution	%Solution
248	121	24,2%
1793	69	13,8%
1870	63	12,6%
1087	20	4,0%
603	19	3,8%

A partir de esa asignación, se tiene que existen 95 unidades de la cuenca (4,1% del total) que forman parte de la solución al menos en una oportunidad. Mientras que hay 37 unidades que han sido seleccionadas en el 100% de las soluciones (ver Anexo E), las cuales podrían entregar información relevante para entender la naturaleza y estructura de este problema de conservación de especies.

Para continuar con la caracterización de las soluciones sin fragmentación espacial, un factor importante es decidir cuál de los criterios de Rarity Index será utilizado para caracterizar a las unidades. Se realiza entonces la observación de los cinco Rarity Index para entender cómo se relacionan con las unidades que son seleccionadas como solución del problema. En el Gráfico 4.1 se muestra el porcentaje de selección de cada una de las unidades de la cuenca, diferenciando según los criterios de promedio de rareza, promedio sin máx, mediana, mediana sin máx y mínima rareza.

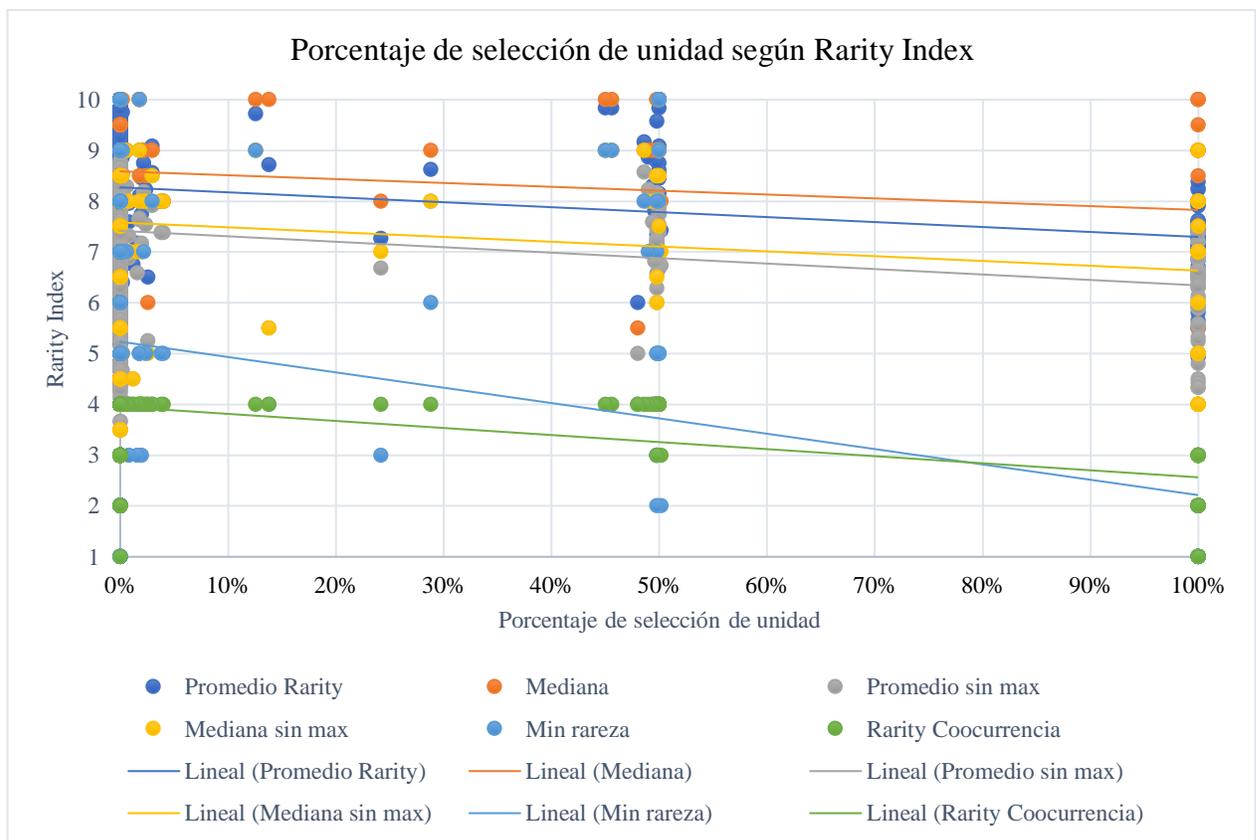


Gráfico 4.1: Porcentaje de veces que es seleccionada una unidad según cada uno de los cinco Rarity Index con los que se calcula la rareza de las unidades del mapa.

Se tiene que el Rarity Index: Mín rareza, definido como el mínimo valor de rareza entre todas las rarezas de las especies que están presentes en la unidad, es el índice que se relaciona de mayor manera con el porcentaje de veces que se selecciona una unidad.

Pareciera ser entonces que la frecuencia con la que se selecciona una unidad depende fuertemente del mínimo de la rareza de las especies que tiene, sin embargo, esta no es la única variable que explica porque ciertas unidades son seleccionadas, ya que el área de las unidades también es considerada al momento de encontrar la solución al problema de conservación, ya que esta determina el costo de intervenir las unidades seleccionadas. El Gráfico 4.2 representa una observación de las variables mencionadas para observar su relación con la selección o no de las unidades.

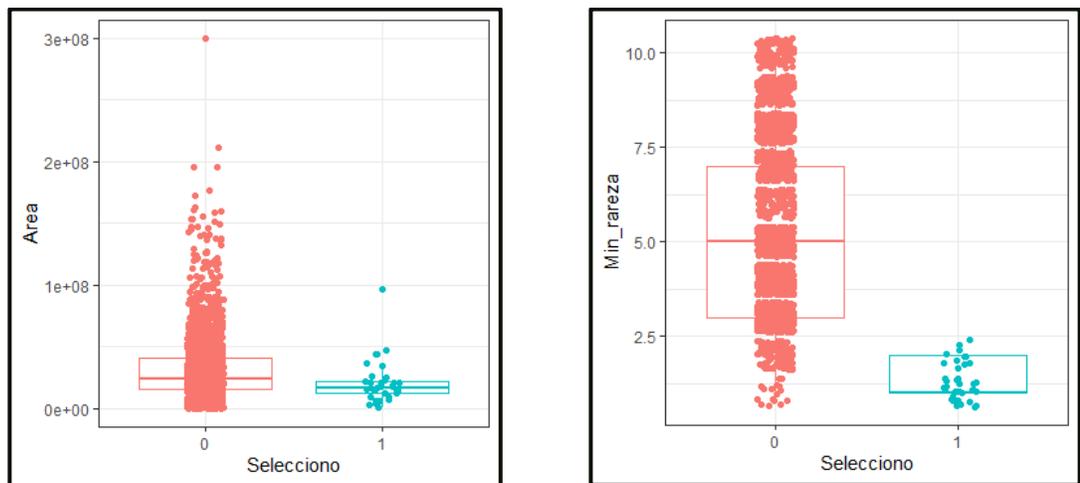


Gráfico 4.2: Observación de los parámetros de área y mínima rareza de las unidades que son y no son seleccionadas en el espacio de 500 soluciones factibles analizado.

Parece existir una diferencia entre el área y el mínimo de rareza de las unidades que son y no son seleccionadas. Al hacer un análisis considerando esta información, se tiene que todas las unidades que han sido seleccionadas en las 500 soluciones tienen un valor de mínima rareza de 1 o 2 (36 unidades), pero no todas las unidades con un mínimo rareza de 1 o 2 (144 unidades) son seleccionadas. Por lo que el 20% de las unidades que tienen un valor de 1 o 2 en este Rarity Index son seleccionadas siempre.

Ante esto, se revisa con mayor detalle a las unidades que son siempre seleccionadas y que contienen a las especies más raras de la cuenca, en particular aquellas que tienen una rareza igual a 1, las cuales se presentan en la Tabla 4.5.

Se observa que las unidades que son seleccionadas corresponden a las 5 unidades con menor costo de intervención (menor área) dentro de todas las unidades en las que se encuentran esas especies. En el caso de la especie que tiene una presencia de 5 unidades, todas las unidades que contienen a esta unidad deben ser seleccionada sí o sí para alcanzar el target del problema, independiente de su costo, lo que permite entender la unidad outlier presente en el Gráfico 4.2 que muestra el área de las unidades seleccionadas.

Tabla 4.5: Unidades con especies de mínima rareza 1 y su costo de intervención, junto con el porcentaje de veces que esas unidades son seleccionadas entre las 500 soluciones.

Especie	GridID	Costo	Selección sin fragmentación
mel_ni	1340	7	100%
mel_ni	1334	23	100%
mel_ni	1354	26	100%
mel_ni	1337	37	100%
mel_ni	1982	97	100%
mel_ss	1927	14	100%
mel_ss	1702	21	100%
mel_ss	1925	25	100%
mel_ss	1716	34	100%
mel_ss	1911	44	100%
mel_ss	1975	91	0%
chl_ra	829	15	100%
chl_ra	902	16	100%
chl_ra	831	17	100%
chl_ra	1624	18	100%
chl_ra	828	21	100%
chl_ra	825	28	0%
chl_ra	845	32	0%
chl_ra	918	49	0%
chl_ra	898	86	0%
chl_ra	704	147	0%
hyp_co	581	4	100%
hyp_co	587	13	100%
hyp_co	540	14	100%
hyp_co	59	21	100%
hyp_co	167	41	0%
hyp_co	575	42	0%
hyp_co	141	47	100%
hyp_co	63	57	0%
hyp_co	166	63	0%
hyp_co	104	68	0%
var_la	455	16	100%
var_la	1088	20	100%
var_la	1126	21	100%
var_la	1158	22	100%
var_la	1065	33	0%
var_la	1111	37	0%
var_la	1048	37	0%
var_la	489	42	0%
var_la	468	43	0%
var_la	1162	44	100%
var_la	1091	50	0%

4.2.2 Análisis a través de regresión logística

Se utiliza el programa Rstudio para realizar un modelo de regresión logística a partir de las soluciones encontradas en el problema de conservación de especies. En la regresión logística, se estima la probabilidad de que un evento ocurra, en este caso el objetivo es calcular la probabilidad de seleccionar una unidad del mapa condicionada a las variables explicativas que observamos en los análisis anteriores, estas variables corresponden al valor de mínima rareza y área de una unidad.

La etiqueta siempre selecciono se determina para identificar las unidades que resultan fundamentales al momento de encontrar soluciones al problema de conservación, es decir, son unidades que siempre deberían formar parte del mix de unidades que se selecciona en cada solución, estas unidades son de especial interés para entender que diferencia a las unidades que son seleccionadas por sobre las que no lo son.

4.2.2.1 Regresión logística asignando etiqueta - Siempre selecciono

La variable dependiente “Siempre selecciono” está codificada como 1 si se selecciona siempre la unidad y como 0 si nunca es seleccionada o solo es seleccionada en algunas oportunidades.

Acorde a los resultados del modelo (Anexo D), la probabilidad de que una unidad sea siempre seleccionada está inversamente relacionada a la mínima rareza y al área de la unidad, siendo ambas de estas relaciones significativas. La representación gráfica del modelo que identifica a las unidades que deberían ser seleccionadas se muestra a continuación:

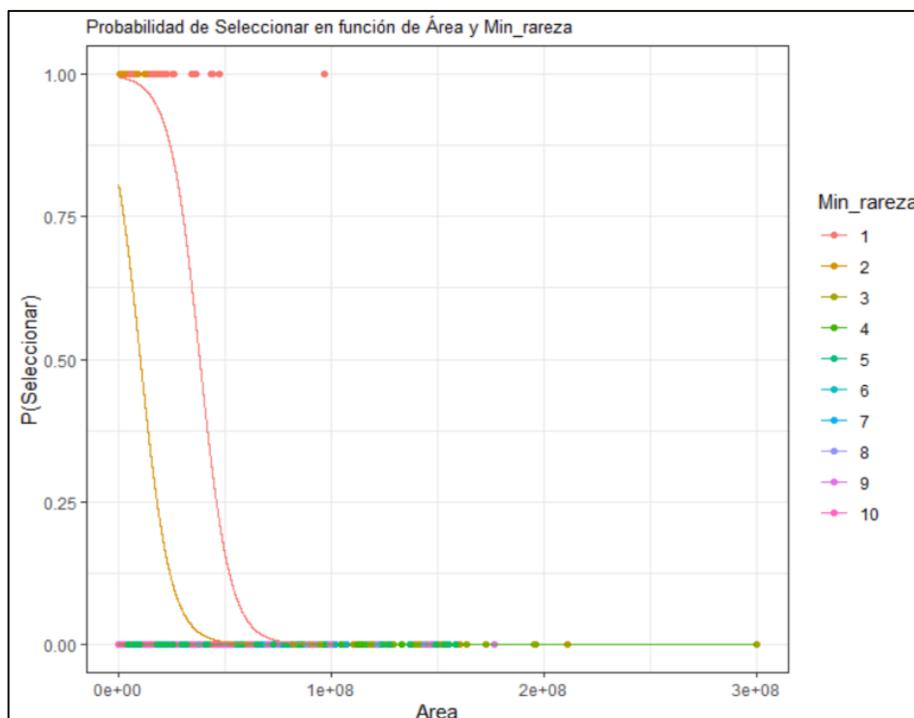


Gráfico 4.3: Probabilidad de seleccionar siempre una unidad en función del área y mínima rareza de esta

Al representar las predicciones del modelo diferenciando entre el mínimo de rareza de las unidades se aprecia que la curva de las rarezas más cercanas a uno está por encima al resto. Esto se debe a que, como indica el coeficiente parcial de correlación del predictor Min rareza (Anexo D), para una cierta área de unidad, la probabilidad de seleccionar esa unidad es mayor por nivel de rareza. Se revela además que tal como fue identificado anteriormente, las unidades que tienen una mínima rareza mayor a 2 no son clasificadas con la etiqueta de seleccionar, por lo que esas unidades tienen una baja probabilidad de estar siempre presente como soluciones del problema de conservación. Además, se prefieren unidades raras que tienen un valor de área alto por sobre las unidades que contienen especies más comunes y son más baratas, lo que podría estar dado por la necesidad de alcanzar cierto target.

Al realizar la evaluación del modelo a través del test de Likelihood ratio y la función ANOVA en RStudio, se obtuvo que el modelo es significativo (Anexo D).

Para estudiar las capacidades de clasificación que tiene el modelo generado, se realiza una comparación de clasificación entre lo que predice y las observaciones reales que se tienen a partir de los datos. En esta clasificación se utiliza un threshold de 0.5, lo que significa que si la probabilidad de que la variable dependiente adquiera el valor 1 (Selecciono) es superior a 0.5, se asigna a este nivel, si es menor se asigna al 0 (No Selecciono). Los resultados de manera gráfica y numérica son los presentados en la Figura 4.2.

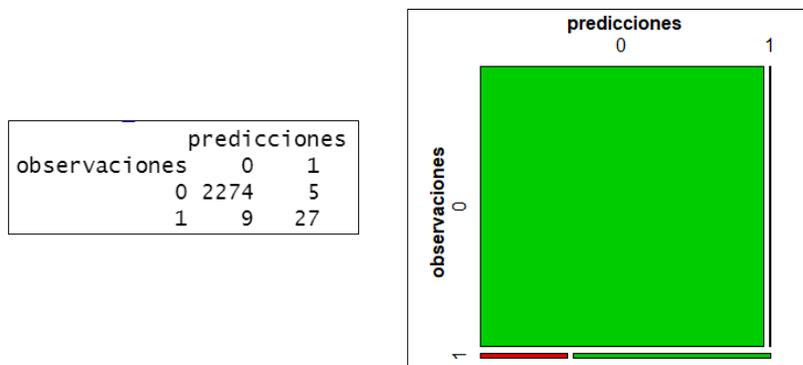


Figura 4.2: Capacidad de predicción del modelo logístico para la etiqueta siempre selecciono.

Esto significa que el modelo es capaz de clasificar correctamente 99,4% de las unidades. Sin embargo, si se analiza en detalle cómo se distribuye el error, se aprecia que el modelo solo ha sido capaz de identificar correctamente a 27 de las 36 unidades (75%) que son siempre seleccionadas.

Si bien las clasificaciones correctas para las unidades que son siempre seleccionadas llegan a tener un valor del 75%, el valor de falsos negativos llega al 25% lo que significa que hay unidades que son siempre seleccionadas que no se clasifican correctamente. También existen 5 unidades (0,26%) que son falsos positivos, aquellas unidades están siendo categorizadas como siempre seleccionables cuando en realidad no son siempre seleccionadas en las soluciones del problema de conservación.

A modo de resumen:

- El modelo logístico creado para predecir la probabilidad de que una unidad sea siempre seleccionada a partir de su valor de mínima rareza y su área es en conjunto significativo acorde al *Likelihood ratio* ($p\text{-value} = 0$).

- El *p-value* de ambos predictores es significativo.
- El modelo presenta un 25% de falsos negativos, lo que podría ser muy alto.

Tabla 4.6: Desglose de la capacidad de clasificación del modelo logístico con un treshold de 0.5.

Etiqueta	Correctas	Correctas en Siempre Selecciono	Falsos Positivos	Falsos Negativos
Siempre Selecciono	99,40%	75%	0,26%	25%

Para validar el modelo se utilizaron tres formas de validación, una con separación simple de las observaciones a través del Split-Ratio y dos utilizando el sistema de Cross Validation:

- Split- Ratio:
 - El método consiste en repartir aleatoriamente las observaciones en dos grupos, uno se emplea para entrenar al modelo y otro para evaluarlo, de acuerdo a un ratio.
 - Al utilizar el modelo separando los datos con un Split-ratio de 0.8 (80% datos entrenamiento y 20% de validación) se observa que la precisión del modelo es de 0.9935, entregando un error de 0.0065 el cual es mayor pero similar a los valores encontrados con Cross Validation.
- Cross Validation:
 - Se utilizan dos validaciones, Leave One Out Cross-Validation (LOOCV) y K-fold Cross Validation.
 - La estimación de error del modelo mediante LOOCV es: 0.004714456.
 - La estimación de error mediante K-fold Cross Validation con $k = 10$ es: 0.004794243.
 - Con K-fold Cross Validation se obtiene un valor muy próximo al estimado mediante LOOCV, pero empleando mucho menos tiempo de computación.

4.3 Análisis de las soluciones del problema con fragmentación espacial

Para continuar con los análisis del problema de conservación se considera el problema que incorpora la fragmentación espacial, a través de un parámetro que indica cuánto peso le damos a la función de penalización por fragmentación, la cual induce una penalización por seleccionar unidades que no están conectadas (existe al menos una unidad de distancia), por lo que el valor del costo asociado a resolver el problema de conservación ya no depende solo del área de las unidades que selecciono, sino que también de que tan agrupadas se encuentren.

Se espera entonces que al incluir la variable de fragmentación en el problema las soluciones presenten un peor rendimiento al explorar un espacio de soluciones factibles, ya que, al intentar encontrar soluciones distintas a la óptima, se tendrá que incorporar unidades que normalmente no serían incorporadas pero que podrían disminuir la penalización por fragmentación.

Para generar un pool de soluciones de tamaño equivalente al problema sin fragmentación, se incurre en la flexibilización del 90% del valor de costo que pueden alcanzar las soluciones en cada iteración con respecto al costo de la solución anterior, además, en este análisis se utilizó un valor de penalización a la fragmentación lo suficientemente bajo ($b=2$) para así poder generar las 500 soluciones alternativas a estudiar.

4.3.1 Caracterización de las soluciones con fragmentación espacial

A continuación, se procede a considerar un espacio de soluciones factibles que incluye la penalización de fragmentación para estudiar y caracterizar la estructura de las soluciones del problema de conservación.

En este caso, con la finalidad de encontrar soluciones distintas a la original, se flexibiliza la restricción de costo asociado al problema, para así permitir la aparición de un número adecuado de soluciones alternativas. Cada una de estas soluciones se compone de un mix de unidades del mapa que han sido seleccionadas por sobre otras unidades para resolver el problema de optimización planteado para esta etapa del trabajo y que ha sido descrito en una sección anterior de este documento. A partir de estas soluciones se procede a analizar lo que caracteriza a las unidades del mapa que son seleccionadas.

Lo primero que se realiza al igual que en el análisis anterior, es identificar las distintas unidades que son seleccionadas en cada iteración de la solución para luego asignarle un valor asociado a la cantidad de veces que las unidades son seleccionadas y qué porcentaje de veces es seleccionada del total de soluciones alternativas.

Tabla 4.7: Información asociada a las unidades, el número de veces que es seleccionada como solución y el porcentaje de veces que es seleccionada en las 500 soluciones.

GridID	isSolution	%Solution
1	185	37,0%
2	11	2,2%
3	3	0,6%
4	3	0,6%
5	16	3,2%

A partir de esta asignación, se tiene que hay 2.261 unidades de la cuenca (97,6% del total) que forman parte de la solución al menos en una oportunidad. Por otra parte, hay 8 unidades que han sido seleccionadas en todas las soluciones del problema con fragmentación y 22 unidades que han sido seleccionadas en al menos un 99% de las soluciones (estas unidades y sus *Rarity Index* están en Anexo E). Se toma especial atención en estas unidades ya que son seleccionadas en gran parte de las soluciones y podrían entonces entregar información relevante para entender la naturaleza y estructura de las soluciones a este problema de conservación de especies. El alto porcentaje de unidades que se seleccionan en al menos una oportunidad llama la atención, para entender de mejor forma cómo evoluciona el número de unidades seleccionadas en las distintas soluciones se presenta el Gráfico 4.4.

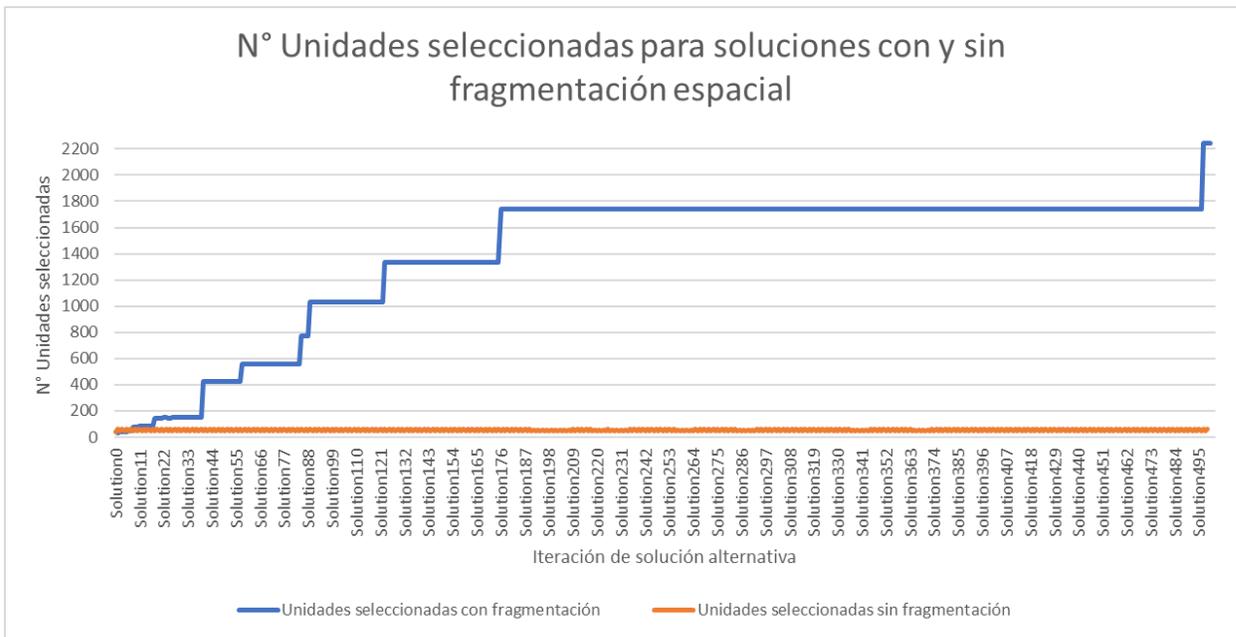


Gráfico 4.4: Evolución del número de unidades seleccionadas para el problema con y sin fragmentación espacial.

Se observa que rápidamente se incurre en un aumento en el número de unidades seleccionadas al encontrar soluciones alternativas del problema con fragmentación espacial. Ante estos resultados, se decide visualizar la evolución del costo de implementar estas soluciones. Es importante recordar que existe un costo asociado a intervenir en las unidades que son seleccionadas como solución al problema, el cual viene determinado por el área de las unidades seleccionadas y la penalización por fragmentación. Sin embargo, con el fin de comparar el costo del problema con y sin fragmentación se considera sólo el área de las unidades como factor de costo.

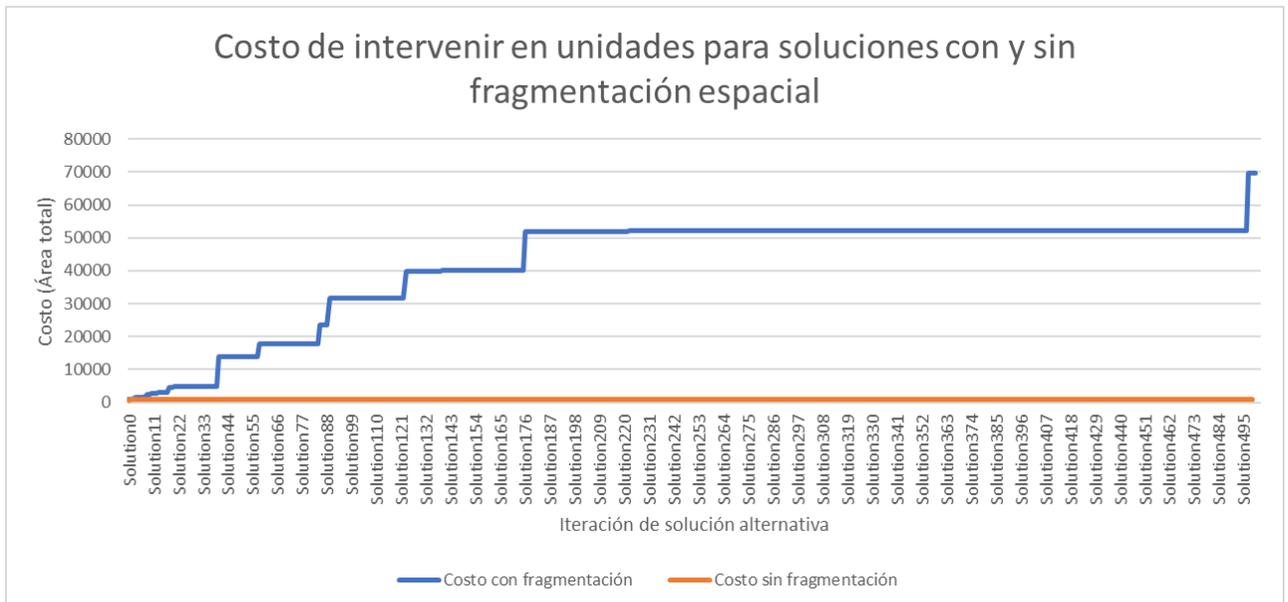


Gráfico 4.5: Evolución del costo de las soluciones con y sin fragmentación espacial.

La función de costos aumenta muy rápidamente al incorporar la fragmentación espacial, teniendo el mismo comportamiento que el número de unidades incorporadas en las soluciones, esto hace sentido debido a su naturaleza, porque cada unidad tiene un área específica, por lo que al aumentar la cantidad de unidades aumenta el área de las soluciones y por ende el costo de estas.

Luego de 40 soluciones, el costo es 18 veces más alto y la cantidad de unidades seleccionadas es casi 11 veces mayor a los valores de la solución óptima encontrada en un principio, por lo que se considera este como un punto de quiebre en la representación de las soluciones, ya que la información sobre las unidades que se incorporan al problema podrían resultar irrelevantes al no ser comparables con las soluciones cercanas al espacio de solución óptima, ya que incluso se tiene que en promedio, la probabilidad de selección de las unidades que forman estas soluciones es menor al 10%.

Ahora bien, al aumentar el número de unidades seleccionadas que se incorporan en las soluciones alternativas, también lo hará el beneficio ecológico de la solución, este beneficio ecológico indica la presencia total de especies que forman parte de la solución. Esto ocurre ya que en cada unidad se encuentran especies de distinto tipo, por lo que, al incorporar más unidades, incorporamos más presencia de especies. En el Gráfico 4.6 se muestra esta evolución del beneficio ecológico, donde se tiene que sigue el mismo comportamiento que el observado en las figuras 4.4 y 4.5.



Gráfico 4.6: Evolución del beneficio ecológico para las soluciones con y sin fragmentación.

Con esta información, se decide estudiar cómo se relaciona el beneficio ecológico de estas soluciones en relación con su costo, para así entender su relación y comportamiento, como resultado, entre estas variables se tiene un coeficiente de correlación del 99% al considerar las 500 soluciones resultantes, lo que indica que están relacionadas de manera directa como es de esperar.

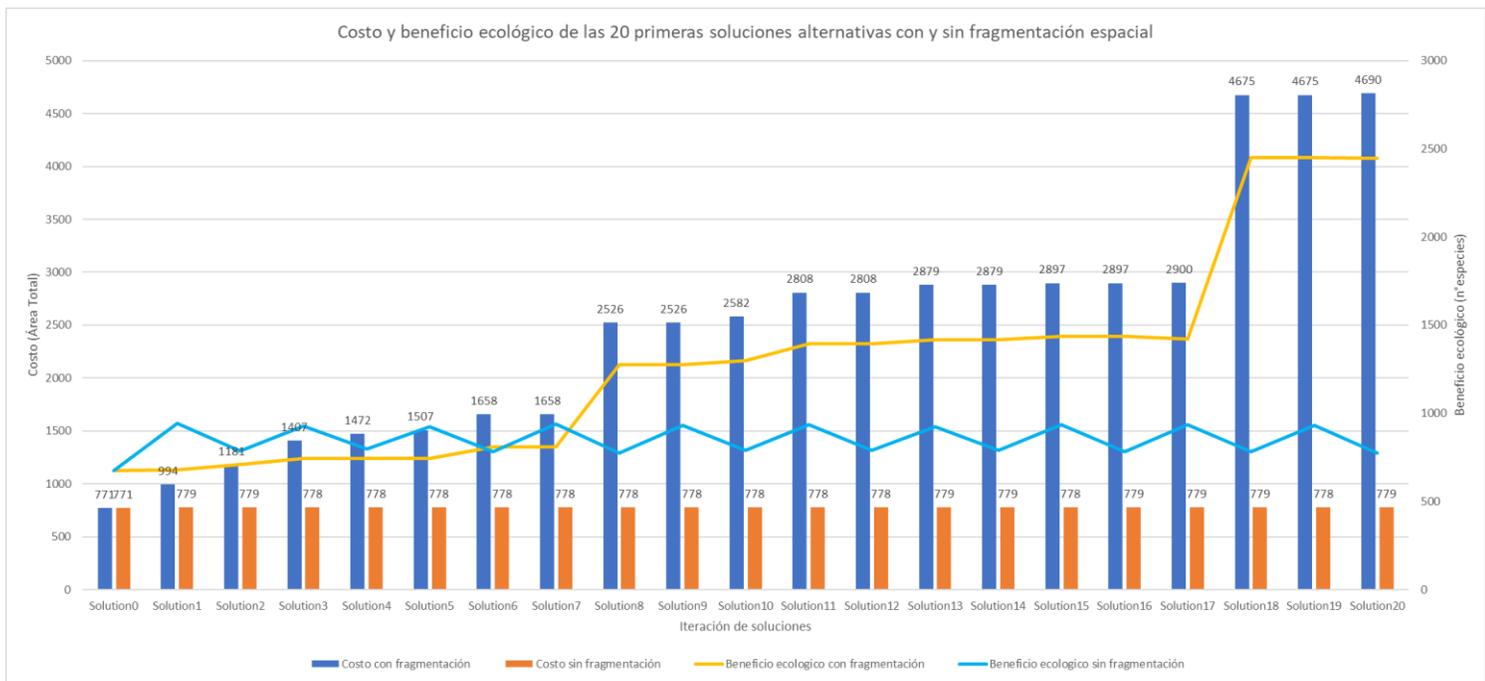


Gráfico 4.7: Evolución del costo y beneficio ecológico de las primeras 20 soluciones de los problemas con y sin fragmentación espacial.

En el Gráfico 4.7, se muestran los costos y beneficios ecológicos de las 20 primeras soluciones del problema con y sin fragmentación de manera de ajustar la escala de datos y observar el comportamiento de mejor forma al que se podría tener mostrando las 500 soluciones.

Para el caso de las soluciones del problema sin fragmentación, se tiene que las variaciones en el costo y beneficio ecológico se mantienen dentro de un rango, donde el costo varía como máximo en un 10% del valor de costo de la solución óptima y el beneficio ecológico mantiene un comportamiento cíclico, donde sube y baja en cada solución alternativa que es encontrada.

Se observa también que para las 7 primeras soluciones el beneficio ecológico entregado por el problema con fragmentación es menor o muy similar al del problema sin fragmentación. Mientras, los costos de las soluciones del problema con fragmentación son mayores, por lo que las soluciones del problema con fragmentación son peores en estos aspectos.

A partir de la 8^{va} solución el beneficio ecológico en el problema con fragmentación supera al beneficio del problema sin fragmentación, sin embargo, el costo de estas soluciones es al menos cuatro veces mayor al caso sin fragmentación.

Al observar el comportamiento del costo y beneficio de las primeras 20 soluciones de cada caso, se tiene que el costo del problema con fragmentación aumenta a medida que se encuentran soluciones alternativas, mientras que para el problema sin fragmentación el costo de las soluciones se mantiene casi constante. Esto se explica por la flexibilización en la restricción de costo del problema con fragmentación, el cuál ha sido explicado anteriormente.

Existen distintos puntos de quiebre al momento de revisar las soluciones alternativas del problema con fragmentación espacial, donde hay saltos importantes en la cantidad de unidades que son seleccionadas.

Para entender porque sucede esto, se decide caracterizar las unidades del mapa con un nuevo parámetro, el cual corresponde a la probabilidad promedio de selección de unidades en las soluciones, el cual se incorpora como indicador que permite estudiar la calidad de las soluciones.

Se utiliza el valor asociado a la probabilidad de seleccionar cada unidad del mapa, el cual ya fue calculado a partir del análisis realizado con regresión logística anteriormente, donde se clasificaron las unidades según su probabilidad de ser seleccionadas.

Así, la metodología para calcular la probabilidad promedio de selección de las soluciones corresponde a la siguiente:

- Calcular la probabilidad de seleccionar una unidad utilizando el modelo de regresión logística generado en el análisis del problema sin fragmentación.
- Calcular la probabilidad promedio a partir de las unidades que son seleccionadas en cada solución, utilizando las probabilidades de selección del set de unidades, dado por las distintas soluciones.

Los resultados de aplicar esta metodología para cada solución del problema con y sin fragmentación se representan en el Gráfico 4.8.

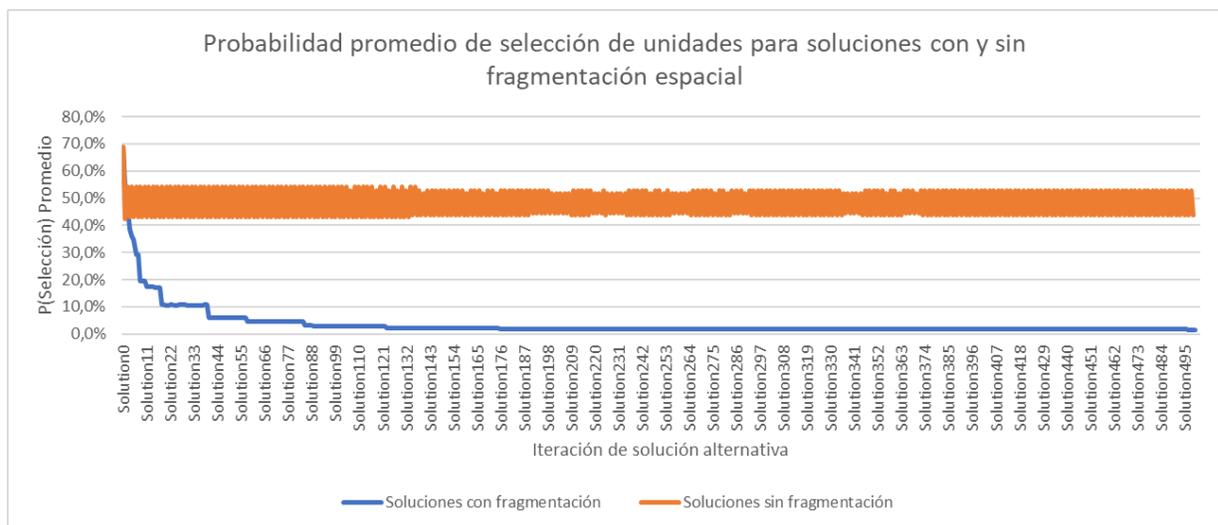


Gráfico 4.8: Probabilidad promedio de selección de unidades.

Para entender estos resultados de forma más clara es importante entender que cuando el valor de la probabilidad promedio es alto, esto se puede explicar porque la solución contiene unidades que tienen una alta probabilidad de ser seleccionadas, o mejor dicho, que fueron clasificadas como unidades seleccionables, por otro lado, cuando la probabilidad promedio de selección de la solución es baja, esto significa que esa solución incorpora unidades que tienen una baja probabilidad de ser seleccionadas, es decir, unidades que no se elegirían en las soluciones normalmente.

Para analizar este comportamiento de mejor forma, el Gráfico 4.9 muestra la probabilidad de selección promedio de las primeras 40 soluciones del problema con y sin fragmentación. Se observa que, para niveles bajos de fragmentación, la probabilidad promedio de selección de unidades de las soluciones disminuye rápidamente para el caso del problema con fragmentación,

mientras que para el problema sin fragmentación la probabilidad promedio expresa variaciones dentro del 40% y 60%.

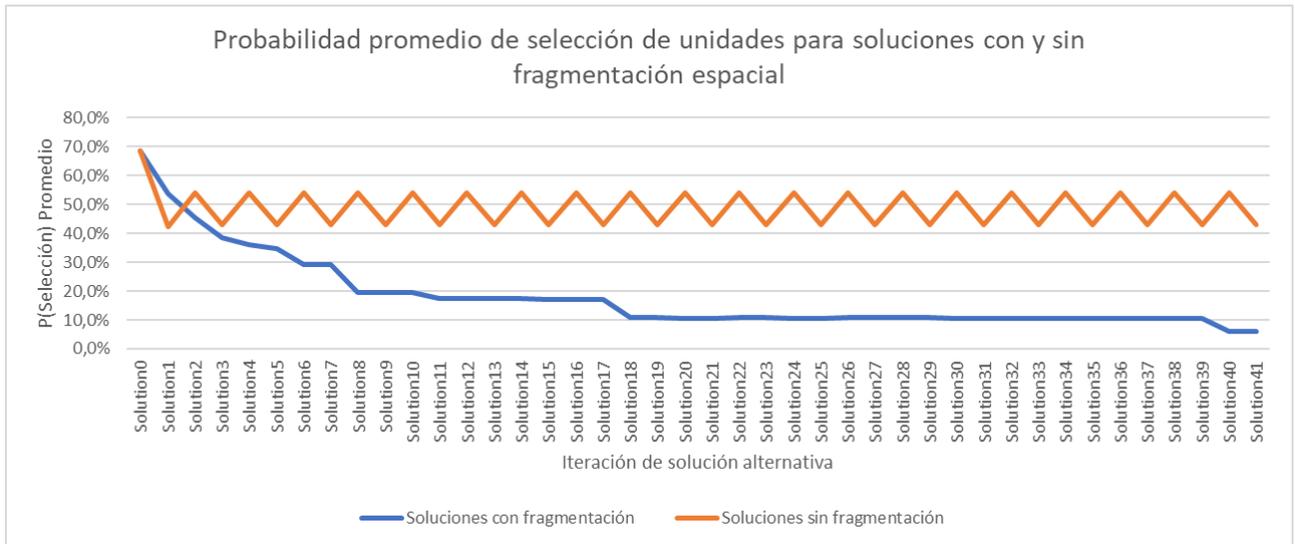


Gráfico 4.9: Probabilidad promedio de selección de las primeras 40 soluciones de los problemas con y sin fragmentación.

Tal como se muestra en el Gráfico 4.9, existen diferencias relevantes en el comportamiento de las soluciones que se encuentran.

Algunos puntos que se pueden desprender son:

- La probabilidad promedio de selección que tienen las unidades va decayendo a medida que se encuentran más soluciones del problema con fragmentación.
- Antes de llegar a la 20^{va} solución, la probabilidad promedio decae al 10%. Esto significa que, en promedio, las unidades que están presentes en esta solución tienen menos de un 10% de probabilidad de ser seleccionadas como parte de la solución en el problema sin fragmentación.
- Luego de la 10^{ma} solución, la probabilidad de selección promedio es menor a 20%.
- Al llegar a la solución 40, la probabilidad de selección promedio es menor al 10%.

Si bien la probabilidad promedio nos entrega información relevante para entender las soluciones que se tienen, no permite entender cuáles o cuántas son las unidades que disminuyen la probabilidad o que la aumentan, ya que pueden existir unidades que sean fundamentales en la búsqueda de soluciones al problema de conservación y unidades que no aporten en encontrar una buena solución.

Ante esto, se genera una clasificación de las unidades de la cuenca a partir de su probabilidad de ser seleccionadas, donde se consideran tres categorías:

- Fundamentales: unidades que tienen una probabilidad de selección mayor al 90%.
- Buenas: unidades que tienen una probabilidad de selección mayor o igual al 50%.
- Malas: unidades que tienen una probabilidad de selección menor al 50%.

A partir de esta clasificación, las 2.316 unidades que conforman la cuenca del río Mitchell son clasificadas de la siguiente forma:

Tabla 4.8: Clasificación del tipo de unidades del mapa y cantidad de unidades que forman parte de estas.

Tipo unidad	Cantidad de unidades
Fundamentales	16
Buenas	16
Malas	2284

Cabe mencionar que, a partir de esta clasificación, la cantidad de unidades que tienen una probabilidad de selección superior al 50% son tan solo 32 unidades, mientras la solución óptima del problema, la que se utiliza de base, incorpora 37 unidades, por lo que existen 5 unidades que son relevantes en la solución del problema pero que no están siendo clasificadas de esta forma. Además, se clasifican 2.284 de las unidades como malas, lo que representa al 98,6% del total de unidades que conforman la cuenca del río Mitchell.

Se muestran a continuación el detalle las unidades fundamentales (Tabla 4.9) y buenas (Tabla 4.10), indicando la cantidad de especies que contienen, su costo y mínima rareza.

Tabla 4.9: Información detallada de las unidades fundamentales de la cuenca.

GridID	Especies	Costo	min_rareza
1340	25	6,5	1
1702	12	20,5	1
1927	5	14,1	1
828	25	20,9	1
829	24	15,2	1
831	22	16,7	1
902	22	15,5	1
1624	10	17,8	1
59	14	21,1	1
540	18	14,3	1
581	14	4,1	1
587	13	12,9	1
455	27	16,2	1
1088	29	20,4	1
1126	25	20,9	1
1158	27	22,3	1

Es posible observar que todas las unidades del tipo fundamental tienen una mínima rareza igual a 1 y su máximo costo es igual a 22,3. Mientras que las unidades buenas que tienen una mínima rareza igual a 1 tienen un costo mayor a este valor y cuyo máximo es 37,4, lo que indica el punto donde se diferencian estas unidades. Además, existen unidades buenas con mínima rareza igual a 2 pero cuyo costo es bastante inferior, llegando como máximo a un valor de 9,2.

Tabla 4.10: Información detallada de las unidades buenas de la cuenca

GridID	Especies	Costo	min_rareza
1334	25	22,8	1
1337	26	36,5	1
1354	28	25,8	1
1716	13	34,4	1
1925	5	25,4	1
825	25	27,6	1
845	23	31,9	1
1048	28	37,4	1
1065	28	33,0	1
1111	25	36,6	1
126	10	6,0	2
558	10	7,3	2
667	4	2,5	2
2013	21	9,0	2
2015	25	9,2	2
2017	22	0,9	2

Con esta diferenciación entre el tipo de unidades que se encuentran en el mapa y a partir de lo identificado para el punto de quiebre que ocurre en la solución 40, se decide observar la diferencia en la cantidad de los tipos de unidades que son incorporadas en las soluciones.

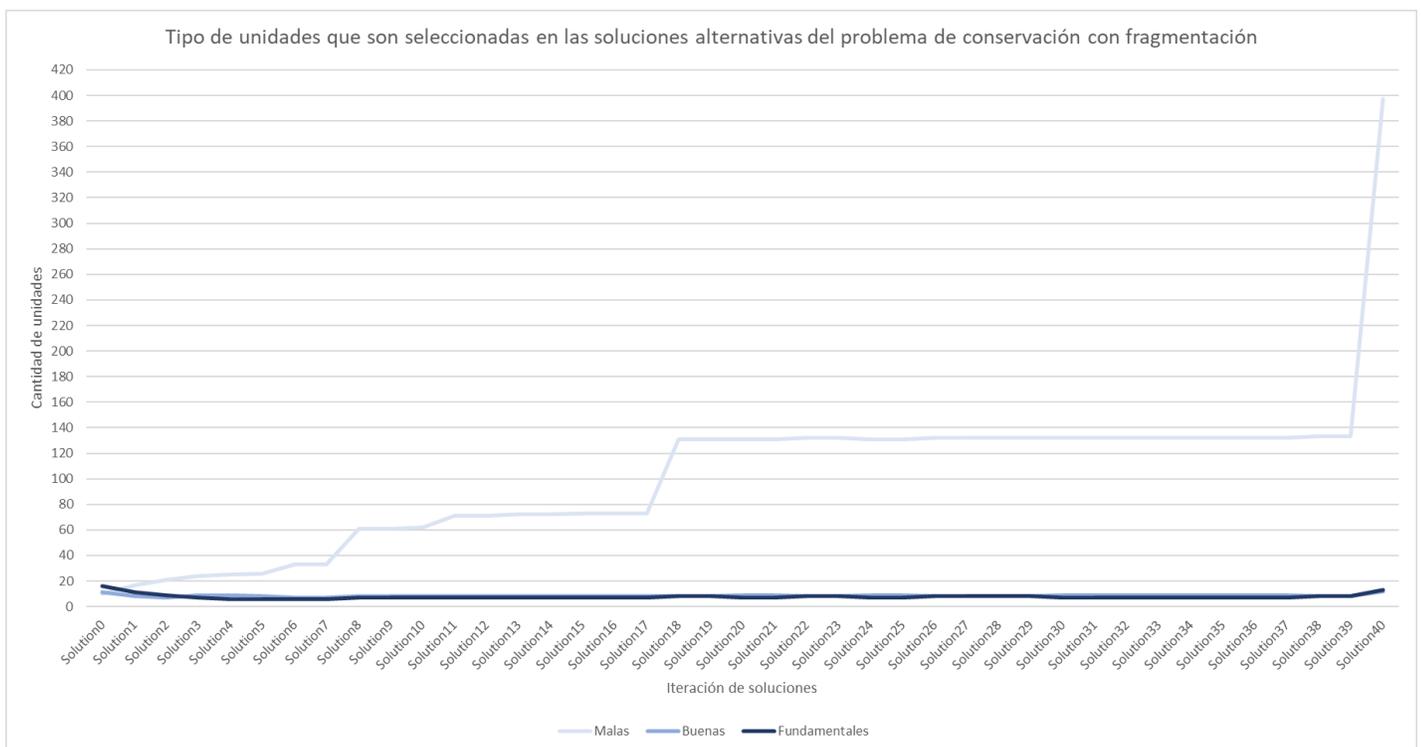


Gráfico 4.10: Evolución de la cantidad de unidades que es seleccionada para cada tipo de unidad.

En el Gráfico 4.10 se muestra la evolución y cambio de las soluciones del problema de conservación según el tipo de unidad que es seleccionada para formar la solución (tabla de datos en Anexo G). Si bien de manera gráfica no se observa el detalle del número de unidades fundamentales y buenas seleccionadas, se tiene que al pasar de la solución 39 a 40, el número de unidades fundamentales seleccionadas pasa de 8 a 13 unidades (aumenta un 62,5%) y el número de unidades buenas seleccionadas pasa de 8 a 12 unidades (aumenta un 50%), sin embargo, hay una baja en la probabilidad promedio de selección de unidades, ver Gráfico 4.9, esto ocurre porque el alza en el número de unidades buenas y fundamentales seleccionadas (que tienen alta probabilidad de ser seleccionadas) viene acompañado de la incorporación de muchísimas unidades malas, pasando de 133 a 397 unidades (aumenta un 198%), por lo que se agrega una gran cantidad de unidades con una baja probabilidad de ser seleccionada a la solución.

Para observar de mejor forma lo que sucede, el Gráfico 4.11 presenta una muestra del porcentaje del total de unidades seleccionadas de cada tipo para las primeras 40 soluciones alternativas. Cabe mencionar que en la solución óptima del problema, se seleccionan todas las unidades fundamentales. Luego, a medida que se tienen soluciones alternativas, se nota una baja considerable al momento de seleccionar unidades del tipo fundamental y buenas en las soluciones, mientras que la proporción de unidades malas que son seleccionadas aumenta.

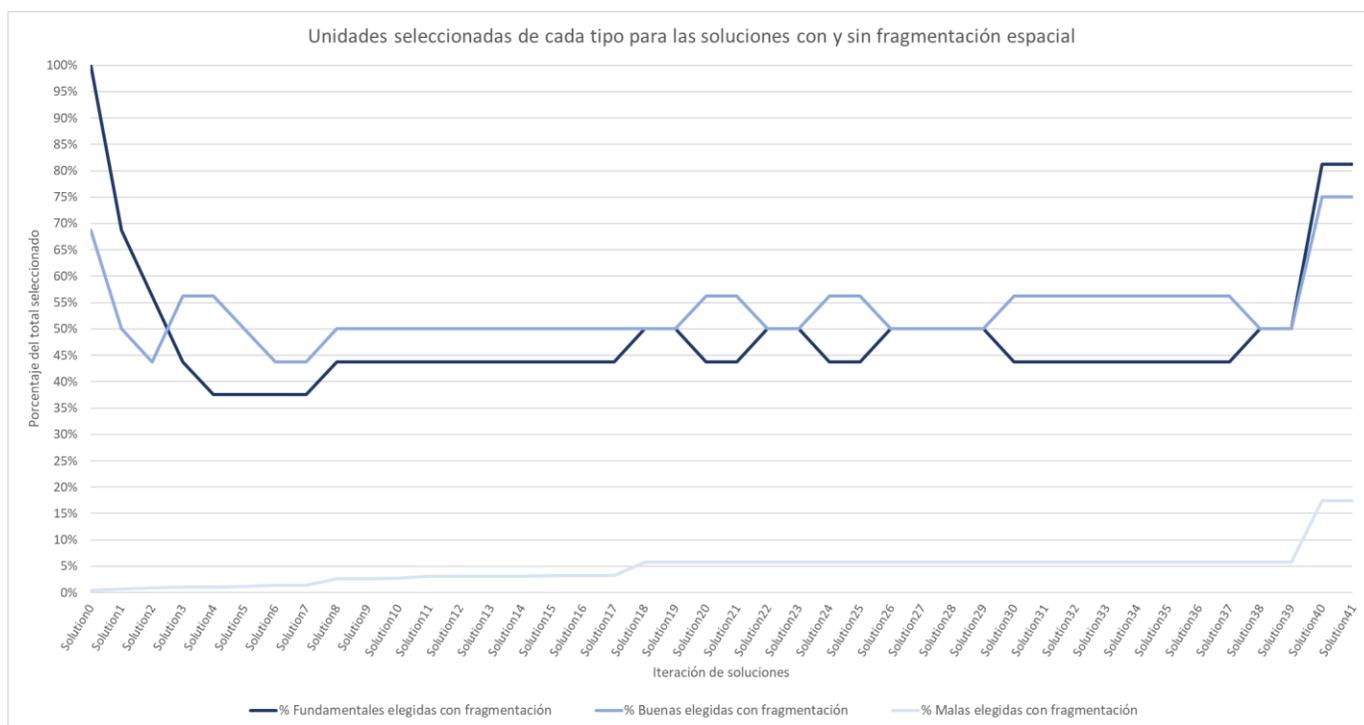


Gráfico 4.11: Muestra del porcentaje del tipo de unidad que es seleccionado en las primeras 40 soluciones del problema con fragmentación espacial.

Como se mencionó anteriormente, si bien existen momentos en donde el porcentaje de unidades buenas y fundamentales que se seleccionan aumenta (por ejemplo, al pasar de la solución 39 a 40), la probabilidad promedio de selección de unidades disminuye con respecto a la solución anterior, ya que se incorpora una cantidad de unidades malas a la solución que baja la probabilidad promedio.

Estos análisis indican que la penalización por fragmentación provoca la incorporación de unidades que no se elegirían normalmente y también deja fuera unidades buenas y fundamentales, es decir, se sacrifica calidad para conseguir poca fragmentación.

4.4 Comparación a partir de la representación gráfica de las soluciones en el mapa de la cuenca del río Mitchell

Para poder entender el comportamiento de las soluciones del problema que considera la fragmentación espacial, es necesario entender cómo se distribuyen las unidades en el mapa, ya que la explicación de porqué unidades malas son seleccionadas y dejas fuera unidades fundamentales puede ser analizada de manera gráfica.

Lo primero a entender es cómo es la distribución espacial del tipo de unidades en el mapa (Figura 4.3) y cómo se relaciona esta distribución con la solución óptima del problema en donde no se dejan unidades fundamentales sin seleccionar. Para luego estudiar cómo cambian las soluciones a medida que se encuentran soluciones alternativas.

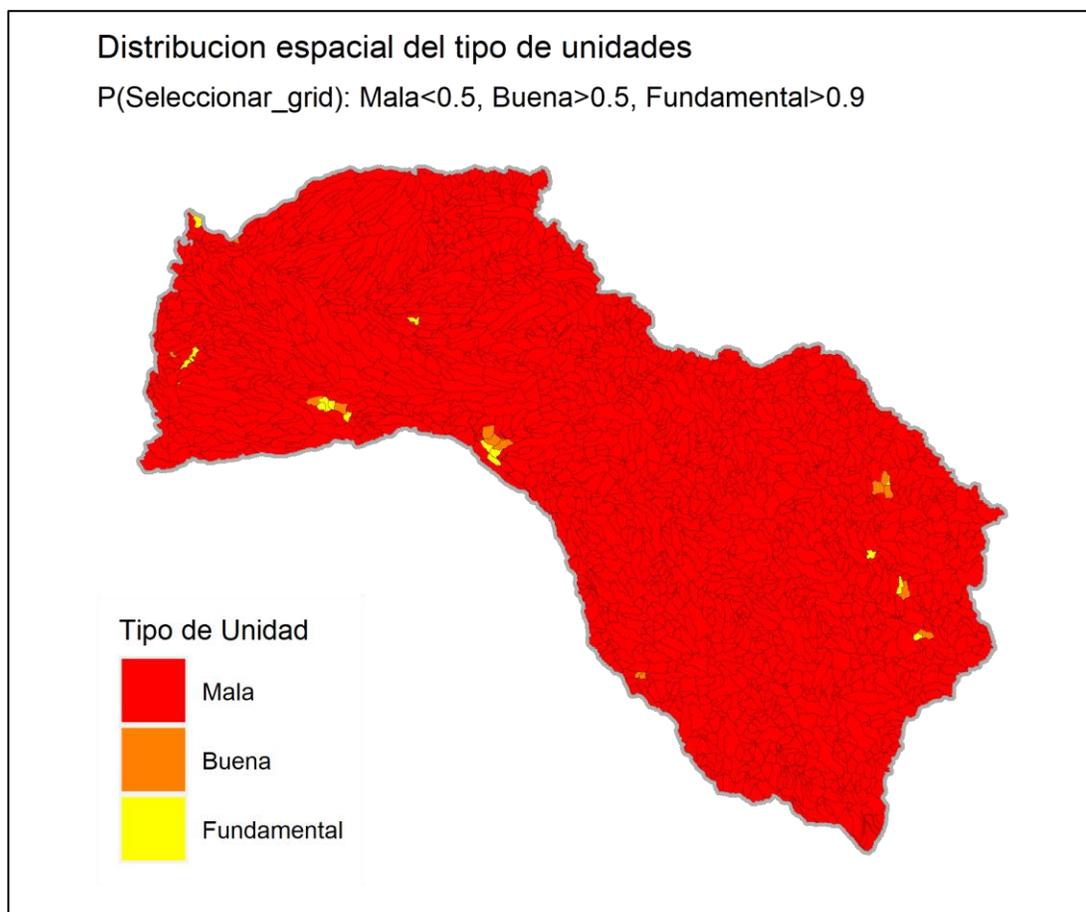


Figura 4.3: Representación gráfica del tipo de unidades que conforman la cuenca del río Mitchell, definidas a partir de la probabilidad de seleccionar cada unidad

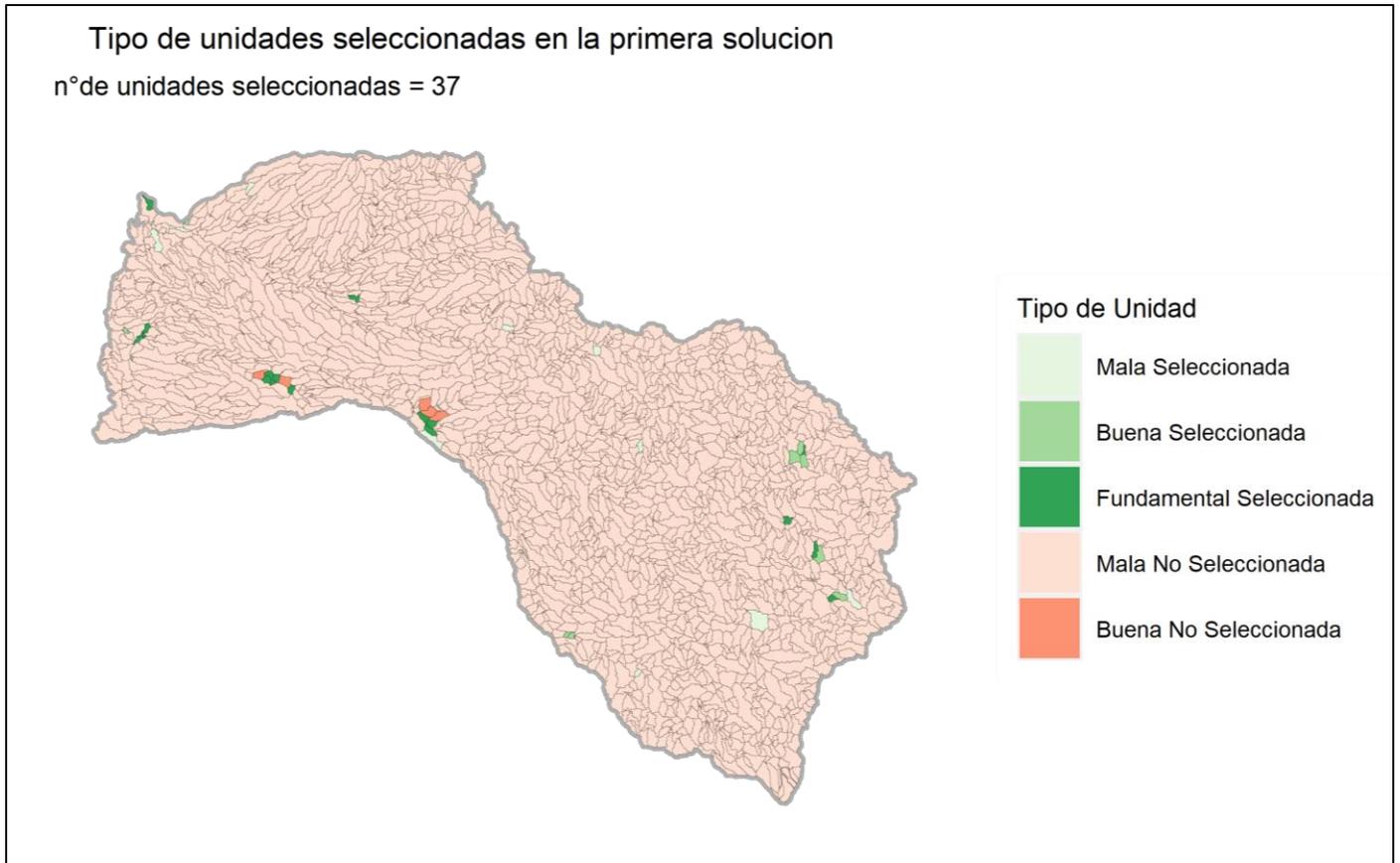


Figura 4.4: Representación gráfica de la solución óptima del problema de conservación sin fragmentación espacial.

A partir de la Figura 4.3, se observa que las unidades malas cubren el mayor porcentaje del área del mapa, tal como ha sido identificado anteriormente, también se observa que las unidades de tipo fundamental y buenas están presentes en distintos sectores del mapa y existen algunos clusters en donde estas unidades se reúnen, lo que podría estar explicado por la presencia de especies raras en espacios específicos de la cuenca del río Mitchell.

Recordando que todas las unidades fundamentales tienen una mínima rareza igual a 1, se decide representar gráficamente la distribución espacial de las unidades que contienen a las especies que son parte de ese grupo de mínima rareza y se clasifican de acuerdo con la presencia de estas especies en el mapa estas se muestran en la Figura 4.5. Se muestra además un fragmento de la Tabla 4.2 donde se realizó la clasificación de las especies según presencia para tener presente al momento de observar el mapa.

Especies	Rareza	Presencia (número de unidades)
mel_ni	1	5
mel_ss	1	6
chl_ra	1	10
hyp_co	1	10
var_la	1	11

Ranking rareza de unidades del mapa

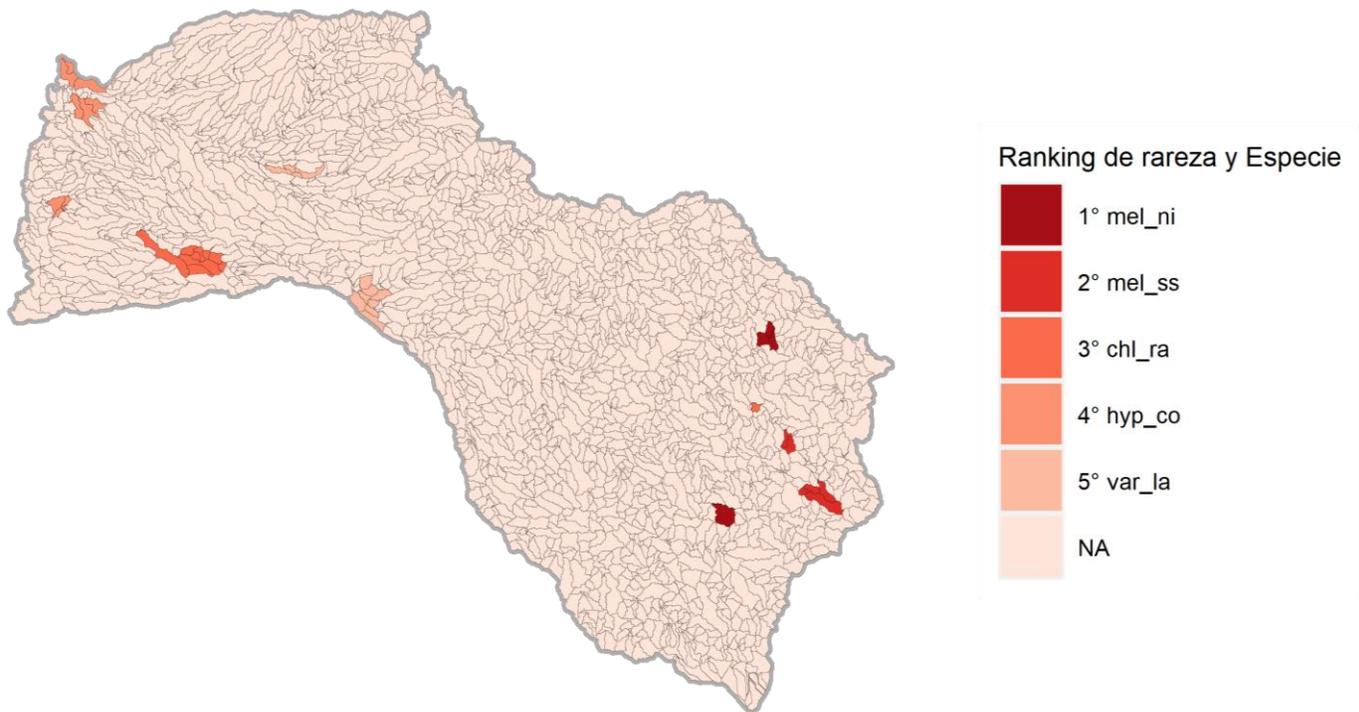


Figura 4.5: Representación gráfica de las unidades con mínima rareza igual a 1, identificando cuál es la especie de rareza 1 que está presente en estas.

A partir de la Figura 4.5 y observando la Figura 4.4, es posible identificar que las unidades malas que son seleccionadas en la solución óptima corresponden a unidades de mínima rareza igual a 1 y que tienen un costo mayor a 40, de acuerdo con los datos de la Tabla 4.5 y 4.10.

Luego de analizar que ocurre con la solución óptima del problema de conservación que se está estudiando, es posible estudiar que ocurre con las soluciones que representan el espacio de soluciones factibles del problema con y sin fragmentación. Para esto, del total de 500 soluciones alternativas que se tienen para cada caso, se seleccionan las primeras 40 soluciones del problema con y sin fragmentación, ya que como fue mencionado con anterioridad, a partir de esta solución existe un quiebre importante en la cantidad de unidades que se seleccionan y en el costo de las soluciones. Por lo que se toman estas soluciones para comparar de mejor forma cómo se distribuyen las unidades seleccionadas en el mapa de la cuenca del río Mitchell.

Se muestran entonces en la Figura 4.6 las primeras 40 soluciones del problema con y sin fragmentación respectivamente, donde se puede evidenciar que las soluciones del problema con fragmentación se comportan de tal forma que se van conectando las unidades del mapa, disminuyendo de esta forma la penalización por fragmentación que este problema presenta en su función de costos. Se tiene entonces que se gana conectividad, incorporando unidades que no serían normalmente seleccionadas, lo que altera la estructura de las soluciones, evidenciando también una pérdida de calidad en las soluciones al incluir la penalización por fragmentación.

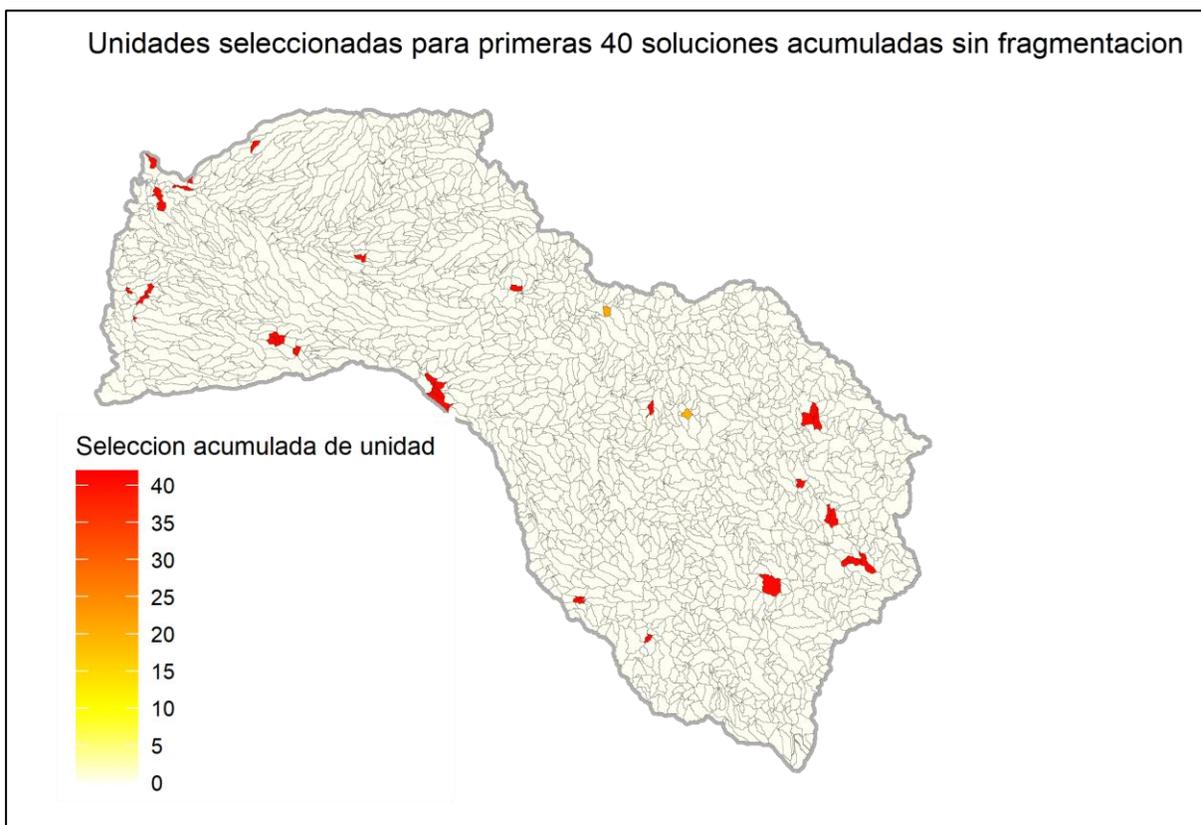
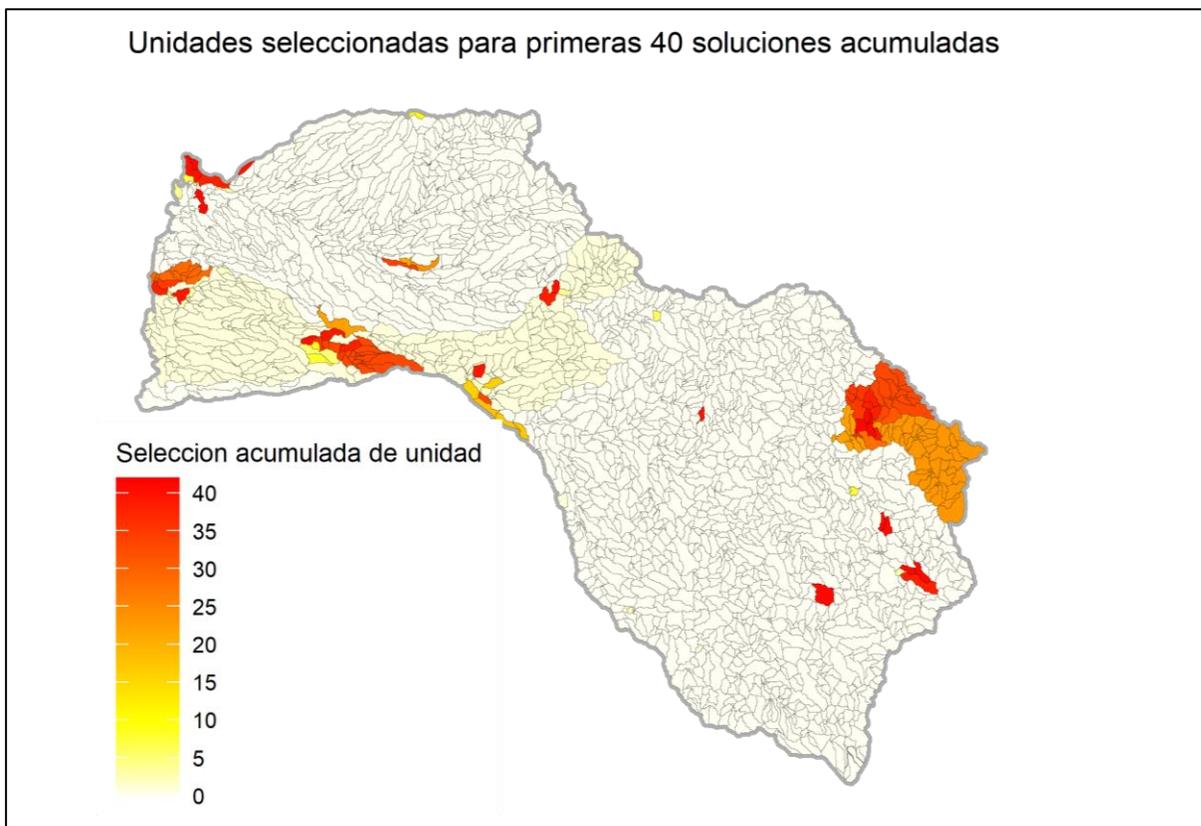


Figura 4.6: Representación gráfica de las primeras 40 soluciones del problema con y sin fragmentación.

Capítulo 5

Discusión y Conclusión

En este trabajo se ha realizado un esfuerzo por entender la naturaleza y estructura de las soluciones del problema de conservación de especies asociado al caso de estudio de 45 especies de peces de agua dulce de la cuenca del río Mitchell, donde se ha desarrollado una aproximación metodológica para explorar un conjunto de soluciones factibles cercanas a la óptima, como estrategia para evaluar los factores que determinan la selección de unidades.

Para esto se estudia el problema con y sin fragmentación espacial de la cuenca, la cual fue dividida en 2.316 unidades de planificación, donde el problema considera la selección de las unidades necesarias para lograr el cumplimiento de un target correspondiente a una representación mínima de 5 unidades en las que estas especies deben estar en el mapa al mínimo costo, determinado por el área total de las unidades a incorporar en el plan de conservación y la penalización asociada a la fragmentación en el segundo conjunto de soluciones.

A partir de esto, se caracterizó a las unidades de la cuenca de acuerdo a la rareza de las especies que cada unidad contiene y el área que cubre, asignándole una probabilidad de selección a cada unidad según estas características y creando así una asignación para distintos tipos de unidades, pudiendo una unidad ser fundamental, buena o mala según su probabilidad de ser seleccionada, así, se tiene que las unidades con una mayor probabilidad de ser seleccionadas como solución del problema de conservación, tienen como característica común que son unidades que contienen a las especies más raras del mapa y son unidades que tienen un menor costo de intervención al promedio de las unidades de la cuenca, lo cual se puede observar en el Gráfico 5.1.

Sin embargo, esta asignación de probabilidad fue generada a partir del porcentaje de veces que las distintas unidades fueron parte de las soluciones del problema sin fragmentación y donde la flexibilidad que tenían las soluciones alternativas para ser seleccionadas correspondía solo al 10% del costo de la solución óptima, por lo que no se tienen soluciones muy distintas entre sí. Es más, las soluciones alternativas presentan una recurrencia a encontrar soluciones similares cada dos iteraciones, teniendo que en las unidades que son seleccionadas siempre no exista ninguna que tenga una mínima rareza mayor a 2, por lo que la estructura de las unidades seleccionadas es poco heterogénea y podría no representar fielmente la estructura de soluciones a problemas de conservación más complejos que incluyan otras variables que intervengan y formen parte en las restricciones del modelo de optimización del problema.

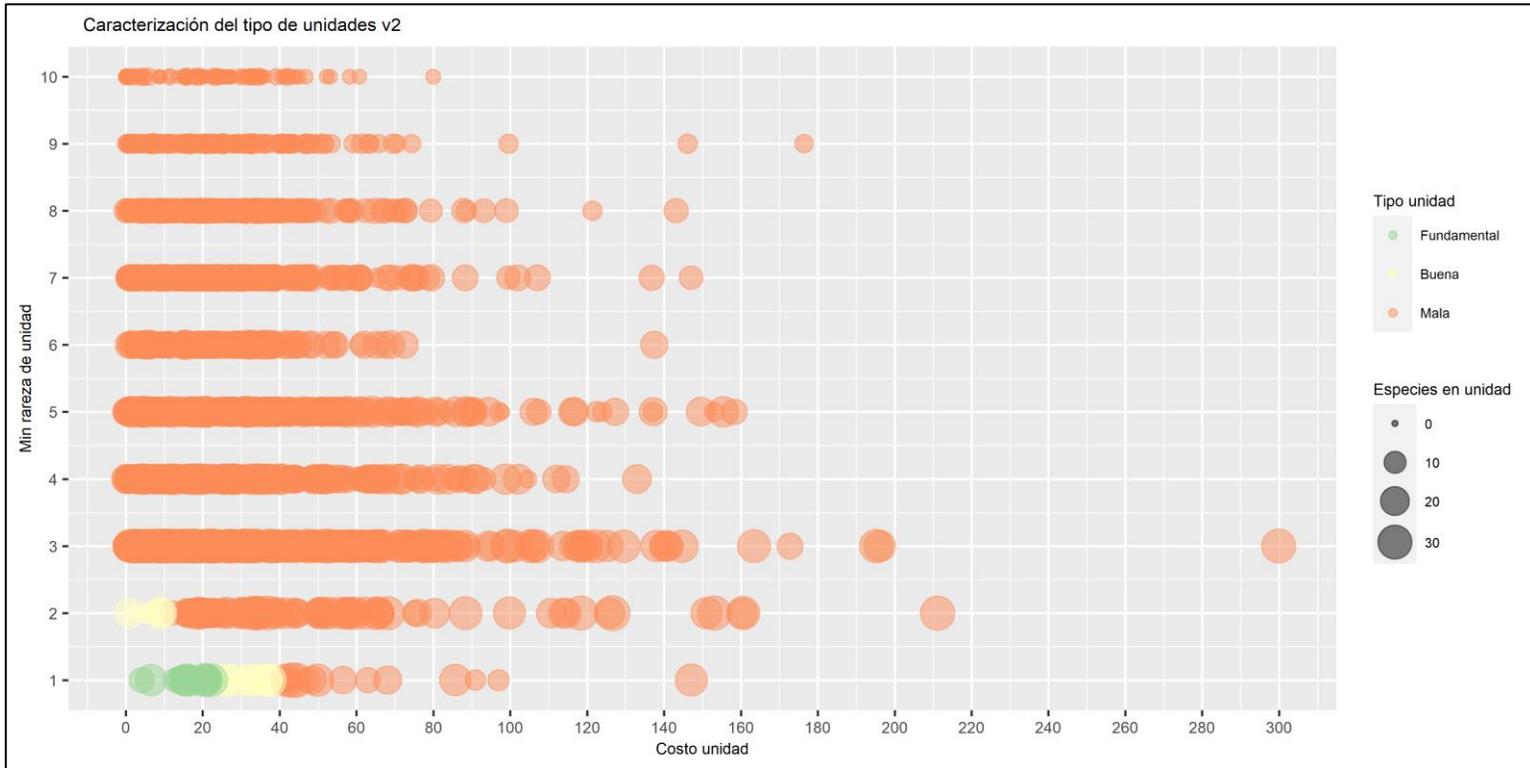


Gráfico 5.1: Caracterización del tipo de unidad que es seleccionada en el problema con fragmentación espacial.

Lo anterior se evidencia al incorporar la variable de fragmentación espacial al problema. Donde ha quedado en evidencia que al incluir solo una variable y con una pequeña penalización, se generan perturbaciones rápidamente al momento de intentar encontrar soluciones alternativas a la óptima, llegando al punto de tener que flexibilizar de gran manera los valores de costo que pueden tener las soluciones alternativas (90% del valor inicial) para así encontrar un espacio de soluciones factibles lo suficientemente grande para ser estudiado y comparado con el problema sin fragmentación. Esto genera que las soluciones encontradas decaigan en cuanto a calidad con respecto a la solución óptima del problema original.

El hecho de incrementar tanto el criterio de flexibilización para encontrar un número adecuado de soluciones factibles podría indicar que la aproximación utilizada para estudiar la estructura y naturaleza de las soluciones del problema de conservación en su estado más simple resulta poco robusta, ya que la estructura cambia rápidamente al incorporar complejidad en el modelo, lo cual se hace necesario al entender que los problemas de conservación se tratan de un problema complejo, donde la aplicación de un plan de conservación en un territorio fragmentado resulta costoso. Si bien esto no se encuentra en el alcance del presente trabajo, se propone el análisis del costo asociado a la fragmentación de la solución óptima inicial y de las soluciones sin fragmentación, para así estudiar su factibilidad bajo los mismos criterios.

Se considera que un criterio de flexibilización del 90% pudiese ser excesivo y que este afecta a la calidad de comparación de las soluciones alternativas con la óptima o con soluciones obtenidas en el escenario de no fragmentación, por lo que a futuro se recomienda el trabajo de comparación

con una cantidad menor de soluciones alternativas, para así no tener que flexibilizar la restricción de costo u otras restricciones en tan alta magnitud.

Se puede observar a partir de la asignación del tipo de unidad, que ya desde la primera y segunda solución alternativa para el problema con fragmentación, se incorporan unidades clasificadas como malas en la solución y se dejan fuera unidades buenas y fundamentales, tal como se muestra en la Figura 5.1 (también se ve representado en el Gráfico 4.10). Lo que indica una clara diferencia entre la clasificación generada para el problema con y sin fragmentación. Esto se refleja además en el porcentaje de selección de las distintas unidades en los problemas con y sin fragmentación (Anexo H), donde unidades que nunca son incorporadas en el primer caso resultan incorporadas en casi el 100% de las veces en el segundo. Mientras que es relevante recordar que las unidades caracterizadas como fundamentales fueron seleccionadas en el 100% de las soluciones sin fragmentación espacial y sin embargo al incorporar fragmentación algunas no se seleccionan.

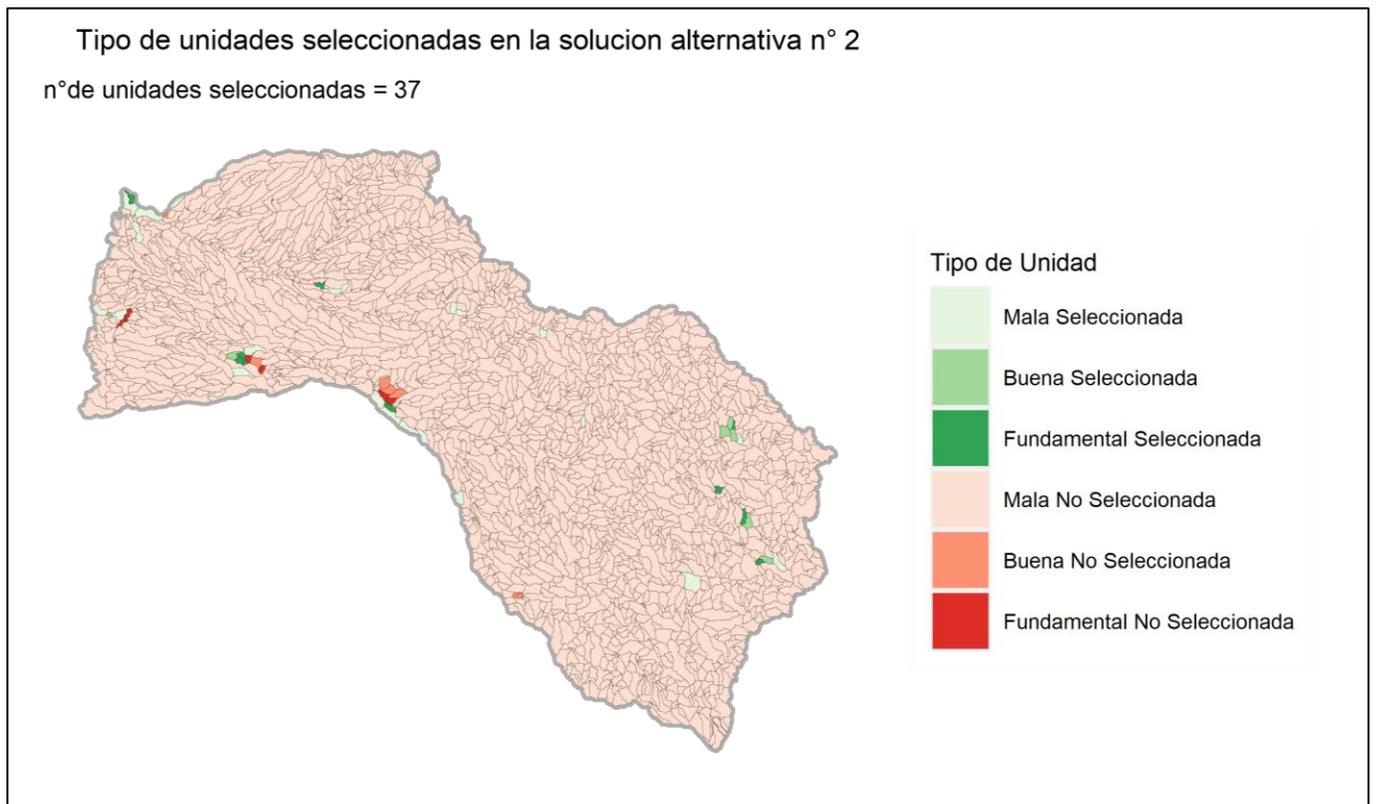


Figura 5.1: Representación gráfica de la solución alternativa n°2 del problema con fragmentación.

Otro factor relevante a considerar es que de las distintas variables y parámetros creados para caracterizar a las unidades del mapa y en especial a las unidades seleccionadas, fueron estudiados en mayor profundidad en el caso de las soluciones sin fragmentación, por lo que se dejó fuera del análisis a variables que al incorporar en el modelo de predicción logit no resultaban ser significativas, como por ejemplo el costo x especie de las unidades o la coocurrencia de especies raras, que no fueron incorporadas en el modelo que se utilizó en la asignación de probabilidades para clasificar las unidades como fundamentales, buenas y malas. Estas y otras variables podrían incorporarse en un modelo futuro, lo que podría resultar en una mejor caracterización del problema

con fragmentación espacial por lo que el modelo de asignación de probabilidad tiene espacios de mejora.

Dentro de los alcances y las limitantes del trabajo desarrollado, se considera que este análisis y estudio de la naturaleza de las soluciones del problema de conservación se limita a la exploración y búsqueda de explicaciones con un espacio de variables acotado a la variedad de especies de peces que se encuentran en la cuenca del Río Mitchell, además del área y la fragmentación de las unidades seleccionadas, sin incorporar otras especies de la cuenca, mecanismos de intervención en las unidades que podrían significar un costo variable en el territorio, la presencia y relación de especies depredadoras, entre otras variables con las que se podrían encontrar más relaciones y explicaciones que permitan responder de manera más completa a la pregunta planteada.

Otra limitante se asocia al alcance territorial del estudio, ya que se consideran datos de una sección de territorio específica que podría tener diferencias importantes con otros territorios, por lo que sería relevante incorporar en la metodología el estudio y aplicación de esta misma en otro territorio para estudiar su comportamiento y capacidad de adaptación para responder de buena forma a la pregunta que motiva este trabajo.

Finalmente, se concluye que es posible describir y explicar algunas características de la naturaleza y estructura de las soluciones del problema de conservación de especies que ha sido estudiado en este trabajo, estas se caracterizan por seleccionar ciertas unidades por sobre otras en las soluciones del problema de conservación. La naturaleza de las soluciones estudiadas está fuertemente ligada a la mínima rareza de las especies que existen en el territorio y a la segmentación y separación de unidades que se realice de este. Donde la estructura de las soluciones viene determinada por las especies más raras del mapa, ya que para poder alcanzar la restricción de target que se determine en el problema, va a ser siempre necesario considerar a estas especies primero. Además, se tiene que el área de las unidades también es un factor relevante por considerar, el cual puede provocar que se seleccionen unidades baratas de territorio que no contienen a las especies más raras, pero que si contienen a especies más comunes que también necesitan alcanzar sus target de representación.

También resulta importante considerar el rol de la fragmentación espacial, que provoca cambios en la estructura de las soluciones al incorporar unidades que no serían incluidas normalmente, sin embargo, las soluciones del problema con fragmentación también definen su estructura con las unidades que fueron caracterizadas en el problema sin fragmentación, seleccionando al menos el 40% de las unidades fundamentales y buenas (Gráfico 4.12) en las primeras 40 iteraciones. Luego, debido a la rápida perturbación de las soluciones alternativas al incluir la variable de fragmentación, se pierde representatividad y capacidad de comparación entre las soluciones. Por lo que la naturaleza y estructura de las soluciones es comprometida en el estudio, a pesar de esto, el trabajo realizado permite un acercamiento al entendimiento de estas soluciones y se considera relevante la incorporación de distintas recomendaciones y trabajos futuros para entender en mayor profundidad la naturaleza y estructura de las soluciones de problemas de conservación.

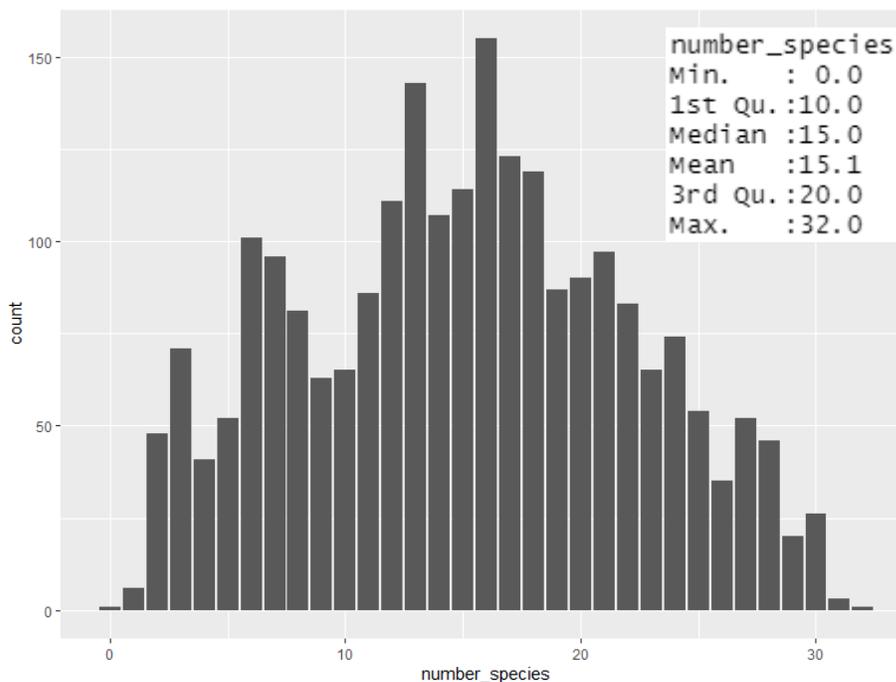
Bibliografía

- Beyer, H. L., Dujardin, Y., Watts, M. E., and Possingham, H. P. (2016). Solving conservation planning problems with integer linear programming. *Ecological Modelling*, 328, 14-22.
- Pimm, S. L., Jenkins, C. N., Abell, R., Brooks, T. M., Gittleman, J. L., Joppa, L. N., Raven, P. H., Roberts, C. M. and Sexton, J. O. (2014). The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, 344, 6187. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1246752>
- James, A. N., Kevin, J Gaston, K. J., and Balmford, A. (1999). Balancing the earth's accounts. *Nature*, 401(6751), 323-324.
- Nel, J. L., Roux, D. J., Maree, G., Kleynhans, C. J., Moolman, J., Reyers, B., Rouget, M., and Cowling, R. M. (2007). Rivers in peril inside and outside protected areas: a systematic approach to conservation assessment of river ecosystems. *Diversity and Distributions*, 13(3), 341-352.
- Butchart, S. H. M., Walpole, M., Collen, B., Van Strien, A., Scharlemann, J. P. W., Almond, R. E. A., Baillie, J. E. M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., et al. (2010). Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 328(5982), 1164-1168.
- McDonnell, M.D., Possingham, H.P., Ball, I.R. et al. (2002). Mathematical Methods for Spatially Cohesive Reserve Design. *Environmental Modeling & Assessment*, 7(2), 107–114.
- Schuwirth, N., Borgwardt, F., Domisch, S., Friedrichs, M., Kattwinkel, M., Kneis, D., Kuemmerlen, M., Langhans, S. D., Martínez-López, J., Vermeiren, P. (2019). How to make ecological models useful for environmental management. *Ecological Modelling*, 411, 108784.
- Ferrier, S., Pressey, R. L., Barrett, T. W. (2000). A new predictor of the irreplaceability of areas for achieving a conservation goal, its application to real-world planning, and a research agenda for further refinement. *Biological Conservation*, 93(3), 302-325.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E., Ngo, H., Guèze, M., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K., Butchart, S., et al. (2020). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovernmental science policy platform on biodiversity and ecosystem services.
- Polasky, S., Nelson, E., Lonsdorf, E., Fackler, P. & Starfield, A. (2005). Conserving species in a working landscape: land use with biological and economic objectives. *Ecological Applications*, 15(4), 1387-1401.

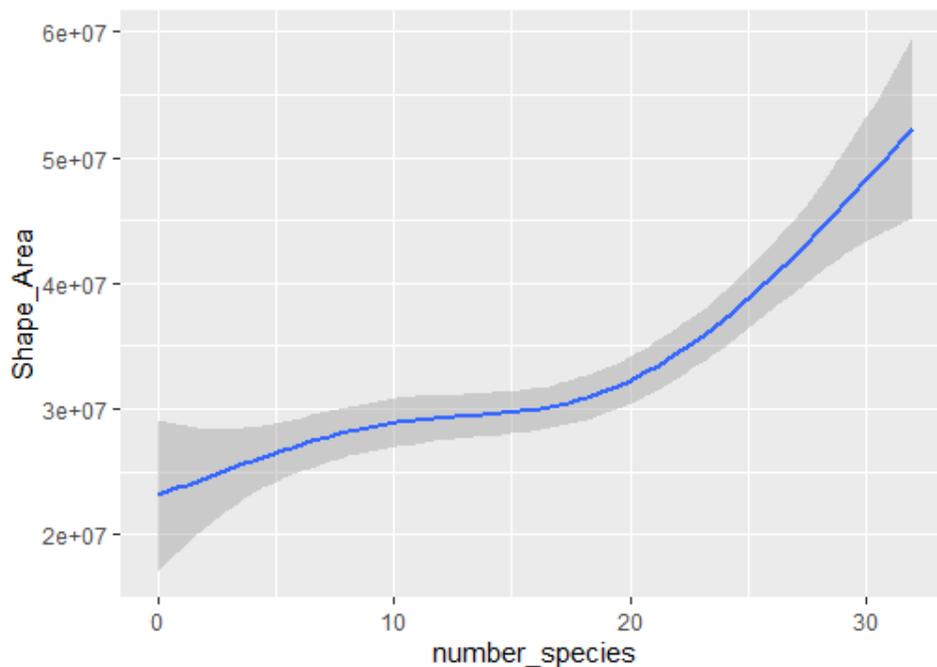
- Kukkala, A. S. and Moilanen, A. (2013). Core concepts of spatial prioritization in systematic conservation planning. *Biological Reviews*, 88(2):443–464.
- UNEP. (2011). *Keeping Track of Our Changing Environment: From Rio to Rio+20 (1992–2012)*. Division of Early Warning and Assessment (DEWA), United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.
- Wilson, K. A., Cabeza, M. and Klein, C. J. (2009). *Fundamental Concepts of Spatial Conservation Prioritization*. United Kingdom: Oxford University Press, 16-27.
- Pressey, R. L., Cabeza, M., Watts, M. E., Cowling, R. M. and Wilson, K. A. (2007). Conservation planning in a changing world. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 22(11), 583-592.
- Ball, I.R., Possingham, H.P., Watts, M. (2009). *Marxan and relatives: software for spatial conservation prioritisation*. United Kingdom: Oxford University Press, 185-195
- Watts, M.E., Ball, I.R., Stewart, R.S., Klein, C.J., Wilson, K., Steinback, C., Lourivald, R., Kirchera, L., Possingham, H.P. (2009). Marxan with zones: Software for optimal conservation based land- and sea-use zoning. *Environ*, 24(12), 1513-1521.
- Hermoso, V., Linke, S., Prenda, J., Possingham, H.P. (2011). Addressing longitudinal connectivity in the systematic conservation planning of fresh waters. *Freshwater Biology*, 56(1), 57-70.
- Bookstein, A., Kulyukin, V.A. & Raita, T. (2002). Generalized Hamming Distance. *Information Retrieval*, 5, 353–375.
- ONU.(2020). Un acuerdo mundial para proteger la biodiversidad y evitar otra pandemia, el llamado de los líderes en histórica cumbre. [en línea] <https://news.un.org/es/story/2020/09/1481582> [consulta: 11 julio 2021].

Anexos

Anexo A: Histograma de la cantidad de especies en cada unidad del mapa.



Anexo B: Relación entre el área de las unidades y el número de especies que contiene.



Especies	Presencia en unidades	Presencia en % unidades	Rareza	Presencia en % del área total
mel_ni	5	0,2%	1	0,3%
mel_ss	6	0,3%	1	0,3%
chl_ra	10	0,4%	1	0,6%
hyp_co	10	0,4%	1	0,5%
var_la	11	0,5%	1	0,5%
amb_sp	15	0,6%	2	1,1%
glo_gi	26	1,1%	2	1,3%
iri_we	28	1,2%	2	2,3%
pse_te	48	2,1%	2	2,9%
syn_sa	94	4,1%	3	4,4%
amb_ag	203	8,8%	3	12,1%
neo_gr	238	10,3%	3	12,2%
meg_cy	246	10,6%	3	15,1%
neo_le	276	11,9%	3	15,1%
zen_sp	282	12,2%	4	14,0%
den_ba	301	13,0%	4	15,7%
hep_ca	305	13,2%	4	14,0%
syn_se	408	17,6%	4	16,6%
thr_sc	416	18,0%	5	23,7%
mog_mo	424	18,3%	5	20,2%
por_re	482	20,8%	5	24,7%
arr_sc	501	21,6%	5	25,4%
lat_ca	583	25,2%	5	31,7%
ano_da	622	26,9%	6	31,7%
neo_be	653	28,2%	6	29,1%
scl_ja	692	29,9%	6	36,1%
str_kr	698	30,1%	6	34,7%
oph_sp	727	31,4%	7	37,2%
glo_sp	819	35,4%	7	33,8%
neo_hy	868	37,5%	7	36,7%
neo_at	957	41,3%	7	45,5%
nem_er	1052	45,4%	8	47,2%
glo_au	1241	53,6%	8	56,6%
tox_ch	1354	58,5%	8	62,7%
neo_pa	1385	59,8%	8	62,4%
amb_ma	1567	67,7%	8	71,0%
glo_ap	1611	69,6%	9	72,7%
cra_st	1657	71,5%	9	74,7%
sco_og	1865	80,5%	9	82,9%
oxy_se	1882	81,3%	9	84,0%
hep_fu	2011	86,8%	10	88,5%
amn_pe	2018	87,1%	10	89,1%
oxy_li	2029	87,6%	10	88,7%
lei_un	2113	91,2%	10	91,1%
mel_si	2225	96,1%	10	96,9%

Anexo C: Tabla con información de las especies y sus Rarity index.

Anexo D: Resultados en Rstudio del modelo de regresión logística que clasifica a las unidades con la etiqueta Siempre Selecciono.

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	5.359e+00	1.200e+00	4.468	7.9e-06	***
Min_rareza2	-3.924e+00	7.927e-01	-4.950	7.4e-07	***
Min_rareza3	-2.636e+01	2.962e+03	-0.009	0.993	
Min_rareza4	-2.692e+01	3.493e+03	-0.008	0.994	
Min_rareza5	-2.650e+01	3.404e+03	-0.008	0.994	
Min_rareza6	-2.677e+01	6.908e+03	-0.004	0.997	
Min_rareza7	-2.662e+01	4.678e+03	-0.006	0.995	
Min_rareza8	-2.648e+01	4.740e+03	-0.006	0.996	
Min_rareza9	-2.696e+01	5.764e+03	-0.005	0.996	
Min_rareza10	-2.693e+01	7.100e+03	-0.004	0.997	
Area	-1.405e-07	3.119e-08	-4.503	6.7e-06	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

ANOVA

	Df	Deviance	Resid. Df	Resid. Dev	Pr(>Chi)
NULL			2314	371.22	
Min_rareza	9	244.764	2305	126.46	< 2.2e-16 ***
Area	1	51.945	2304	74.51	5.707e-13 ***

Anexo E: Rarity index de las unidades seleccionadas en el 100% de las soluciones del problema sin fragmentación.

GridID	isSolution	%Solution	Área	Especies	Promedio Rarity	Mediana	Promedio sin max	Mediana sin max	Min rareza	Rarity	Coocurrencia
59	500	100%	21112295	14	7	8	6	5	1	2	
68	500	100%	16055732	19	7	8	7	7	2	3	
126	500	100%	5999877	10	6	7	6	6	2	3	
141	500	100%	47258768	13	5	4	5	4	1	2	
146	500	100%	15462424	13	7	7	6	5	2	3	
455	500	100%	16190460	27	7	8	7	7	1	3	
540	500	100%	14291871	18	6	5	5	5	1	2	
558	500	100%	7304413	10	6	6	4	4	2	3	
581	500	100%	4148978	14	6	5	5	5	1	2	
587	500	100%	12908988	13	6	5	6	5	1	2	
627	500	100%	18991844	27	7	8	6	7	2	3	
667	500	100%	2458323	4	6	6	4	4	2	3	
828	500	100%	20942387	25	7	8	7	7	1	2	
829	500	100%	15206593	24	8	8	7	7	1	2	
831	500	100%	16739442	22	8	8	7	7	1	2	
902	500	100%	15500626	22	8	8	7	7	1	2	
1088	500	100%	20441848	29	7	7	7	7	1	3	
1126	500	100%	20889367	25	7	8	7	7	1	3	
1158	500	100%	22253737	27	7	8	6	7	1	3	
1162	500	100%	44268360	31	7	7	6	6	1	3	
1309	500	100%	17584343	20	8	8	7	8	2	3	
1334	500	100%	22847677	25	7	8	6	7	1	2	
1337	500	100%	36523855	26	7	8	6	7	1	2	
1340	500	100%	6537626	25	7	8	7	7	1	2	
1354	500	100%	25843141	28	7	8	6	7	1	2	
1624	500	100%	17785358	10	7	10	5	4	1	2	
1702	500	100%	20532233	12	8	9	7	9	1	1	
1716	500	100%	34387080	13	8	9	7	8	1	1	
1911	500	100%	43517186	6	7	9	4	5	1	1	
1925	500	100%	25357646	5	8	10	4	4	1	1	
1927	500	100%	14064529	5	8	10	4	4	1	1	
1982	500	100%	96925111	9	8	10	6	7	1	2	
2013	500	100%	8955829	21	8	8	7	8	2	3	
2015	500	100%	9180331	25	7	8	6	7	2	3	
2017	500	100%	902875	22	7	8	7	8	2	3	
2124	500	100%	12155990	13	8	9	7	8	2	3	

Anexo F: Costo de las unidades que contienen a las especies con rareza 1 de la cuenca y su porcentaje de selección en el total de soluciones del problema sin fragmentación. Ordenadas desde la especie con menor a mayor presencia.

mel_ni	Costo	Costo x Especie	Selección
1334	22,8	913907	100%
1337	36,5	1404764	100%
1340	6,3	261505	100%
1354	25,8	922969	100%
1982	96,9	10769457	100%

mel_ss	Costo	Costo x Especie	Selección
1702	20,532233	1711019	100%
1716	34,387080	2645160	100%
1911	43,517186	7252864	100%
1925	25,357646	5071529	100%
1927	14,064529	2812906	100%
1975	90,975307	11371913	0%

chl_ra	Costo	Costo x Especie	Selección
704	14,7137411	5659131	0%
825	27,603082	1104123	0%
828	20,942387	837695	100%
829	15,206593	633608	100%
831	16,739442	760884	100%
845	31,930043	1388263	0%
898	85,731215	3429249	0%
902	15,500626	704574	100%
918	48,520347	2553702	0%
1624	17,785358	1778536	100%

hyp_co	Costo	Costo x Especie	Selección
59	21,112295	1508021	100%
63	56,550908	3141717	0%
104	68,122266	3585382	0%
141	47,258768	3635290	100%
166	62,931933	4495138	0%
167	41,157391	3165953	0%
540	14,291871	793993	100%
575	42,195375	3516281	0%
581	4,148978	296356	100%
587	12,908988	992999	100%

var_la	Costo	Costo x Especie	Selección
455	16190460	599647	100%
468	43156727	1392152	0%
489	41669293	1543307	0%
1048	37398742	1335669	0%
1065	32978736	1177812	0%
1088	20441848	704891	100%
1091	49853892	1846440	0%
1111	36612272	1464491	0%
1126	20889367	835575	100%
1158	22253737	824212	100%
1162	44268360	1428012	100%

Anexo G: Tipo de unidades seleccionadas para las primeras 40 iteraciones de la solución del problema con fragmentación espacial.

Iteración de solución	Malas	Buenas	Fundamentales	Total
Solution0	10	11	16	37
Solution1	17	8	11	36
Solution2	21	7	9	37
Solution3	24	9	7	40
Solution4	25	9	6	40
Solution5	26	8	6	40
Solution6	33	7	6	46
Solution7	33	7	6	46
Solution8	61	8	7	76
Solution9	61	8	7	76
Solution10	62	8	7	77
Solution11	71	8	7	86
Solution12	71	8	7	86
Solution13	72	8	7	87
Solution14	72	8	7	87
Solution15	73	8	7	88
Solution16	73	8	7	88
Solution17	73	8	7	88
Solution18	131	8	8	147
Solution19	131	8	8	147
Solution20	131	9	7	147
Solution21	131	9	7	147
Solution22	132	8	8	148
Solution23	132	8	8	148
Solution24	131	9	7	147
Solution25	131	9	7	147
Solution26	132	8	8	148
Solution27	132	8	8	148
Solution28	132	8	8	148
Solution29	132	8	8	148
Solution30	132	9	7	148
Solution31	132	9	7	148
Solution32	132	9	7	148
Solution33	132	9	7	148
Solution34	132	9	7	148
Solution35	132	9	7	148
Solution36	132	9	7	148
Solution37	132	9	7	148
Solution38	133	8	8	149
Solution39	133	8	8	149
Solution40	397	12	13	422

Anexo H: Tipo de unidades seleccionadas para las primeras 40 iteraciones de la solución del problema sin fragmentación espacial.

Iteración de solución	Malas	Buenas	Fundamentales	Total
Solution0	10	11	16	37
Solution1	33	11	16	60
Solution2	20	11	16	47
Solution3	32	11	16	59
Solution4	20	11	16	47
Solution5	32	11	16	59
Solution6	20	11	16	47
Solution7	32	11	16	59
Solution8	20	11	16	47
Solution9	32	11	16	59
Solution10	20	11	16	47
Solution11	32	11	16	59
Solution12	20	11	16	47
Solution13	32	11	16	59
Solution14	20	11	16	47
Solution15	32	11	16	59
Solution16	20	11	16	47
Solution17	32	11	16	59
Solution18	20	11	16	47
Solution19	32	11	16	59
Solution20	20	11	16	47
Solution21	32	11	16	59
Solution22	20	11	16	47
Solution23	32	11	16	59
Solution24	20	11	16	47
Solution25	32	11	16	59
Solution26	20	11	16	47
Solution27	32	11	16	59
Solution28	20	11	16	47
Solution29	32	11	16	59
Solution30	20	11	16	47
Solution31	32	11	16	59
Solution32	20	11	16	47
Solution33	32	11	16	59
Solution34	20	11	16	47
Solution35	32	11	16	59
Solution36	20	11	16	47
Solution37	32	11	16	59
Solution38	20	11	16	47
Solution39	32	11	16	59
Solution40	20	11	16	47

Anexo I: Presencia promedio de las especies en el espacio de soluciones factibles del problema con y sin fragmentación espacial.

Especies	Rareza	Presencia Promedio sin fragmentación	Presencia Promedio con fragmentacion
mel_ni	1	100,0%	100,0%
mel_ss	1	83,3%	83,3%
chl_ra	1	50,0%	66,6%
hyp_co	1	50,0%	58,3%
var_la	1	45,5%	49,2%
amb_sp	2	33,3%	33,3%
glo_gi	2	19,2%	24,0%
iri_we	2	17,9%	17,9%
pse_te	2	10,4%	33,3%
syn_sa	3	6,4%	37,9%
meg_cy	3	3,9%	17,1%
neo_le	3	3,3%	15,9%
neo_gr	3	2,8%	8,6%
amb_ag	3	2,5%	18,9%
den_ba	4	5,1%	12,7%
zen_sp	4	5,1%	31,0%
syn_se	4	2,9%	17,9%
hep_ca	4	2,3%	21,2%
lat_ca	5	3,3%	15,5%
thr_sc	5	2,8%	14,7%
por_re	5	2,7%	18,4%
arr_sc	5	2,4%	12,4%
mog_mo	5	2,2%	20,4%
neo_be	6	3,4%	12,7%
str_kr	6	2,9%	12,4%
scl_ja	6	2,4%	31,3%
ano_da	6	2,4%	13,7%
oph_sp	7	2,9%	16,0%
neo_hy	7	2,7%	11,2%
glo_sp	7	2,7%	8,1%
neo_at	7	2,5%	14,6%
nem_er	8	2,4%	11,3%
tox_ch	8	2,1%	13,0%
glo_au	8	2,1%	10,1%
amb_ma	8	1,8%	10,9%
neo_pa	8	1,8%	10,3%
cra_st	9	2,4%	11,3%
oxy_se	9	2,2%	12,2%
glo_ap	9	2,2%	12,4%
sco_og	9	1,8%	10,5%
mel_si	10	2,2%	10,9%
lei_un	10	2,1%	10,4%
oxy_li	10	2,1%	10,9%
amn_pe	10	1,9%	10,9%
hep_fu	10	1,8%	10,1%

Anexo J: Porcentaje de selección de las unidades que contienen a las especies con rareza 1 de la cuenca.

Especie	GridID	Costo	Selección sin fragmentación	Selección con fragmentación
mel_ni	1340	7	100%	100%
mel_ni	1334	23	100%	100%
mel_ni	1354	26	100%	100%
mel_ni	1337	37	100%	100%
mel_ni	1982	97	100%	100%
mel_ss	1927	14	100%	89%
mel_ss	1702	21	100%	98%
mel_ss	1925	25	100%	100%
mel_ss	1716	34	100%	95%
mel_ss	1911	44	100%	100%
mel_ss	1975	91	0%	99%
chl_ra	829	15	100%	99%
chl_ra	902	16	100%	99%
chl_ra	831	17	100%	94%
chl_ra	1624	18	100%	84%
chl_ra	828	21	100%	99%
chl_ra	825	28	0%	100%
chl_ra	845	32	0%	98%
chl_ra	918	49	0%	93%
chl_ra	898	86	0%	93%
chl_ra	704	147	0%	92%
hyp_co	581	4	100%	92%
hyp_co	587	13	100%	92%
hyp_co	540	14	100%	92%
hyp_co	59	21	100%	99%
hyp_co	167	41	0%	1%
hyp_co	575	42	0%	100%
hyp_co	141	47	100%	100%
hyp_co	63	57	0%	99%
hyp_co	166	63	0%	1%
hyp_co	104	68	0%	8%
var_la	455	16	100%	5%
var_la	1088	20	100%	92%
var_la	1126	21	100%	92%
var_la	1158	22	100%	98%
var_la	1065	33	0%	92%
var_la	1111	37	0%	95%
var_la	1048	37	0%	100%
var_la	489	42	0%	5%
var_la	468	43	0%	7%
var_la	1162	44	100%	86%
var_la	1091	50	0%	85%